

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

**DALTON JOSÉ BLADT DE SOUZA**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE EIXOS PARA GERADORES E  
TURBINAS EMPREGADOS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS ATRAVÉS DA  
ANÁLISE MORFOLÓGICA DOS CAVACOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2018**

DALTON JOSÉ BLADT DE SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE EIXOS PARA  
GERADORES E TURBINAS EMPREGADOS EM PEQUENAS CENTRAIS  
HIDRELÉTRICAS ATRAVÉS DA ANÁLISE MORFOLÓGICA DOS CAVACOS**

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. Fabio Freitas de Lima  
Coorientador: MsC. Vitor Baldin

PATO BRANCO

2018

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Otimização do processo de torneamento de eixos para geradores e turbinas empregados em pequenas centrais hidrelétricas através da análise morfológica dos cavacos

Dalton José Bladt de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 23/11/2018 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 - Câmpus 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**.

---

MsC. Vitor Baldin  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. MsC. Joamílton Stahlschmidt  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Fabio de Freitas Lima  
Orientador

---

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

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

Dedico este trabalho aos meus pais e a todos  
que se interessam pela usinagem.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por todos os caminhos que me levaram ao momentodo desenvolvimento do meu trabalho de conclusão.

A minha família: meus pais Benedito Aparecido de Souza, Arlete Adriane Bladt de Souza, minha irmã Daniele Angela Bladt de Souza e minha noiva Marcela Bedin Boldrini pelo apoio integral, pela motivação em todos os momentos durante a graduação em especial pela compreensão nos momentos em que o curso se tornou difícil, quando o esforço não refletiu em bons resultados e resultados ruins me desmotivaram. Sem estas pessoas não teria iniciado e concluído esta etapa da minha vida. Ao meu irmão Dan Henrique Bladt de Souza (in Memoriam), que não pôde ter as mesmas oportunidades que tive, mas cuja felicidade nos piores momentos sempre nos inspirou.

Dentre os profissionais que me auxiliaram tanto nos últimos meses de desenvolvimento deste trabalho, agradeço ao meu orientador e amigo, professor Dr. Fabio de Freitas Lima, cujo afinco e interesse pela área da usinagem contagiam os demais e cuja grande paixão pela área são proporcionais ao seu conhecimento sobre a mesma. Ao técnico de laboratório MsC. Vitor Baldin pelo direcionamento e pensamento crítico durante o trabalho, indicando-me através de sua experiência os fatores que de uma forma fariam ou não sentido no trabalho. No âmbito acadêmico também agradeço ao professor PhD. Álisson Rocha Machado, um dos pilares nacionais na área do torneamento, pelos conselhos com o trabalho.

Agradeço aos profissionais das empresas nas quais desenvolvi as análises pela paciência, auxílio e liberdade para condução de experimentos: Alan Massignani, Felipe Andretta e Marcelo Rozalen.

Aos amigos que me auxiliaram com conselhos, direcionamentos e até mesmo com a operação das máquinas: Davi Henrique C. Lapolli, Gabriel A. Stockler, Jaqueline Maia, Thiago G. Florentino.

*It's not the size of the dog in the fight, it's the size of the fight in the dog. (TWAIN, Mark, 1835).*

## RESUMO

SOUZA, Dalton José Bladt de. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE EIXOS PARA GERADORES E TURBINAS EMPREGADOS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS ATRAVÉS DA ANÁLISE MORFOLÓGICA DOS CAVACOS. 2018. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

O presente trabalho objetiva a otimização do processo de torneamento, mais precisamente durante a etapa de desbaste de eixos de geradores e turbinas extra pesados utilizados em pequenas centrais hidrelétricas através da análise morfológica dos cavacos.

Abrange etapas desde a investigação das etapas de fabricação destes tipos de eixo, escolha do material, escolha das ferramentas para o torneamento, tratamentos térmicos dos eixos, até a escolha de parâmetros com o intuito para a obtenção de melhores morfologias de cavaco levando em conta a produtividade.

Foram feitos testes em laboratório com ferramentas usadas por uma das empresas onde existe o torneamento para que se pudesse observar o comportamento dos cavacos conforme a variação dos parâmetros. Os resultados experimentais demonstram a influência de uma variável nem sempre levada em consideração: a rotação da peça, que, uma vez controlada, reduz os valores de velocidade de corte, fazendo com que os cavacos se comportem de maneira análoga à literatura e conseqüentemente originando um maior controle e significativa otimização da morfologia, assim como outros benefícios acarretados por uma boa morfologia, nos eixos reais das empresas.

**Palavras-chave:** Usinagem. Torneamento. Desbaste. ABNT 1045. Morfologia. Cavaco. Otimização. Tratamento térmico.

## ABSTRACT

SOUZA, Dalton José Bladt de. Optimization of the turning of shafts for generators and turbines used in small hydro power plants through morphological analysis of the chips. 2018. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

The present work aims at the optimization of the turning process, more precisely during the roughing stage of heavy generator and turbine shafts used in small hydroelectric plants through the morphological analysis of the chips.

It covers several stages since the investigation of the manufacturing of these shafts, choice of material, choice of tools for the turning process, heat treatment of the shafts, to the choice of parameters in order to obtain better chip morphologies taking into account the productivity. Laboratory tests were carried out using tools used by one of the companies where the turning was performed, so that the behavior of the chips could be observed according to the variation of the parameters. The experimental results demonstrate the influence of a variable not always taken into account: the rotation of the workpiece, which, once controlled, reduces the values of cutting speed, causing the chips to behave in a manner analogous to the literature and, consequently, greater control and significant optimization of the morphology, as well as other benefits brought about by a good morphology, in the real shafts of the companies.

**Keywords:** Machining. Turning. Roughing. ABNT 1045. Morphology. Chip. Optimization. Heat treatment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema torneamento mecânico . . . . .	4
Figura 2 – Condições e grandezas de corte . . . . .	5
Figura 3 – Força de usinagem e suas componentes no torneamento . . . . .	6
Figura 4 – Superfícies e Arestas da Ferramenta de Corte . . . . .	7
Figura 5 – Superfícies e planos envolvidos na formação do cavaco . . . . .	9
Figura 6 – Planos de referência da ferramenta . . . . .	9
Figura 7 – Ângulos para ferramenta no $P_r$ . . . . .	10
Figura 8 – Ângulos para ferramenta no $P_f$ . . . . .	10
Figura 9 – Influência do ângulo de saída na morfologia do cavaco . . . . .	11
Figura 10 – Os diversos tipos de cavaco . . . . .	12
Figura 11 – Classificação dos tipos de cavaco de acordo com utilidade . . . . .	13
Figura 12 – Classificação das formas de cavaco . . . . .	13
Figura 13 – Resistência mecânica e tendência a vibração de um inserto de acordo com sua geometria . . . . .	15
Figura 14 – Possíveis direções de aplicação do fluido de corte . . . . .	18
Figura 15 – Tensão de von Mises para um eixo de turbina kaplan em condição de carregamento real . . . . .	19
Figura 16 – Eixo forjado em matriz aberta . . . . .	21
Figura 17 – Têmpera e revenimento . . . . .	22
Figura 18 – Inseto Utilizado no Desbaste do Eixo para Gerador . . . . .	24
Figura 19 – Dimensões do Inseto WIDIA TNMG 160404 . . . . .	24
Figura 20 – Suporte Direito . . . . .	24
Figura 21 – Dimensões do Suporte . . . . .	25
Figura 22 – Inseto BFT Burzoni CNMG 190616 . . . . .	25
Figura 23 – Suporte BFT Burzoni PCBNRL . . . . .	26
Figura 24 – Paquímetro Starret® . . . . .	27
Figura 25 – Micrômetro Digimess . . . . .	27
Figura 26 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 1 . . . . .	28
Figura 27 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 2 . . . . .	28
Figura 28 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 3 . . . . .	29
Figura 29 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 4 . . . . .	29
Figura 30 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 5 . . . . .	30
Figura 31 – Visualização comparativa das amostras 1 a 5 (eixo gerador) . . . . .	30
Figura 32 – Cavacos resultantes da amostra 1 - eixo para turbina . . . . .	31
Figura 33 – Cavacos resultantes da amostra 2 - eixo para turbina . . . . .	31
Figura 34 – Cavacos resultantes da amostra 3 - eixo para turbina . . . . .	32

Figura 35 – Visualização comparativa das amostras 1 a 3 (eixo turbina) . . . . .	32
Figura 36 – Durômetro de bancada Digimess . . . . .	33
Figura 37 – Forno mufla utilizado nos tratamentos térmicos . . . . .	34
Figura 38 – Torno Romi Tormax 20A . . . . .	34
Figura 39 – Torno American Tool Works . . . . .	35
Figura 40 – Óleo utilizado nos passes de desbaste . . . . .	35
Figura 41 – Suporte WIDIA PCBNR3232P19 . . . . .	36
Figura 42 – Ângulos de acordo com o $P_r$ . . . . .	36
Figura 43 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (1-6) . . . . .	40
Figura 44 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (7-13) . . . . .	41
Figura 45 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (14-19) . . . . .	43
Figura 46 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (20-26) . . . . .	44
Figura 47 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (27-30) . . . . .	45
Figura 48 – Resultantes dos parâmetros na empresa . . . . .	46
Figura 49 – Resultantes dos parâmetros sugeridos . . . . .	47
Figura 50 – Qualidade superficial provocada pela melhoria da morfologia dos cavacos . . . . .	48
Figura 51 – Rotações utilizadas nos desbastes e respectivas frequências . . . . .	59

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos metais duros . . . . .	15
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição e propriedades do aço AISI/ABNT 1045 . . . . .	19
Tabela 2 – Composição química dos eixos para gerador usinados . . . . .	19
Tabela 3 – Dimensões do Suporte Big Tools 3232P16 . . . . .	25
Tabela 4 – Dimensões suporte BFT Burzoni PCBNRL . . . . .	26
Tabela 5 – Parâmetros de desbaste das amostras do gerador. . . . .	28
Tabela 6 – Parâmetros de desbaste das amostras da turbina. . . . .	31
Tabela 7 – Valores de $v_c$ . . . . .	37
Tabela 8 – Valores de taxa de remoção de material . . . . .	37
Tabela 9 – Parâmetros de entrada e de saída levando em conta a TRM . . . . .	38
Tabela 10 – Parâmetros de entrada e de saída levando em conta a velocidade de corte . . . . .	38
Tabela 11 – Parâmetros de entrada e de saída levando em conta baixas rotações . . . . .	39
Tabela 12 – Classificação dos cavacos - TRM . . . . .	42
Tabela 13 – Classificação dos cavacos - $v_c$ . . . . .	42
Tabela 14 – Classificação dos cavacos - menores valores de n . . . . .	46
Tabela 15 – Classificação dos cavacos - parâmetros empresa . . . . .	47
Tabela 16 – Classificação dos cavacos - parâmetros sugeridos . . . . .	47
Tabela 17 – Valores de $v_c$ . . . . .	48
Tabela 18 – Valores de taxa de remoção de material . . . . .	48
Tabela 19 – Dimensões da primeira amostra . . . . .	55
Tabela 20 – Dimensões da segunda amostra . . . . .	55
Tabela 21 – Dimensões da terceira amostra . . . . .	55
Tabela 22 – Dimensões da quarta amostra . . . . .	56
Tabela 23 – Dimensões da quinta amostra . . . . .	56
Tabela 24 – Dimensões da primeira amostra . . . . .	57
Tabela 25 – Dimensões da segunda amostra . . . . .	57
Tabela 26 – Dimensões da terceira amostra . . . . .	57
Tabela 27 – Dimensões da quarta amostra . . . . .	58
Tabela 28 – Dimensões da quinta amostra . . . . .	58
Tabela 29 – Relação frequência x rotações do torno American Tool Works Co. . . . .	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	International Organization for Standardization
SAE	Society of Automotive Engineers
DIN	Deutsches Institut für Normung
CNC	Comando Numérico Computadorizado
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PCH's	Pequenas Centrais Hidrelétricas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$	Avanço
$ap$	Profundidade de Corte
$v_c$	Velocidade de Corte
$d$	Diâmetro da Peça
$n$	Revoluções da Peça
$v_f$	Velocidade de Avanço
TRM/Q	Taxa de Remoção de Material
$F_u$	Força de Usinagem
$F_p$	Força Principal de Corte
$F_f$	Força de Avanço
$F_{pa}$	Força Passiva
$S$	Aresta Principal de Corte
$S'$	Aresta Secundária de Corte
$A_\alpha$	Superfície Principal de Folga
$A'_\alpha$	Superfície Secundária de Folga
$A_\gamma$	Superfície de Saída
$P_r$	Plano de Referência
$P_f$	Plano de trabalho
$\chi_r$	Ângulo de Posição da Ferramenta
$\chi'_r$	Ângulo de Posição da Ferramenta Secundário
$\epsilon_r$	Ângulo de Ponta da Ferramenta
$\alpha_f$	Ângulo de Folga
$\beta_f$	Ângulo de Cunha
$\gamma_f$	Ângulo de Saída

$R_{\epsilon}$	Raio de Ponta
$h$	Largura do Cavaco
$b'$	Espessura do Cavaco

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO GERAL	1
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	2
1.3 JUSTIFICATIVAS	2
<b>2 – REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1 MANUFATURA E USINAGEM	3
2.2 TORNEAMENTO MECÂNICO	3
2.2.1 Condições e grandezas de corte no torneamento	4
2.3 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO	6
2.4 PLANOS E ÂNGULOS DA CUNHA CORTANTE E INFLUÊNCIA NA FORMAÇÃO DOS CAVACOS	9
2.5 DIFERENTES MORFOLOGIAS DE CAVACO	11
2.5.1 Formas assumidas pelo cavaco	13
2.5.2 Influência da temperatura na coloração dos cavacos	14
2.6 FERRAMENTAS DE CORTE	14
2.6.1 Classificação dos metais duros	14
2.6.2 Geometria da ferramenta	15
2.7 FLUIDOS DE CORTE - CLASSIFICAÇÃO E MÉTODOS DE APLICAÇÃO	16
2.7.1 Classificação dos fluidos de corte	16
2.7.2 Direção e métodos de aplicação	17
2.8 AÇO ABNT 1045 - Justificativa de escolha	18
2.9 PROCESSOS DE PRÉ-FABRICAÇÃO DOS EIXOS	20
2.9.1 Forjamento	20
2.9.2 Laminação	21
2.10 TRATAMENTOS TÉRMICOS EMPREGADOS NA PRÉ-FABRICAÇÃO	21
2.10.1 Têmpera e revenimento	21
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
3.1 MATERIAIS NO TORNEAMENTO DAS EMPRESAS E COLETAS	23
3.1.1 Insetos e suportes utilizados pelas empresas no desbaste dos eixos	23
3.1.2 Instrumentos de medição para análise das amostras	26
3.1.3 Amostras de cavacos coletadas	27
3.1.3.1 Provenientes do eixo para gerador	27
3.1.3.2 Provenientes do eixo para turbina	30
3.2 TESTES DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS EM LABORATÓRIO	32



3.2.1	Materiais utilizados nos experimentos . . . . .	33
3.2.2	Tratamento térmico do corpo de prova . . . . .	36
3.3	MÉTODOS . . . . .	37
<b>4</b>	<b>– ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>40</b>
4.1	Laboratório . . . . .	40
4.2	Empresa . . . . .	46
<b>5</b>	<b>– CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>49</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	50
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>51</b>
	<b>Apêndices . . . . .</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE A–Dimensões dos cavacos das amostras coletadas - Eixo do Gerador . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE B–Dimensões dos cavacos das amostras coletadas - Eixo da Turbina . . . . .</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE C–Medidas de frequência para rotações desejadas para os experimentos . . . . .</b>	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nas pequenas centrais hidrelétricas que são, segundo a resolução nº 673/2015 da ANEEL, 2015 (Agência Nacional de Energia Elétrica), plantas de energia elétrica de potência superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, a usinagem se vê presente na parte dos geradores, cujo eixo pode ser fabricado com o aço ABNT 4140 ou ainda ABNT 1045, que são aços de médio teor de carbono. Estes dois tipos de aço se diferenciam entre si primeiramente pelo teor de carbono, mas também pela presença de elementos de liga no primeiro, ainda que em baixa quantidade, para que possa ser usado em aplicações onde seja requerida uma maior capacidade de endurecimento em maiores seções transversais.

No presente estudo, os eixos dos geradores e turbinas são fabricados com o aço ABNT 1045. Como se sabe, o fator custo é essencial dentro de qualquer projeto, não sendo diferente nos projetos em questão, no que diz respeito à escolha do material citado. Estes eixos chegam com sobremetal proveniente do processo de fabricação e devem então ser usinados para que adquiram as devidas dimensões estabelecidas em projeto. O torneamento mecânico é a maneira convencional na qual os eixos são transformados de produto semiacabado em produto acabado.

O cavaco produzido pelo processo de torneamento mecânico está longe de ser somente o material a ser reciclado e é muitas vezes caracterizado como sobra. No entanto, o cavaco é uma evidência das condições nas quais a usinagem por torneamento está sendo feita.

A morfologia do mesmo, ou seja, suas diversas formas e dimensões carregam as marcas das diversas variáveis empregadas pelo operador (no caso da empresa, das ferramentas e suportes) e têm a capacidade de até mesmo impactar no custo desta operação já que, de acordo (TRENT; WRIGHT, 2000), pode-se ter mais compreensão sobre os problemas práticos de atuação de ferramentas e da taxa de remoção de cavacos e conseqüentemente o problema econômico, uma vez que se estude o comportamento do material de trabalho, assim como da maneira na qual o cavaco é formado e como ele se move sobre a superfície de saída da ferramenta.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Inter-relacionar as variáveis presentes na operação de torneamento com a morfologia resultante do cavaco obtido através deste mesmo processo, levando em conta a taxa de remoção de material, a fim de propor melhoras de morfologia do material removido que resultem em boa produtividade. Otimizar desta forma o processo de torneamento pesado na empresa juntamente com o intuito de trazer mais conhecimento sobre o assunto a público, uma vez que no dia a dia das empresas muito é feito de forma equivocada, seja em termos de variáveis utilizadas ou em termos de ferramentas e métodos utilizados.

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Verificar o processo de torneamento pesado de eixos de geradores e turbinas em empresas familiarizadas com a modalidade;
- Coletar amostras de cavaco resultantes do processo de torneamento de eixos fabricados em aço ABNT 1045;
- Verificar as diversas variáveis de corte e ferramentas utilizadas na operação;
- Analisar a morfologia dos cavacos provenientes deste processo;
- Inter-relacionar a morfologia dos cavacos provenientes do processo com as variáveis de corte;
- Simular condições de usinagem e aperfeiçoá-las;
- Aplicar melhores condições simuladas à empresa;
- Sugerir melhorias de processo a partir dos resultados obtidos.

## 1.3 JUSTIFICATIVAS

A ideia para o trabalho teve início com visitas técnicas durante as matérias de usinagem e usinagem CNC do curso de graduação em engenharia mecânica da UTFPR à empresas que realizam o torneamento completo de eixos para turbinas e geradores utilizados em pequenas centrais hidrelétricas, durante as quais foram observadas oportunidades de melhoria e otimização. Este trabalho se justifica por conta da pouca literatura presente sobre a maneira como ocorre a usinagem extra pesada, no que diz respeito às práticas que ocorrem na realidade da indústria (ainda que não seja difícil chegar à conclusão de que cada empresa que também atue no ramo do torneamento pesado possua um método de torneamento próprio). Nesta realidade que envolve o torneamento de eixos de maiores diâmetros, está envolvida frequentemente a utilização de variáveis não tão apropriadas para este procedimento, visando uma produtividade alta, mas sacrificando com isso as ferramentas utilizadas, ou por outro lado, utilizando em princípio ferramentas não ideais para os fins pretendidos.

Tendo em mente que a morfologia do cavaco tem impacto de maneira direta no custo das operações de torneamento e de maneira indireta através do impacto causado na vida útil dos insertos, o presente estudo pode fomentar não só outros estudos na mesma linha, tendo em vista que a usinagem e o torneamento como própria parte da primeira são campos vastos de pesquisa e que carecem delas, como também a mudança da forma como o processo é encarado e realizado, já que esta análise permite um diagnóstico preciso do processo de usinagem adotado, além de permitir melhorias significativas de tempo e recursos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 MANUFATURA E USINAGEM

Transformação de matéria prima em produtos acabados faz parte da engenharia mecânica uma vez que esta também tem, em algum ponto, como um de seus objetivos a criação de máquinas e seus componentes. Além disso, pode ser interpretada segundo Machado et al. (2009) como o processo de transformação de matérias-primas em produtos acabados, seguindo planos bem organizados em todos os aspectos. Através dela, se produz desde a peça mais simples até peças muito complexas ou até mesmo milhares de peças, no caso de máquinas como aviões e automóveis.

A usinagem dos materiais é uma das modalidades de fabricação e de acabamento mais utilizadas atualmente, sendo o termo usinagem a descrição de um grupo de processos que consiste na remoção de material e modificação das superfícies de uma peça após a sua fabricação, que por sua vez pode se dar por meio de outras técnicas (KALPAKJIAN, 2000). Nos dias de hoje, a usinagem é uma parte industrial importante na maioria dos países desenvolvidos e sua importância se mostra abrangente, tendo em vista que quase todos os metais e ligas são usinados – duros ou macios, fundidos ou forjados, dúcteis ou frágeis, de alto ou baixo ponto de fusão (TRENT; WRIGHT, 2000).

Ainda observando o processo de usinagem pela ótica econômica, as operações de usinagem somam em torno de 15% do valor total dos produtos manufaturados. Nos Estados Unidos, o montante dos custos com usinagem chegam a valores da ordem de US\$ 300 bilhões todos os anos (TRENT; WRIGHT, 2000).

Quanto à importância da usinagem no que diz respeito ao desenvolvimento dos materiais, que é uma das áreas mais importantes na atualidade, tendo em mente que a busca de novos materiais acompanha o desenvolvimento das diversas áreas da tecnologia, aços especiais, segundo Saldarriaga (2008), têm sido desenvolvidos para melhorar as condições de usinabilidade. Isto demonstra que também a manufatura através da usinagem influencia diretamente a procura de novos materiais.

### 2.2 TORNEAMENTO MECÂNICO

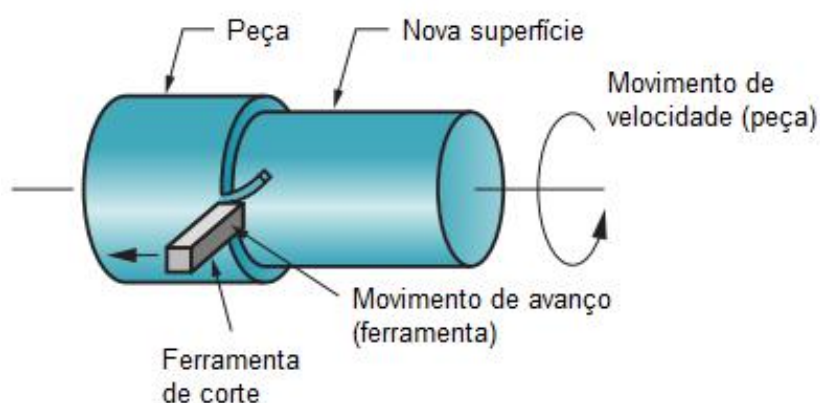
Dentre as mais diversas formas de usar um material, talvez uma das mais conhecidas seja o torneamento mecânico. O torno em si não é uma invenção tão nova, tendo em sua história até mesmo contribuições feitas pelo inventor Leonardo Da Vinci (1452-1519) no final do século XV. Este torno era constituído de um pedal e da roda que mantinha o movimento inercial (CIMM, 2015).

Com o advento da invenção da máquina a vapor por James Watt em um período marcado pela criação de empresas totalmente voltadas a produção de máquinas-ferramenta, o

inglês Henry Maudslay (1771-1831) aperfeiçoou o torno mecânico.

Nesta operação, a qual também se encontra na literatura portando o nome corte semi-ortogonal, a peça é presa em um torno através da castanha e é rotacionada. A ferramenta, também denominada inserto, é disposta rigidamente em um suporte e se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (FERRARESI, 1977). O princípio básico do funcionamento do torno mecânico é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema torneamento mecânico



Fonte: Adaptado de Groover (2010)

### 2.2.1 Condições e grandezas de corte no torneamento

Algumas grandezas de corte são listadas na literatura e têm influência direta tanto sobre o resultado superficial de desbaste e acabamento, quanto no desgaste e conseqüentemente vida útil da ferramenta. Pode-se observar a importância do controle das diversas variáveis envolvidas no processo de usinagem, já que praticamente todas têm influência no custo final do processo e do produto.

O movimento lateral da ferramenta enquanto a peça se move é chamado avanço ( $f$ ) (GROOVER, 2010). De acordo com o mesmo autor, a profundidade de corte ( $a_p$ ), também representada pela letra “d” na literatura americana, significa a penetração da ferramenta de corte abaixo da superfície original de trabalho, ou seja, a superfície antes do contato com a ferramenta de corte.

A velocidade de corte ( $v_c$ ) é definida por Ronald e Cormier (2006) como a velocidade da peça em relação à ponta da ferramenta estacionária no ponto de corte da superfície. Pode ser encontrada através da Equação (1).

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

Onde:

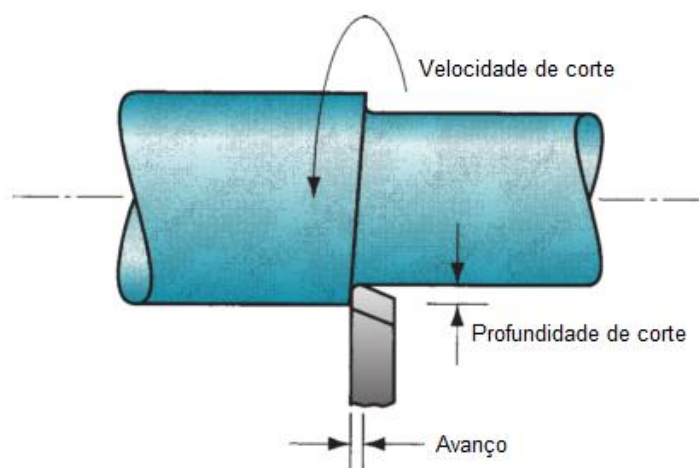
$v_c$  = velocidade de corte [m/min]

$d$  = diâmetro da peça [mm]

$n$  = revoluções da peça [rpm]

Os parâmetros de velocidade de corte, profundidade de corte e avanço podem ser vistos na representação a seguir (Figura 2):

Figura 2 – Condições e grandezas de corte



Fonte: Adaptado de Groover (2010)

Velocidade de avanço ( $v_f$ ) é definida por Machado et al. (2009) como “velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do avanço”. Pode ser encontrada através da Equação (2).

$$v_f = f.n \quad (2)$$

Onde:

$v_f$  = velocidade de avanço [mm/min]

$f$  = avanço [mm/revolução]

$n$  = revoluções da peça [rpm]

Citada finalmente por Machado et al. (2009) como principal preocupação na etapa de desbaste, principalmente porque em outras palavras descreve a produtividade desta etapa e ainda por Groover (2010), como o produto dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, a taxa de remoção de material (TRM) é descrita como:

$$Q = v_c.f.a_p \quad (3)$$

Definidos como:

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

$v_c$  = velocidade de corte [mm/min]

$f$  = avanço [mm/revolução]

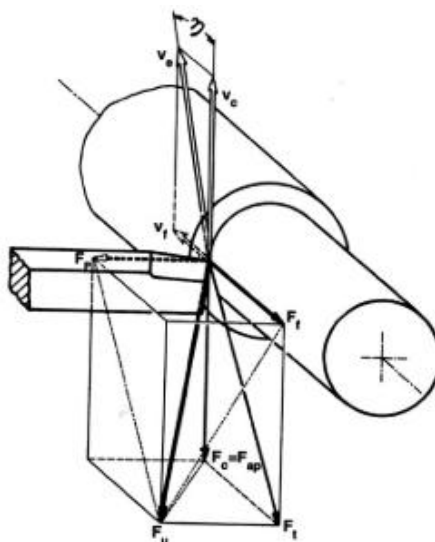
$a_p$  = profundidade de corte [mm]

Descrita por Trent e Wright (2000), a alta taxa de remoção de material implica no aumento de temperatura nas ferramentas e estas tendem a colapsar após um intervalo de tempo bem pequeno, sob a influência de temperatura e *strss*. Portanto pode-se dizer que a taxa de remoção de material é um fator limitante da vida útil das ferramentas utilizadas nas etapas de desbaste.

Pelo lado econômico do processo pode-se ainda atentar à força de usinagem ( $F_u$ ), que segundo Machado et al. (2009), tem relação com o desgaste das ferramentas de corte, podendo então ser ligada ao termo “usinabilidade”. Esta força pode ser decomposta no âmbito tridimensional em relação com o plano de trabalho em três componentes principais, conforme a Figura 3 representada abaixo:

- Força principal de corte ( $F_p$ ): projeção da força de usinagem sobre este plano, na direção de corte, dada pela velocidade de corte;
- Força de avanço ( $F_f$ ): projeção da força de usinagem sobre o plano, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço;
- Força passiva ( $F_{pa}$ ): projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

Figura 3 – Força de usinagem e suas componentes no torneamento



Fonte: Ferraresi (1977)

### 2.3 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO

Como material resultante dos processos de usinagem e por consequência do torneamento, está o cavaco, que corresponde à aproximadamente 10% de toda a produção de metais (TRENT; WRIGHT, 2000). Além de ser basicamente um pré-requisito para que uma operação seja caracterizada como usinagem, como anteriormente explicado, a formação do cavaco contribui, segundo Machado et al. (2009), para o aperfeiçoamento das arestas de corte, que podem conter um ressalto chamado de quebra-cavaco, cujo nome explica sua função.

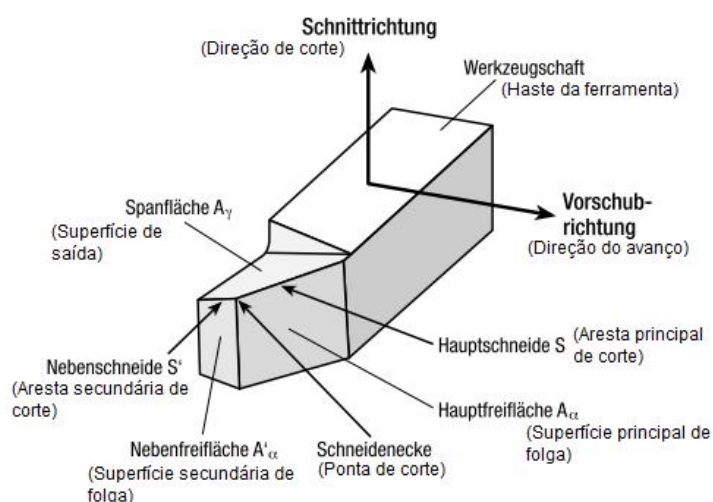
Ainda segundo Machado et al. (2009), os cavacos trazem benefício ainda no que diz respeito à criação de novos materiais para as ferramentas ou insertos, possibilitando a usinagem de novos materiais.

O entendimento de como os cavacos se formam é o primeiro passo para um bom controle deste, já que a falta deste controle muitas vezes resulta em uma superfície de acabamento grosseiro, além de diminuir a precisão da máquina e problemas de remoção do cavaco da zona de usinagem (ASTAKHOV; SHVETS; OSMAN, 1997).

No processo de formação de cavaco, a aresta de corte da ferramenta penetra no material, deformando elasticamente e plasticamente o material. A formação do cavaco acontece depois que a tensão de cisalhamento máxima do material é excedida no plano de cisalhamento (KLOCKE; GERSCHWILER, 2008). Tendo este procedimento como a principal causa da formação do cavaco, não simplesmente de forma a ignorar as diferentes etapas descritas no processo completo, todavia como fato, ainda é descrito, mesmo que de forma breve, um outro motivo que colabora com esta formação. O autor Machado et al. (2009) cita no seu livro “Teoria da Usinagem dos Materiais” sobre a existência de um estado de tensões que combina tensões de compressão e tensões de tração com as tensões de cisalhamento pré-existentes que leva o material à ruptura, sendo este critério próprio da natureza do material, subdividido pelo autor em dúctil ou frágil.

Ao longo do tempo, foram fixadas nomenclaturas para superfícies e arestas de uma ferramenta de corte, para certa universalização da prática da usinagem, que no torneamento podem ser representados na Figura 4.

Figura 4 – Superfícies e Arestas da Ferramenta de Corte



Fonte: Adaptado de Klocke e Gerschwiler (2008), conforme DIN 6581 e DIN 6582

O conhecimento da nomenclatura de arestas, superfícies, pontas, assim como o entendimento sobre os ângulos que estão presentes na prática são cruciais para a elaboração de qualquer estudo na área, já que todas estas nomenclaturas estão intimamente ligadas aos



resultados, direta ou indiretamente. Na Figura 4 se encontra uma ferramenta convencional e embora a divisão entre suporte e inserto exista, a mesma não está representada.

Muito embora ocorra na literatura a representação de imagens semelhantes, tem-se representados na figura de acordo com Klocke e Gerschwiler (2008) e Machado et al. (2009), nas respectivas direção de corte (Schnittrichtung) e direção de avanço (Vorschubrichtung). Podem ser definidas da imagem, segundo o segundo autor:

- Hauptschneide ou aresta principal de corte (S) é a aresta cuja cunha de corte, para um ângulo da direção de avanço de  $90^\circ$ , indica a direção de avanço;
- Hauptfreifläche ou superfície principal de folga ( $A_\alpha$ ) e Nebenfrefläche ou superfície secundária de folga ( $A'_\alpha$ ) são denominadas as superfícies que determinam a folga entre a ferramenta e a superfície a ser usinada;
- Nebenschneide ou aresta secundária de corte (S') é a aresta cuja cunha de corte, para um ângulo da direção de avanço de  $90^\circ$ , indica a direção contrária à direção de avanço;
- Schneidenecke ou ponta de corte é a interseção das arestas principal e secundária de corte;
- Por Spanfläche ou superfície de saída ( $A_\gamma$ ) se denomina a superfície pela qual o cavaco se move assim que separado do material pela combinação de forças cisalhantes e tensões de compressão/tração.

As diferentes superfícies e planos envolvidos na formação do cavaco podem ser representados na Figura 5. Na área número 1 desta figura se tem o plano de cisalhamento, chamado em sua fronteira de zona de cisalhamento primária, que é o local onde se concentra preferencialmente a ruptura. Existe ainda a zona de cisalhamento secundária, caracterizada pelo número 2 na Figura 5 que fica na superfície de saída da ferramenta, ou seja, por onde o cavaco sairá durante o processo.

A subdivisão da maneira como o cavaco é formado foi descrita em quatro etapas por Machado et al. (2009):

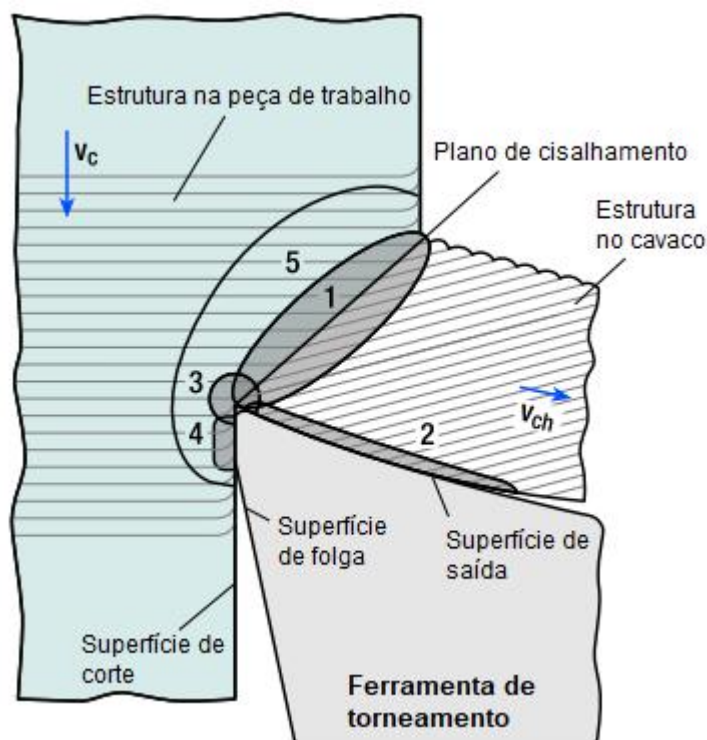
Primeira etapa: a cunha penetra no material da peça, fazendo com que uma pequena porção do material seja pressionado contra a superfície de saída da ferramenta.

Segunda etapa: citada já anteriormente, aqui ocorre a deformação elástica do material seguida pela deformação plástica, que se acumula até que ocorra o rompimento do material. Combina as tensões de cisalhamento com tensões de compressão e tração.

Terceira etapa: denominada por Machado et al. (2009) como “deslizamento das lamelas”, ocorre com a contínua penetração da ferramenta na peça, implicando em ruptura do cavaco, que pode ou não ser completa.

Quarta etapa: marcada pela saída do cavaco, o material escorrega e se rompe, devido ao movimento relativo entre ferramenta e peça. Após este evento, todo o processo se inicia novamente, começando pelo plano de cisalhamento primário.

Figura 5 – Superfícies e planos envolvidos na formação do cavaco

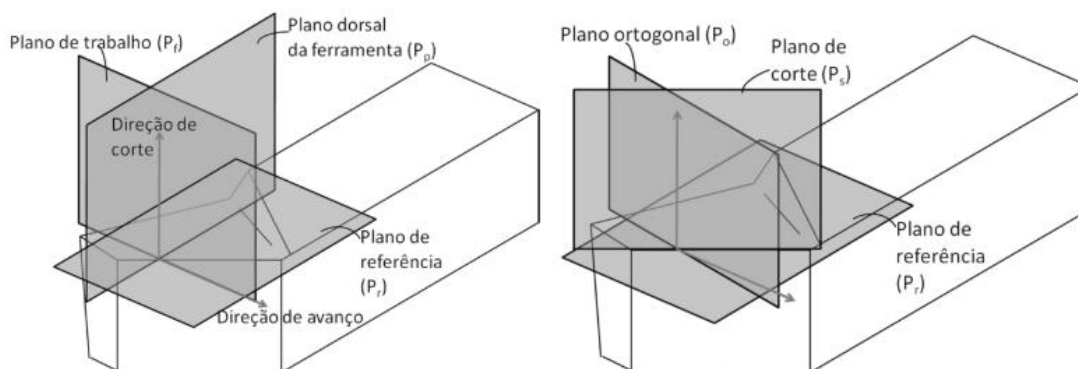


Fonte: Adaptado de Klocke e Gerschwiler (2008)

## 2.4 PLANOS E ÂNGULOS DA CUNHA CORTANTE E INFLUÊNCIA NA FORMAÇÃO DOS CAVACOS

Para que a caracterização dos ângulos da ferramenta no torneamento possa ocorrer, é relevante que os planos nos quais estes ângulos são apresentados sejam apresentados. De acordo com Bruno e Pereira (2011), a representação pode ser feita de acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Planos de referência da ferramenta



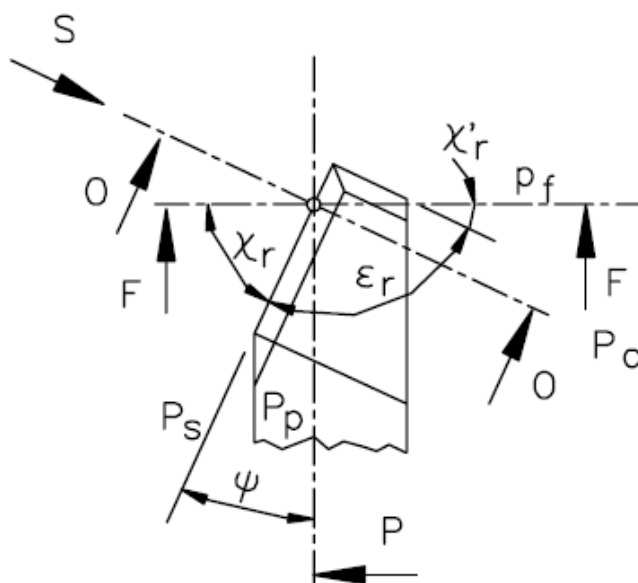
Fonte: Bruno e Pereira (2011)

Os ângulos relacionados com a ferramenta serão representados no presente trabalho a partir de dois planos: plano de referência ( $P_r$ ) e o plano de trabalho ( $P_f$ ). Estes são para a

ferramenta disposta no plano de referência (Figura 7): ângulo de posição da ferramenta  $\chi_r$ ; ângulo de ponta da ferramenta  $\epsilon_r$ ; ângulo de posição da ferramenta secundário  $\chi'_r$ . Todos dados em graus ( $^\circ$ ).

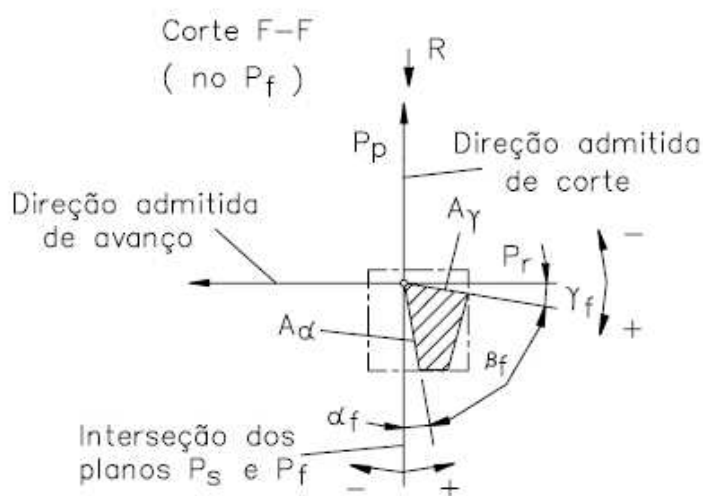
Quando a ferramenta é disposta no  $P_f$ , por sua vez (Figura 8), tem-se: ângulo de folga da ferramenta  $\alpha_f$ ; ângulo de cunha da ferramenta  $\beta_f$ ; ângulo de saída da ferramenta  $\gamma_f$ .

Figura 7 – Ângulos para ferramenta no  $P_r$



Fonte: ISO NBR 3002-1 (2013)

Figura 8 – Ângulos para ferramenta no  $P_f$

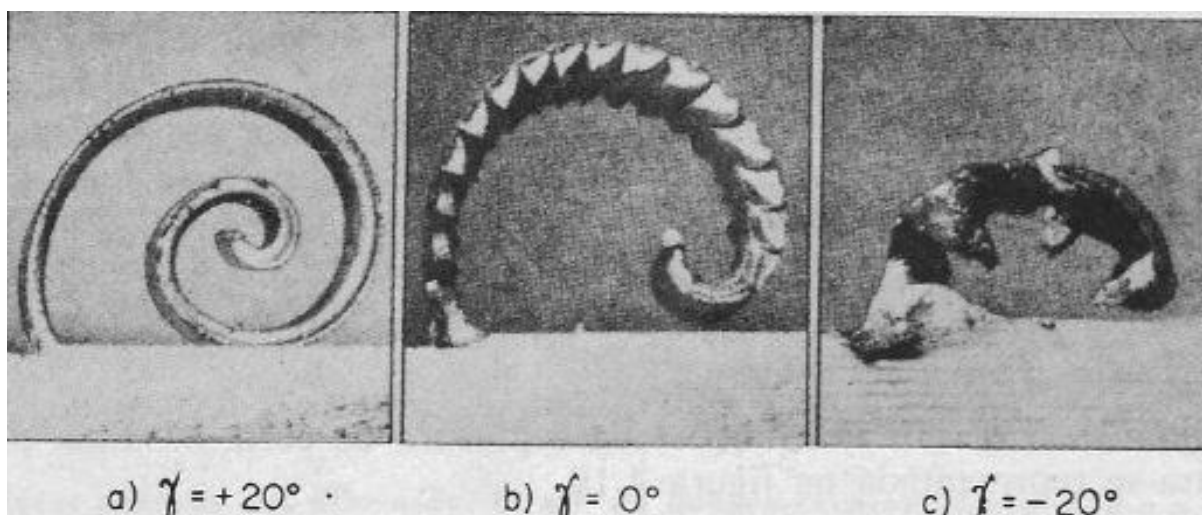


Fonte: Bruno e Pereira (2011)

Listados por Machado et al. (2009) como possuindo relação com a formação dos cavacos estão os ângulos:

- $\chi_r$ : influi na direção de saída do cavaco;
- $\gamma_f$ : quanto maior este ângulo, menores serão o trabalho de dobramento e o encruamento do material do cavaco. Vieregge (1959) demonstra a relação entre ângulo de saída e a morfologia do cavaco, conforme Figura 9.

Figura 9 – Influência do ângulo de saída na morfologia do cavaco



Fonte: Vieregge (1959)

## 2.5 DIFERENTES MORFOLOGIAS DE CAVACO

No presente estudo, as diferentes morfologias de cavaco estão caracterizadas como nova seção do tópico 2. Ainda que estas morfologias estejam sendo analisadas a partir do entendimento de que estas são consequência das variáveis presentes no mecanismo de formação do cavaco, serão caracterizadas em subseção as diferentes formas do cavaco.

Segundo Machado et al. (2009), entre os fatores que estão relacionados com a usinagem, os fatores que influenciam nas diferentes morfologias podem ser definidos já mesmo no estágio de deslizamento de lamelas, sendo estes fatores: as propriedades do material e as condições de avanço e de velocidade de corte. Estes irão determinar quanto o segmento do material rompido permanecerá unido ao cavaco que acabara de ser formado. Isto dá origem aos cavacos de tipo contínuo ou descontínuo. Os diversos tipos de cavacos que podem ser formados estão representados na Figura 10.

Nos ferros fundidos, por exemplo, tidos como um material frágil, é sabido que os cavacos são sempre fragmentados, enquanto que nos materiais mais dúcteis eles podem ser produzidos como segmentos, particularmente a pequenas velocidades de corte. O cavaco descontínuo, que é uma das principais classes de cavaco, tem a vantagem prática de ser facilmente removido da área de corte (MACHADO; SILVA, 2004).

Do outro lado se tem os cavacos contínuos, que podem assumir as mais diversas formas. Por terem uma força considerável, o controle da forma deste tipo de cavaco é encarado como

problema por alguns operadores (TRENT; WRIGHT, 2000). (FERRARESI, 1977) descreve os “cavacos de cisalhamento”, que seriam constituídos de grupos lamelares distintos e justapostos. Estes cavacos teriam sido cisalhados e em sequência parcialmente soldados. Em 2009 são citados por Machado et. al com a nomenclatura de “cavacos parcialmente segmentados”.

Além dos já citados cavaco descontínuo, contínuo e o de cisalhamento, existe ainda uma outra variante denominada cavaco segmentado, que é formado principalmente durante a usinagem de materiais com propriedades térmicas pobres, ou seja, com baixa condutividade térmica, que é o caso do titânio e suas ligas. Os cavacos denominados “dente de serra” se formam inicialmente com o surgimento de tensões cisalhantes em um plano de cisalhamento particular causadas pelo excesso desta tensão, que ultrapassa o valor da tensão de escoamento do material que está sendo usinado (MACHADO et al., 2009). Dada a baixa condutividade térmica do material, este começa a amolecer. Até este ponto, a formação do cavaco segmentado pode ser comparada à formação do cavaco contínuo (MACHADO et al., 2009), conforme Cook (1954); Shaw, (1954). Ainda segundo a ótica de Machado et al. (2009), com a continuação desta deformação o plano de cisalhamento é rotacionado, provocando afastamento deste da ponta da ferramenta e começa a se “movimentar sobre a superfície de saída”. A rotação ocorre até que a força provocada por esta mesma rotação exceda a força necessária para o rompimento de um material a uma temperatura inferior. Uma vez cíclico, este processo culmina com a formação de cavacos em formato de dentes de serra.

Figura 10 – Os diversos tipos de cavaco

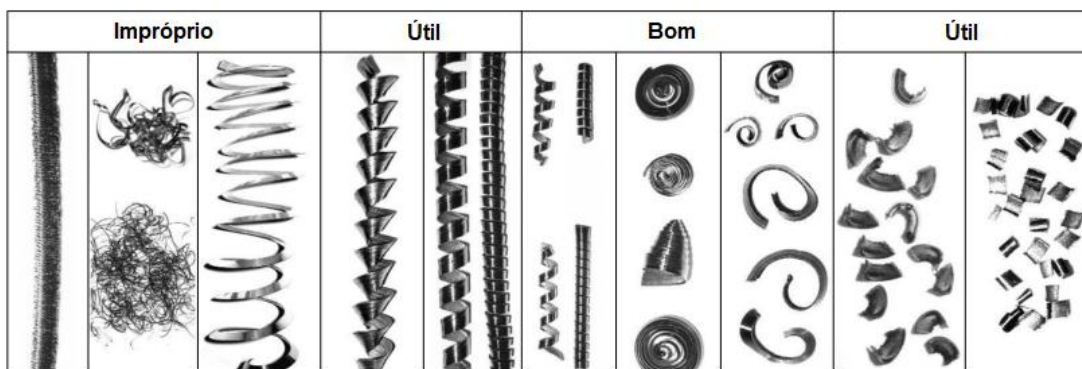


Fonte: Trent e Wright (2000)

Um dado de interesse é também o de que os tipos contínuo, descontínuo, parcialmente

segmentado e segmentado de cavaco ainda são alocados em quatro categorias de acordo com sua utilidade, por Klocke e Gerschwiler (2008). Esta classificação se dá por: impróprio ou indesejável, útil e bom. A classificação pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Classificação dos tipos de cavaco de acordo com utilidade



Fonte: Adaptado de Klocke e Gerschwiler (2008)

### 2.5.1 Formas assumidas pelo cavaco

Além da classificação por tipo, existe a classificação por forma, através da qual o cavaco pode ser diferenciado, segundo Ferraresi (1977), em quatro formas: em fita, helicoidal, espiral e cavaco em lascas ou pedaços. Em ordem decrescente de influência na forma dos cavacos estão o avanço e a profundidade de corte (MACHADO et al., 2009), ainda que todas as outras variáveis de corte, além, obviamente, da característica do material, possam alterar a forma dos cavacos.

A norma ISO 3685 (1993) (Figura 12) demonstra de maneira mais detalhada a classificação dos cavacos por forma.

Figura 12 – Classificação das formas de cavaco

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- Salto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Fonte: ISO 3685 (1993)

O tipo mais prejudicial de cavaco tanto para a operação, quanto para o operador, é o cavaco em fita. Por ser um tipo contínuo e ocupar muito espaço tanto na sua formação, quanto no descarte ou armazenamento, este cavaco diminui o lucro da operação e pode provocar acidentes, uma vez que devido ao seu tamanho ele pode ficar se enrolando na peça, com isto podendo se desprender em direção ao operador. Também pode prejudicar a superfície da peça usinada, riscando-a mais uma vez por ter ficado preso à superfície da peça e ferramenta.

### 2.5.2 Influência da temperatura na coloração dos cavacos

Altas temperaturas podem, segundo Machado et al. (2009) influenciar na quebra do cavaco, já que deixam os cavacos mais dúcteis e difíceis de serem quebrados. A coloração dos cavacos pode ser uma evidência dos óxidos formados.

Segundo Moura (2012) conforme Luong e Heijkoop (1981), a magnetita, formada em temperaturas entre 200°C e 570°C confere ao cavaco coloração preta/acinzentada, tendendo para o azul. Já a wustita (FeO), se forma em temperaturas acima de 570°C, com coloração cinza-verde-marrom.

## 2.6 FERRAMENTAS DE CORTE

Partindo do princípio de que a usinagem se trata de uma operação de remoção de material através da utilização de uma ferramenta mais dura que a peça a ser trabalhada, é de conclusão óbvia que os materiais utilizados para a confecção dos insertos também foram sendo aperfeiçoados ao longo do tempo.

Historicamente as primeiras ferramentas de corte foram confeccionadas em aço carbono. A adição de elementos como o "wolfrâmio"(tungstênio) a estes materiais fez com que estas ferramentas de corte fossem gradativamente melhoradas.

Figurando atualmente entre um dos principais materiais estão os aços rápidos. Trata-se de aços carbono com adição de elementos de liga diversos (tungstênio, molibdênio, vanádio, entre outros) e tratados termicamente. Embora tenham sido os responsáveis pelo primeiro grande impacto na produção deste tipo de ferramenta, o cenário atual dispõe de materiais melhores e mais resistentes que os HSS ("High Speed Steel") (MACHADO et al., 2009).

Um exemplo são as amplamente utilizadas ferramentas de metal duro (carboneto de tungstênio + cobalto combinados com outros carbonetos como TiC, TaC e/ou NbC (MACHADO et al., 2009), responsáveis pelo segundo grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte por possibilitarem maiores velocidades de corte.

Outros exemplos de materiais são os cermets, as cerâmicas e os materiais ultraduros.

### 2.6.1 Classificação dos metais duros

De acordo com a ISO NBR 513 (2004), as principais classes de ferramentas de metal duro podem ser classificadas de acordo com uma letra de identificação, cor de identificação e

materiais apropriados para usinagem. O Quadro 1, representado abaixo, traz estas informações.

Quadro 1 – Classificação dos metais duros

Principais classes		
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica
M	Amarelo	Aço inoxidável: Aço inoxidável austenítico, aço duplex e aço fundido
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados

Fonte: ISO NBR 513 (2004)

### 2.6.2 Geometria da ferramenta

O formato do inserto, ou sua geometria, é definido de acordo com diversos critérios, como por exemplo a geometria da peça a ser usinada, suas tolerâncias, seu material e a qualidade superficial desejada (STOETERAU, 2003). Um maior raio de ponta de um inserto, como demonstrado na proporção, proporciona uma maior resistência mecânica do mesmo. De forma inversa, um maior raio de ponta traz mais vibrações e um menor raio de ponta torna o inserto mais sensível aos efeitos térmicos (SANDVIK, 2017).

Figura 13 – Resistência mecânica e tendência a vibração de um inserto de acordo com sua geometria



Fonte: SANDVIK (2017)



## 2.7 FLUIDOS DE CORTE - CLASSIFICAÇÃO E MÉTODOS DE APLICAÇÃO

Dada a possibilidade de utilização de fluidos de corte nestas operações, os mesmos serão citados no tópico atual para fins de entendimento, sendo tratados de forma resumida.

Para Groover (2010), um fluido de corte é qualquer líquido aplicado durante a operação de usinagem com fins de melhorá-la. Uma definição simples, que muito tem ligação com as finalidades da utilização de um fluido de corte. É importante salientar que a escolha correta deste fluido é que trará os benefícios procurados. Entre estes benefícios, estão (TRENT; WRIGHT, 2000):

- Prevenir que a ferramenta, peça de trabalho e máquina sobreaqueçam e tenham distorções;
- Aumentar a vida da ferramenta;
- Melhorar o acabamento superficial;
- Auxiliar na remoção dos cavacos da área de corte.

Adicionais à estas, outros benefícios a serem citados de acordo com Machado et al. (2009):

- Proteger a máquina-ferramenta e peça contra oxidação;
- Lubrificação a baixas velocidades de corte;
- Refrigeração a altas velocidades de corte.

### 2.7.1 Classificação dos fluidos de corte

Quanto à classificação segundo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013), os fluidos de corte podem ser divididos em seguintes em três categorias principais. Na primeira categoria, o próprio ar é classificado como um possível fluido de corte, pois segundo o autor auxilia na remoção de cavaco da região de corte.

Na segunda categoria estão os de tipo aquoso, que consistem em:

- Água: utilizada majoritariamente com fins de refrigeração, ainda que possua a desvantagem de promover a oxidação de materiais ferrosos;
- Emulsões: consistem em emulsões de óleo em água (água com partículas de óleo em seu interior). Os emulsificantes são substâncias cuja função é reduzir a tensão superficial da água, facilitando a dispersão do óleo Segundo Machado et al. (2009), os fluidos semissintéticos também são formadores de emulsões e se caracterizam por apresentarem em sua composição entre 5% e 50% de óleo mineral no fluido concentrado.

Na terceira categoria estão os óleos, subdivididos em:

- Óleos de origem animal e vegetal (graxos): pouco empregados devido ao alto custo e rápida deterioração;
- Óleos minerais: utilizados quando puros na usinagem de aços baixo carbono;
- Óleos compostos: misturas de óleos minerais e graxos;
- Óleos de extrema pressão: possuem em sua composição elementos que fazem com que suportem elevadas temperaturas sem vaporizar. Geralmente utilizados em materiais que

geram elevadas forças de corte.

Os fluidos de corte sintéticos, denominados por Machado et al. (2009) como soluções, são isentos de óleo mineral. Por terem a capacidade de se dissolver completamente na água, não necessitam a adição de emulsificantes e têm um benefício maior em termos de vida útil, por serem menos propensos a ataques bacterianos.

Além de terem suas propriedades diferenciadas, os fluidos de corte precisam ser antiespumantes, para fins de não comprometimento da visibilidade do operador no momento da operação; devem também ser anticorrosivos, possibilitando uma proteção extra à peça; além de uma série de outras características citadas na literatura como essenciais a estes fluidos. Para garantir que os fluidos de corte tenham estas propriedades essenciais, são acrescentados a eles os aditivos, sendo os principais os antiespumantes; anticorrosivos; detergentes (reduzir deposição de iodios, lamas e borras); emulsificantes; surfactantes (garantir uniformidade das emulsões); biocidas (inibir desenvolvimento de micro-organismos) e aditivos de extrema pressão.

### 2.7.2 Direção e métodos de aplicação

Tendo conhecimento das principais classificações dos fluidos de corte, é relevante também trazer a conhecimento os principais métodos de aplicação dos mesmos encontrados na literatura sobre o assunto.

Embora não haja um consenso de qual a melhor direção de aplicação do fluido de corte, existem três direções que são normalmente utilizadas: a direção sobre cavaco, representado na Figura 14 pela direção "A". A direção "B" traz certa desvantagem no sentido de aplicação contrário ao do movimento do cavaco, podendo ser utilizada quando houver altas pressões. Por fim, a direção "C" traz o benefício de atingir diretamente a interface ferramenta/peça, reduzindo desgaste no flanco e melhorando a qualidade superficial da peça (MACHADO; SILVA, 2004).

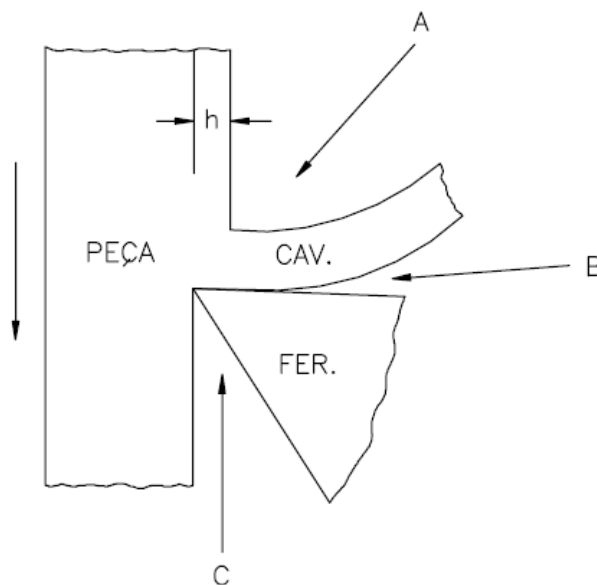
Existem basicamente três maneiras de se aplicar os fluidos de corte:

- (a) Jorro de fluido a baixa pressão;
- (b) Atomização (MQF);
- (c) Sistema à alta pressão.

Pela sua simplicidade, o primeiro método é o mais utilizado. O segundo método tem vantagens sobre o primeiro por conta do seu maior poder de penetração e velocidade do fluido. O terceiro, apesar de relatados bons resultados com sua utilização, é mais engenhoso e exige equipamento mais complexo (MACHADO et al., 2009).

Com a crescente preocupação em termos ambientais, vem crescendo a técnica de atomização ou MQF – mínima quantidade de fluido. De acordo com Junior (2013), o princípio básico de funcionamento deste sistema consiste no arrastamento de uma pequena quantidade de lubrificante por uma corrente de ar comprimido que é dirigido sobre a zona de corte. Como as máquinas devem ser construídas de maneira a permitir o fácil escoamento dos cavacos, este método se apresenta por vezes inconveniente, uma vez que os cavacos são projetados em todas

Figura 14 – Possíveis direções de aplicação do fluido de corte



Fonte: Machado e Silva (2004)

as direções, em vez de serem arrastados, no caso do jorro.

Para Fernandes (2007), conforme citado por Heisel et al. (1998), a crescente utilização deste método é demonstrada fortemente pelo ponto de vista da economia de fluido: enquanto métodos convencionais chegam a utilizar 45-50 litros de fluido por minuto, neste, a vazão máxima de óleo não passa dos 100 mililitros por hora, sendo reduzida em torno de 27.000 vezes.

## 2.8 AÇO ABNT 1045 - Justificativa de escolha

Empregado na operação de torneamento dos eixos dos geradores para as PCH's em questão, o aço ABNT 1045 tem característica de ser um aço médio carbono por ter 0,45%p C. Os aços médio carbono são aços cuja composição envolve majoritariamente os elementos Ferro e Carbono, com percentual de carbono entre 0,25% a 0,6%, de acordo com Callister e Rethwisch (2009). As ligas com médio teor de carbono podem ser tratadas termicamente por austenitização, têmpera e então revenimento para a melhora de suas propriedades mecânicas. Apesar disso, os aços-carbono comuns com teor médio de carbono têm baixa temperabilidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2009) Na Tabela 1 representada abaixo, pode-se identificar a composição química e propriedades do aço AISI/ABNT 1045.

A partir disso, os eixos forjados, tratados e pré-usinados podem ser classificados conforme a Tabela 2, que traz as informações que dizem respeito à composição química destes eixos por elemento presente. É importante salientar que esta tabela é a tabela real do fornecedor destes eixos para a empresa onde a operação de torneamento foi realizada.

Simulações feitas por Gautam (2013) no software Ansys relacionaram os carregamentos

Tabela 1 – Composição e propriedades do aço AISI/ABNT 1045.

Composição Química	
Elemento	Quantidade
Carbono, C	0,420%-0,50%
Ferro, Fe	98,51%-98,98%
Manganês, Mn	0,6-0,9%
Fósforo, P	≤ 0,04%
Enxofre, S	≤ 0,05%
Propriedades Mecânicas	
Densidade	7,87g/cm <sup>3</sup>
Resistência à Tração	565 MPa
Dureza Brinell	170-210 HB
Tensão de Escoamento	310 MPa
Módulo de Elasticidade	200 GPa

Fonte: AZoM (2012)

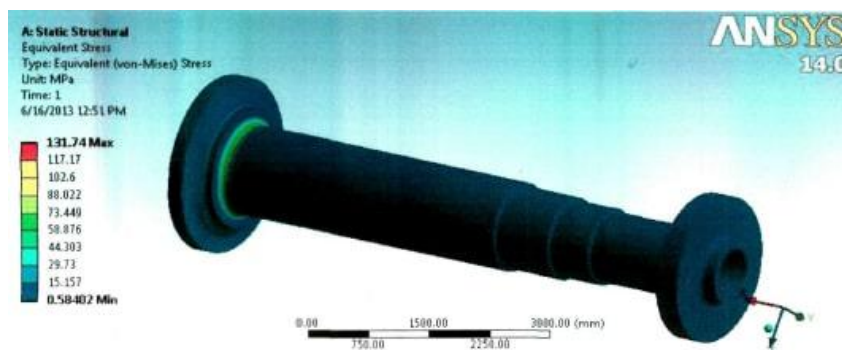
Tabela 2 – Composição química dos eixos para gerador usinados.

Eixo	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	H	Ti	Cu
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	PPM	%	%
1	0,452	0,724	0,239	0,009	0,012	0,058	0,037	0,013	0,037	0	1,9	0,001	0,029
2	0,452	0,724	0,239	0,009	0,012	0,058	0,037	0,013	0,037	0	1,9	0,001	0,029
3	0,492	0,848	0,285	0,019	0,019	0,197	0,095	0,026	0,036	0,005	2,35	0,002	0,146

Fonte: Aço Forja (2016)

sofridos por um eixo de turbina modelo kaplan feito de aço AISI/ABNT 1040. O autor chega ao resultado de uma tensão de von Mises igual a 131,74 MPa (Figura 15), abaixo do valor da tensão de escoamento do material (310 MPa).

Figura 15 – Tensão de von Mises para um eixo de turbina kaplan em condição de carregamento real



Fonte: Gautam (2013)

## 2.9 PROCESSOS DE PRÉ-FABRICAÇÃO DOS EIXOS

Para a apresentação da natureza do material envolvido no presente trabalho, assim como os tratamentos térmicos envolvidos após o processo de fabricação do mesmo, os tópicos serão tratados na seção que diz respeito ao estado da arte sobre o assunto como um complemento. Para que haja um melhor entendimento dos resultados, é fundamental o conhecimento sobre o material que de fato está sofrendo processo de usinagem, pois dele provém os cavacos, objetos principais de estudo deste trabalho.

### 2.9.1 Forjamento

O processo de fabricação através do qual estes eixos para geradores para PCH's são fabricados, o forjamento, é o método de modelagem do metal mais antigo de todos e consiste no martelamento ou prensagem do metal.

De acordo com Chiaverini (1986), o martelamento se caracteriza por golpes rápidos e sucessivos no metal, deformando-o principalmente superficialmente, enquanto na prensagem a deformação resultante se dá de maneira mais profunda e regular.

Quanto à temperatura de forjamento, este processo possui duas ramificações (CHIAVERINI, 1986): forjamento a frio e forjamento a quente. No forjamento a quente, o procedimento ocorre acima da temperatura de recristalização do metal. Apesar deste procedimento ser o mais utilizado, o forjamento a "frio" é comum a alguns por trazer como consequência a formação de novas discordâncias ou até mesmo a multiplicação das já existentes, diminuindo a separação média entre elas e resultando na dificuldade de uma discordância justamente pela presença de outra (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). Com isto, a tensão necessária para a deformação de um metal tem acréscimo e a dureza e resistência de um material antes dúctil por consequência são aumentadas.

Dentre as possibilidades de forjamento no que diz respeito ao tipo de matriz que é utilizada, no forjamento em matriz aberta (*"Open-Die Forging"*) a peça deve ser rotacionada enquanto ocorre o processo. De acordo com Groover (2010), um exemplo de utilização desta técnica na indústria do aço é a modelagem de grandes lingotes fundidos para que adquiram seção transversal arredondada. O mesmo autor ainda salienta uma contribuição do forjamento a quente em matriz aberta, que é a criação de um fluxo de grão favorável assim como estrutura metalúrgica no metal.

Dados os benefícios da utilização do forjamento como possibilidade de parte da pré-fabricação de um eixo de gerador de grandes proporções, a realização do processo de forjamento em matriz aberta é oferecida por uma grande quantidade de fabricantes ao redor do mundo. A Figura 16 ilustra o processo realizado exatamente em matriz aberta.

O acabamento grosseiro gerado pelo forjamento exige a utilização de outros processos de finalização de superfície. Daí a necessidade da utilização do torneamento da peça para que a mesma adquira as dimensões especificadas em projeto.

Figura 16 – Eixo forjado em matriz aberta



Fonte: Simufact (2018)

## 2.9.2 Laminação

A laminação consiste em passar uma peça, normalmente uma chapa metálica, entre dois cilindros, que podem ter ranhuras, para conferir ao material final certa geometria. Segundo Callister e Rethwisch (2009), a laminação pode ser empregada para fabricação de formas circulares.

## 2.10 TRATAMENTOS TÉRMICOS EMPREGADOS NA PRÉ-FABRICAÇÃO

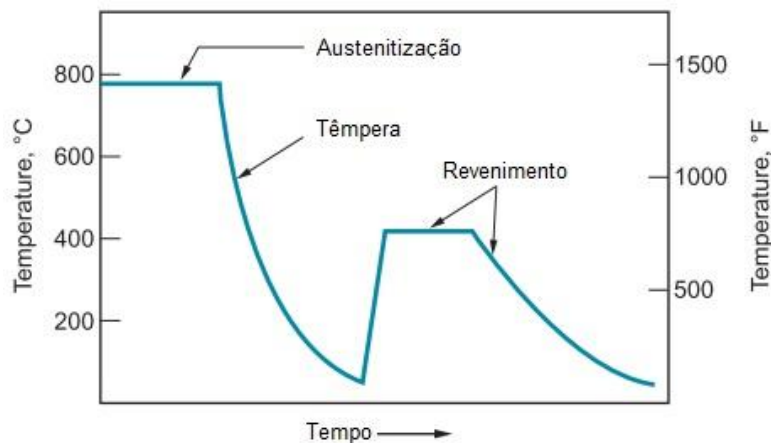
Após a constatação de que alguns dos eixos a serem estudados passam por algum ciclo de tratamento térmico, estes procedimentos serão abordados nesta subseção do estado da arte com o intuito de entendimento da consequência destes tratamentos no material.

### 2.10.1 Têmpera e revenimento

Após o processo de forjamento, por exemplo, o aço 1045 pode de acordo com o projeto, ganhar dureza e resistência mecânica. Entretanto a dureza, que normalmente traz consigo a fragilidade deve ser reduzida juntamente com as tensões causadas pelo tratamento de têmpera. O papel do revenimento é o de corrigir este excesso de dureza e fragilidade do material, para que seja aumentada sua resistência ao choque, bem como sua ductilidade. Sabe-se, segundo Machado et al. (2009), que em termos de usinagem de um material, o excesso de ductilidade acarreta em um acabamento superficial de menor qualidade, além da necessidade de utilização de maior potência. Este conflito também é caracterizado através de resultados obtidos por Corrêa et al. (2002), onde o autor ressalta que o aumento da dureza do material por meio do aumento do elemento carbono evidencia melhora no acabamento da superfície usinada.

O tratamento de revenimento de um metal pode ser verificado na Figura 17 e consiste no reaquecimento do metal a uma temperatura menor do que sua temperatura de austenitização.

Figura 17 – Têmpera e revenimento



Fonte: Adaptado de Groover (2010)

É importante salientar que na literatura em inglês, este reaquecimento é denominado “*tempering*” e isto demonstra que a têmpera e o revenido sempre estão associados, conforme descrito por Chiaverini (1986). O revenimento após o rápido resfriamento do metal e a consequente formação de martensita é descrita por Callister e Rethwisch (2009) de maneira que a formação de martensita revenida traz benefícios, já que pode ter dureza e resistência quase que equivalentes quando comparadas estas propriedades às da estrutura formada após resfriamento rápido, além de ter ductilidade e tenacidade aumentadas.

A influência da dureza do metal a ser usinado tem relação intrínseca com sua usinabilidade e também reflete na taxa de desgaste da ferramenta. No que diz respeito aos aços médio carbono, o aumento de dureza reflete no aumento de desgaste do flanco (CORRÊA et al., 2002).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que os objetivos propostos no início do trabalho sejam cumpridos, objetivos esses que circundam a análise inicial da formação do cavaco durante o processo de usinagem destes eixos a serem utilizados em geradores de pequenas centrais hidrelétricas, foram dispostos pela empresa, onde o trabalho de usinagem foi realizado, o espaço para a coleta de material e informações sobre as variáveis e ferramentas utilizadas. Possuir estas informações é crucial para a realização do trabalho, uma vez que elas revelarão os indícios da forma que esta operação está sendo conduzida, que impacta, como descrito anteriormente, na vida da ferramenta, acabamento superficial e consequentemente nos custos de todo o processo.

Adicionalmente foram feitos experimentos em laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná com tarugos de aço ABNT 1045 disponibilizados para a execução do trabalho. Um destes tarugos terá tratamento térmico, ciclo semelhante ao utilizado no tratamento térmico dos eixos utilizados na indústria responsável pelos eixo para turbina Kaplan.

Para que o entendimento destas etapas do presente trabalho seja facilitado: em materiais e métodos as ferramentas e amostras colhidas em campo (nas empresas) estão apresentadas ao longo da seção 3.1 completa. Já a seção 3.2 trata dos testes feitos em laboratório de variação de parâmetros e análise morfológica.

#### 3.1 MATERIAIS NO TORNEAMENTO DAS EMPRESAS E COLETAS

Averiguar a maneira como o procedimento está sendo feito e quais os materiais para estes fins foram utilizados é uma etapa sem a qual seria inviabilizada a produção deste trabalho. Serão listados nas próximas subseções os materiais reais empregados pelas empresas visitadas para a confecção – torneamento – dos eixos para os geradores.

##### 3.1.1 Insertos e suportes utilizados pelas empresas no desbaste dos eixos

Entre as várias opções de insertos para torneamento disponíveis no mercado, a empresa responsável pelo desbaste dos eixos para os geradores optou por utilizar nestes eixos os inserto modelos ISO TNMX 160404 L da marca WIDIA, representado na Figura 18, obtida através de visita à empresa, com as dimensões: aresta de corte  $L10 = 16,50$  mm, espessura  $S = 4,76$  mm, diâmetro de furo  $D1 = 3,81$  mm e raio de ponta  $R\epsilon = 0,4$  mm. Um esquema destas dimensões pode ser conferido na Figura 19. Esta pastilha de torneamento também é ótima quando se trabalha com aços carbono, por ter composição de metal duro (“carbide”) (WIDIA, 2017).

Embora sejam insertos relativamente simples, o custo benefício dos mesmos comparados aos de outras marcas foram os fatores decisivos para que fossem adquiridos. Estes insertos tem o formato “T”.

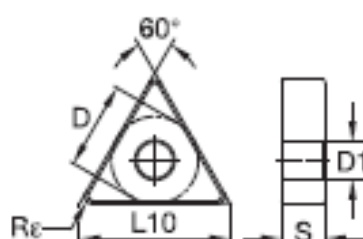


Figura 18 – Inseto Utilizado no Desbaste do Eixo para Gerador



Fonte: Autoria própria

Figura 19 – Dimensões do Inseto WIDIA TNMG 160404



Fonte: Autoria própria

Em alguns passos da operação são empregados suportes diretos (Figura 20) e em alguns, suportes esquerdos, porém todos da marca Big Tools, modelo MTJN 3232 P16, utilizados de acordo com as normas do fabricante.

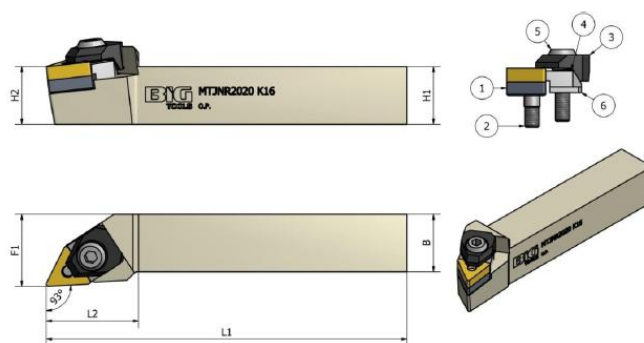
Figura 20 – Suporte Direito



Fonte: Autoria própria

Para um melhor conhecimento do suporte empregado, pode-se verificar com mais detalhes as especificações, conforme Figura 21. O mesmo possui comprimento total L1 de 170 mm, e características que fazem com que o inserto “T” utilizado fique com ângulo de posição principal de 93°, reduzindo ligeiramente a força de corte sofrida pelo inserto.

Figura 21 – Dimensões do Suporte



Fonte: Big Tools (2015)

As dimensões deste suporte estão relacionadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões do Suporte Big Tools 3232P16

Referência para Pedido	Referência do Inserto	Dimensões (mm)												
		H1	B	L1	L2	H2	F1	<sup>1</sup> Calço	<sup>2</sup> Pino do Calço	<sup>3</sup> Grampo de Fixação	<sup>4</sup> Mola	<sup>5</sup> Parafuso de Fixação	<sup>6</sup> Cunha	<sup>7</sup> Chave
MTJNR/L 2020K16	TN....1604..	20	20	125	40	20	25	CT16476	PI36185	GR002	MOL01	PS05.050.250	CN003	CHS25L/CHS40L
2525M16	TN....1604..	25	25	150	40	25	32	CT16476	PI36185	GR002	MOL01	PS05.050.250	CN003	CHS25L/CHS40L
3232P16	TN....1604..	32	32	170	40	32	40	CT16476	PI36185	GR002	MOL01	PS05.050.250	CN003	CHS25L/CHS40L

Fonte: Big Tools (2015)

Na outra empresa, onde foi performedo o desbaste de eixo para turbina, o inserto utilizado é da marca BFT Burzoni, modelo CNMG 190616 RS2 CCT35 com quebra cavacos, representado na Figura 22. O modelo é tipo romboidal 80°, mais indicado pelo fabricante para aços inoxidáveis.

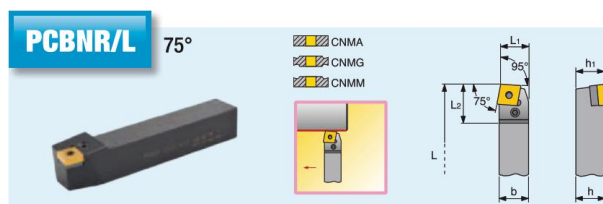
Figura 22 – Inserto BFT Burzoni CNMG 190616



Fonte: Aatoria própria

O suporte utilizado pelo operador, na Figura 23, é também da marca BFT Burzoni, possui ângulo de posição principal de 75° e comprimento de 250mm. É importante salientar que embora a aresta de corte não seja neste caso a aresta principal deste tipo de inserto, o suporte aqui indicado é um suporte de "reaproveitamento", empregado para a utilização das outras duas arestas de cortantes do inserto. As dimensões estão mostradas de forma mais explícita na tabela Tabela 4.

Figura 23 – Suporte BFT Burzoni PCBNRL



Fonte: BFT Burzoni (2017)

Tabela 4 – Dimensões suporte BFT Burzoni PCBNRL

CODICE CODE	R	N	L	RICAMBI - ERSATZTEILE				INSERTI WSP	h=h <sub>1</sub>	b	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>
PCBNR/L 2525M 12	●	-	●	LV 43	VTL 43	GPCN 12	SPE 30	CN...1204...	25	25	150	22	28
PCBNR/L 2525M 16	●	-	●	LV 52	VTL 52	GPCN 16	SPE 50	CN...1606...	25	25	150	22	34
PCBNR/L 3225P 16	●	-	●	LV 52	VTL 52	GPCN 16	SPE 50	CN...1606...	32	25	170	22	34
PCBNR/L 3232P 16	●	-	●	LV 52	VTL 52	GPCN 16	SPE 50	CN...1606...	32	32	170	27	34
PCBNR/L 3232P 19	●	-	●	LV 60	VTL 60	GPCN 19	SPE 60	CN...19...	32	32	170	27	42
PCBNR/L 4040S 19	●	-	●	LV 60	VTL 60	GPCN 19	SPE 60	CN...19...	40	40	250	35	45
PCBNR/L 4040S 25	●	-	●	LV 70	VTL 90	GPCN 25	SPE 70	CN...25...	40	40	250	35	47

Fonte: BFT Burzoni (2017)

### 3.1.2 Instrumentos de medição para análise das amostras

Fundamental para o entendimento de como as variáveis de usinagem afetam a morfologia do material proveniente da mesma, as amostras coletadas na empresa onde os eixos foram usinados tiveram suas dimensões medidas com o auxílio de um paquímetro da marca Starrett®, representado na Figura 24, de resolução no nônio de 0,05 mm no SI e 0,002" para o sistema inglês.

Para as medições de espessura b' dos cavacos, foi utilizado um micrômetro externo da marca Digimes, por motivos de precisão, com capacidade de medição de 0-25mm, representado na Figura 25.

Figura 24 – Paquímetro Starret®



Fonte: Autoria própria

Figura 25 – Micrômetro Digimess



Fonte: Autoria própria

### 3.1.3 Amostras de cavacos coletadas

#### 3.1.3.1 Provenientes do eixo para gerador

Nesta etapa de desbaste foram coletadas 5 amostras de cavacos para diferentes parâmetros de torneamento, realizado na primeira empresa. Estes parâmetros tiveram por sua vez a maior parte de sua variação ligada à profundidade de acorde  $a_p$ . Para cada uma destas amostras foram analisadas as dimensões de cinco cavacos, estas:  $h$  representando a largura e  $b'$ , a espessura. Estas informações estarão disponibilizadas nos apêndices e podem ser utilizadas posteriormente para os cálculos de força de corte. (MACHADO et al., 2009).

Provenientes desta etapa da usinagem, foram coletados os cavacos representados pela Figura 26 até a Figura 30. Para que se tenha uma noção do tamanho dos cavacos das amostras, os mesmos foram dispostos ao lado de uma escala (paquímetro de 150 mm). A Tabela 5 ilustra as variáveis que foram utilizadas pelo operador em cada amostra.

Tabela 5 – Parâmetros de desbaste das amostras do gerador.

<b>Amostra</b>	<b><math>a_p</math> (mm/s)</b>	<b><math>v_f</math> (mm/s)</b>	<b><math>n</math> (rpm)</b>
1	1,25	0,625	100
2	1,5	0,625	100
3	2,5	0,625	100
4	x	x	100
5	x	x	100

Fonte: Autoria própria

Figura 26 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 1



Fonte: Autoria própria

Figura 27 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 2



Fonte: Autoria própria

As figuras subsequentes (Figura 29 e Figura 30) são relacionadas às amostras número 4 e 5, as quais tiveram a variável de rotações como sendo a mesma das amostras anteriores. No que diz respeito à velocidade de avanço e a profundidade de corte, os dados colhidos não foram suficientes para determinação destes valores, embora estas variáveis tenham sido semelhantes para todas as amostras, variando mais na profundidade de corte.

É de relevância ao trabalho mencionar que os valores do  $a_p$  também são dependentes das dimensões do inserto. Logicamente insertos menores irão permitir menores profundidades de corte.

Na Figura 28 estão representadas as amostras resultantes da coleta número 3.

Figura 28 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 3



Fonte: Autoria própria

Figura 29 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 4



Fonte: Autoria própria

Tendo em vista a importante comparação das amostras recolhidas provenientes do torneamento destes eixos e tendo em mente de que não são produtos de um experimento e sim de um trabalho real feito na indústria para fins que envolvem responsabilidade, são demonstrados na Figura 31 os diferentes cavacos das amostras 1 a 5 dispostos lado a lado.

Figura 30 – Amostras provenientes da coleta de cavacos número 5



Fonte: Autoria própria

Figura 31 – Visualização comparativa das amostras 1 a 5 (eixo gerador)



Fonte: Autoria própria

### 3.1.3.2 Provenientes do eixo para turbina

No que diz respeito às amostras de cavacos coletadas na etapa de desbaste do eixo para a turbina, realizada na segunda empresa, as três primeiras apresentadas nesta seção correspondem às resultantes dos parâmetros adotados pelo operador. Foram feitas sugestões de alterações de variáveis *in loco*, representadas também nesta subseção.

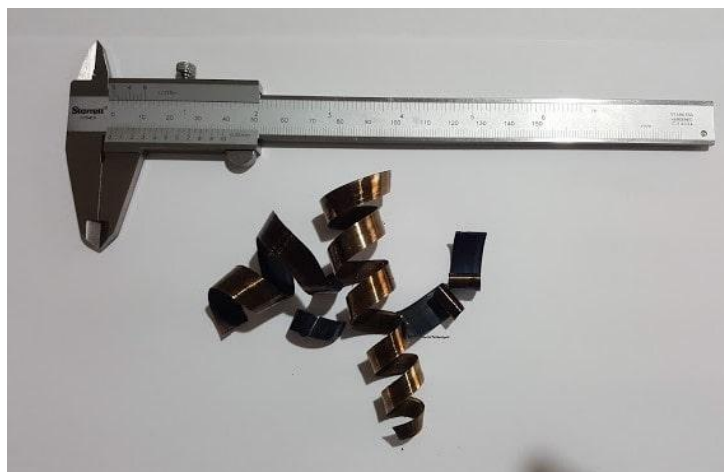
As variáveis das amostras coletadas provenientes das variáveis utilizadas pelo operador estão apresentadas Tabela 6 e os cavacos resultantes, na Figura 32 a Figura 34.

Tabela 6 – Parâmetros de desbaste das amostras da turbina.

Amostra	$a_p$ (mm/s)	$f$ (mm/rot)	$n$ (rpm)	$d$ (mm)
1	10	0,425	100	270
2	10	0,5	125	270
3	10	0,5	100	270

Fonte: Autoria própria

Figura 32 – Cavacos resultantes da amostra 1 - eixo para turbina



Fonte: Autoria própria

Figura 33 – Cavacos resultantes da amostra 2 - eixo para turbina



Fonte: Autoria própria

Novamente, a Figura 35, mostrada abaixo, traz os cavacos das amostras colhidas dispostos lado a lado, para que também de forma visual, como feito na Figura 31, possa-se notar as diferentes morfologias resultantes das variáveis adotadas pelo operador (1), (2) e (3).



Figura 34 – Cavacos resultantes da amostra 3 - eixo para turbina



Fonte: Autoria própria

Figura 35 – Visualização comparativa das amostras 1 a 3 (eixo turbina)



Com o intuito do alcance dos objetivos propostos no início do presente trabalho, a importância das amostras é evidenciada pelos objetivos específicos, que englobam justamente a melhoria das condições de usinagem através das mudanças de variáveis. Os cavacos representados pelas figuras acima são as evidências das condições de trabalho atuais adotadas pelas empresas. Com auxílio da literatura presente sobre o assunto, estas amostras serão analisadas e discutidas nos resultados.

### 3.2 TESTES DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS EM LABORATÓRIO

Com fins de entendimento do processo e posteriores sugestões de melhoria a partir dos problemas encontrados, que envolvem valores altos de profundidade de corte e resultam em cavacos de morfologia não desejável, foram feitos 30 ensaios de usinagem em corpos de prova disponibilizados pelo orientador do presente estudo. Estes corpos de prova consistem em dois

tarugos também do mesmo material empregado na fabricação dos eixos usinados nas empresas, ou seja, SAE/ABNT 1045 diferenciados do eixo para o gerador pelo processo de fabricação: ambos os corpos de prova são laminados devido às dimensões, portanto os experimentos de aproximação serão conduzidos utilizando como base o eixo para a turbina Kaplan, já que este último é laminado e não forjado também por conta de suas dimensões. A escolha se baseia neste critério, uma vez que os materiais disponibilizados para os testes de torneamento foram fabricados através do procedimento descrito.

Uma vez que os tarugos têm diâmetros menores que os eixos (3" ou 76,2mm de diâmetro para os tarugos e medidas que variam até valores de 270mm para o eixo para a turbina), as variáveis serão adaptadas, uma vez que algumas delas como a velocidade de corte dependem diretamente do diâmetro da parte a ser usinada.

### 3.2.1 Materiais utilizados nos experimentos

Sendo a dureza uma importante variável no torneamento dos eixos, testes de dureza foram feitos. Estas durezas foram quantificadas empregando um durômetro de bancada Digimess (Figura 36), capaz de realizar ensaios de dureza Rockwell A/B/C/N/T.

Em cinco medidas realizadas no raio do corpo de prova, em direção ao centro, distantes 4mm uma da outra, foi constatada uma dureza média do corpo de prova de 14,1 HRC.

Figura 36 – Durômetro de bancada Digimess



Fonte: Autoria própria

Constatadas as medidas de dureza, o procedimento subsequente de de tratamento térmico foi realizado em um forno mufla da marca Jung, modelo TB3010, conforme a Figura 37.

Os processos de torneamento por sua vez, tiveram realização em um torno convencional universal da marca ROMI, modelo Tormax 20A, com 5cv de potência no motor principal (Figura 38).

Alternativo à este torno foi utilizado um da marca American Tool Works Co., de 15cv de potência no motor principal, produzido entre as décadas de 1910 e 1940. Este torno

Figura 37 – Forno mufla utilizado nos tratamentos térmicos



Fonte: Autoria própria

Figura 38 – Torno Romi Tormax 20A



Fonte: Romi (2016)

(Figura 39) é equipado com um inversor de frequência para o controle de rotações. As medidas de frequência do torno para as rotações desejadas para o experimento estão presentes nos apêndices (Apêndice C).

Para lubrificação a jorro, utilizado o óleo solúvel semissintético eco Me1, da Quimatic/Tapmatic (Figura 40). Este teve concentração de 10% de lubrificante, controlada por um refratômetro, para que fosse utilizada a função refrigerante e não a função lubrificante deste óleo, conforme a Subseção 2.7.1.

Um suporte de geometria idêntica ao suporte utilizado na empresa foi empregado. Se trata do suporte WIDIA modelo PCBNR3232P19 (41). Por consequência das dimensões do suporte, o mesmo teve que ser rebaixado para utilização no torno disponível. Esta operação foi realizada no torno CNC da universidade.

Figura 39 – Torno American Tool Works



Fonte: Autoria própria

Figura 40 – Óleo utilizado nos passes de desbaste



Fonte: Autoria própria

O suporte teve alteradas as dimensões de altura (32mm para 20mm) e de largura (32mm para 25mm). Abaixo representado antes (a) e depois do procedimento (b).

Uma vez feito o posicionamento da ferramenta no castelo dos tornos, foram medidos os ângulos do plano de referência (Figura 42). Não foram feitas quaisquer alterações dos utilizados na empresa.

Figura 41 – Suporte WIDIA PCBNR3232P19



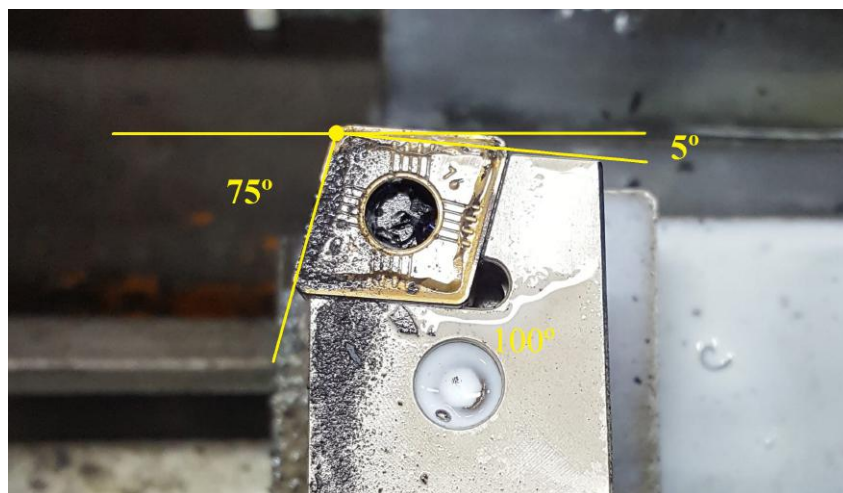
(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

Figura 42 – Ângulos de acordo com o  $P_r$



Fonte: Autoria própria

### 3.2.2 Tratamento térmico do corpo de prova

Levando em consideração o tratamento térmico realizado no eixo para a turbina (normalização), este foi reproduzido para o corpo de prova. O tratamento foi conduzido na mufla Jung a uma temperatura de 850°C em um tempo de 60 minutos.

### 3.3 MÉTODOS

Para que se possa alcançar o objetivo principal de otimização do processo de torneamento deste tipo de material, proposto ao início do trabalho, é essencial ter em mãos os valores de  $v_c$  e de taxa de remoção de material a partir dos dados coletados na empresa, uma vez que a primeira variável influi diretamente na segunda enquanto esta tem o papel de limitante na realidade da indústria, uma vez que não adiantaria uma melhora excessiva na morfologia dos cavacos se isto implicasse em queda significativa na produtividade na etapa de desbaste. Conforme descrito por Machado et al. (2009), alta taxa de remoção é a maior preocupação nesta etapa, pois impacta na produtividade da empresa.

Estes valores estão apresentados nas tabelas abaixo (Tabela 7 e Tabela 8) foram calculados conforme as fórmulas apresentadas no referencial teórico.

Tabela 7 – Valores de  $v_c$

Amostra	$a_p$ (mm)	$f$ (mm/rot)	$n$ (rpm)	$d$ (mm)	$v_c$ (m/min)
1	10	0,425	100	270	84,8232
2	10	0,5	125	270	106,029
3	10	0,5	100	270	84,8232

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Valores de taxa de remoção de material

Amostra	$v_c$ (mm/min)	$f$ (mm/rot)	$a_p$ (mm)	$Q$ (mm <sup>3</sup> /min)
1	84823,2	0,425	10	360498,6
2	106029	0,5	10	530145
3	84823,2	0,5	10	424116

Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados de taxa de remoção de material foram realizados os primeiros 13 testes com o mesmo inserto utilizado na operação de desbaste do eixo de turbina original na empresa, ou seja, BFT Burzoni CNMG 190616 com o critério de obtenção de valores de taxa de remoção de material entre 360498,6mm<sup>3</sup>/min e 530145mm<sup>3</sup>/min.

O corpo de prova foi dividido em três seções, para que fossem realizados desbastes com parâmetros diferentes. Estes parâmetros (Tabela 9) foram divididos nestas três seções de forma que se possa aproveitar mais o corpo de prova, já que o intuito aqui é principalmente a coleta e análise morfológica dos cavacos e não medidas de rugosidade superficial, por exemplo.

Ainda na mesma tabela tem-se os valores de velocidade de corte e taxa de remoção de material. Estes valores foram definidos a partir das possibilidades de seleção de parâmetros oferecidos pelo torno da marca American Tool Works.

Tabela 9 – Parâmetros de entrada e de saída levando em conta a TRM

Amostra	$a_p$ (mm)	$f$ (mm/rot)	$n$ (rpm)	$d$ (mm)	$v_c$ (m/min)	$Q$ (mm <sup>3</sup> /min)
1	2,54	0,61722	1000	76,2	239,19	375301,07
2	1,524	0,71374	1400	76,2	335,15	364551,70
3	1,27	1,03124	1200	76,2	287,27	376227,73
4	1,016	1,16078	1400	71,12	312,80	368905,01
5	1,4478	0,9271	1200	73,66	277,69	372734,20
6	1,651	0,9271	1100	69,08	238,75	365443,39
7	1,778	0,9271	1000	71,12	223,43	368299,58
8	1,778	0,84328	1100	70,76	244,54	366658,88
9	1,905	0,9271	1000	65,78	206,67	365011,21
10	3,048	1,03124	800	61,98	155,76	489597,76
11	3,048	0,77216	800	64,01	160,87	378614,88
12	5,08	0,77216	630	57,55	113,92	446844,47
13	3,048	0,9271	900	49,78	140,76	397763,65

Fonte: Autoria própria

É importante salientar que estes primeiros 13 testes foram feitos no torno citado já que este tem mais potência e suportaria parâmetros mais "pesados", como por exemplo maiores profundidades de corte a maiores rotações e maiores avanços. Como havia sido constatado que o torno da Romi disponível no laboratório não conseguiria manter funcionamento com valores de  $a_p$  maiores que 1mm (raio), foi feita a escolha pelo modelo mais antigo e mais potente.

Dada a nova configuração do torno, equipado com um inversor de frequência para controle de rotação, foram aferidos valores de rotação de interesse com auxílio de um tacômetro (Apêndice C).

Posteriormente foram realizados outros 13 testes levando em consideração o segundo critério: aproximação por velocidade de corte. Ou seja, os desbastes foram feitos com aproximações dos valores de  $v_c$  da empresa (entre 84m/min e 106m/min). Os parâmetros para os testes estão listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada e de saída levando em conta a velocidade de corte

Amostra	$a_p$ (mm)	$f$ (mm/rot)	$n$ (rpm)	$d$ (mm)	$v_c$ (m/min)
14	0,15	0,62	400	73,6	92,49
15	0,125	0,52	400	73,6	92,49
16	0,1	0,416	400	73,6	92,49
17	0,1	0,73	500	73,3	115,14
18	0,125	0,52	500	73,35	115,22
19	0,15	0,47	630	73,4	145,27
20	0,15	0,52	500	73,1	114,83
21	0,25	0,62	500	73,1	114,83
22	0,4	0,416	630	73	114,48
23	0,2	0,338	400	72,6	91,23
24	0,5	0,094	400	72,2	90,73
25	0,4	0,094	400	72,2	90,73
26	0,5	0,119	400	71	89,22

Fonte: Autoria própria

Diferentemente dos primeiros treze, estes foram realizados nos tornos da Romi, justamente pela não implicação de altos valores de  $a_p$  e por este torno ser de maior familiaridade dos acadêmicos, mais didático e menos complicado de se operar.

Tabela 11 – Parâmetros de entrada e de saída levando em conta baixas rotações

<b>Amostra</b>	<b><math>a_p</math> (mm)</b>	<b>f (mm/rot)</b>	<b>n (rpm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b><math>v_c</math> (m/min)</b>
27	0,2	0,62	315	70,7	69,97
28	0,2	0,62	250	69,6	54,66
29	0,2	0,62	215	72,2	48,76
30	0,15	0,73	200	72	45,24

Fonte: Autoria própria



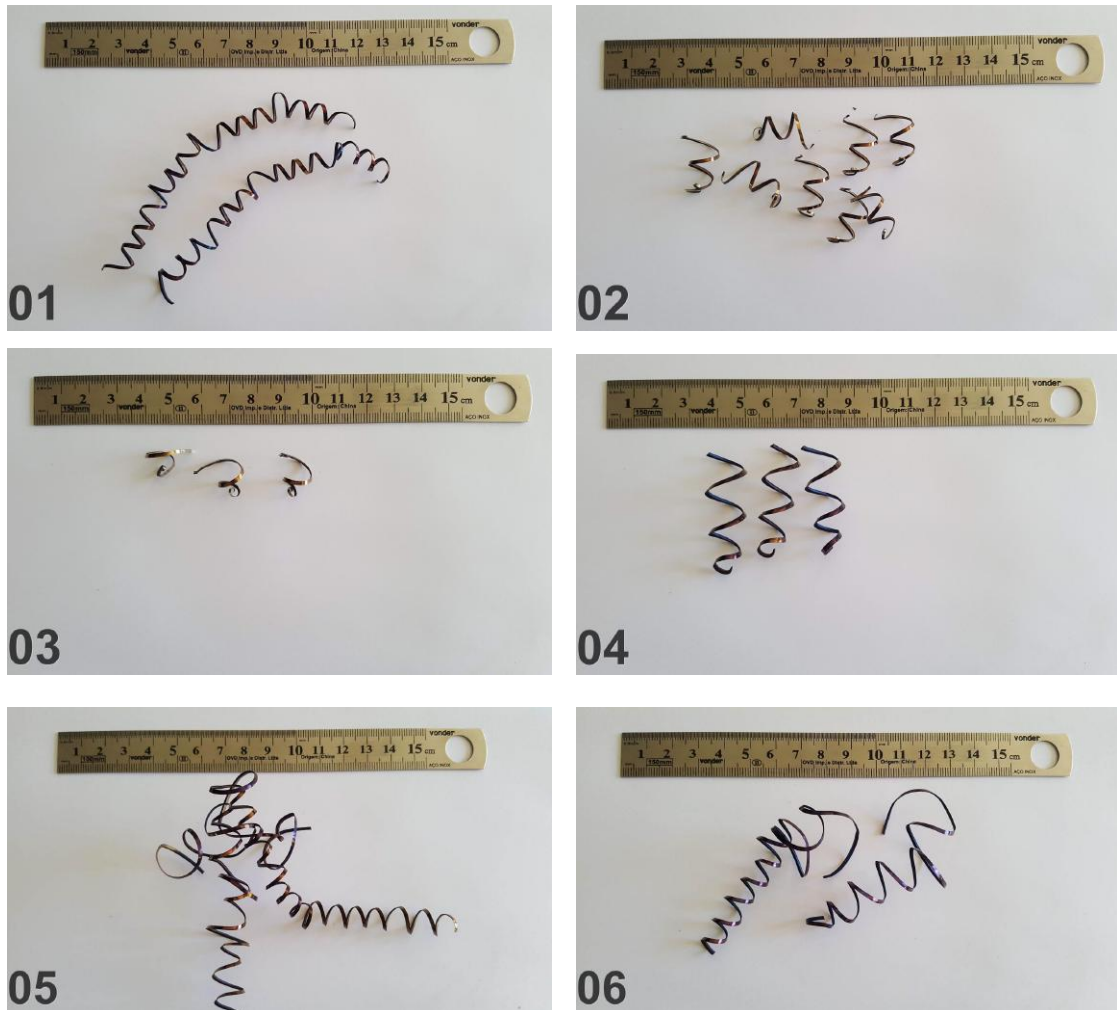
## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados serão analisados neste capítulo de maneira contrária à qual eles foram apresentados na seção de materiais e métodos: primeiramente, os resultados de laboratório e posteriormente os resultados de variação de parâmetros na empresa.

### 4.1 Laboratório

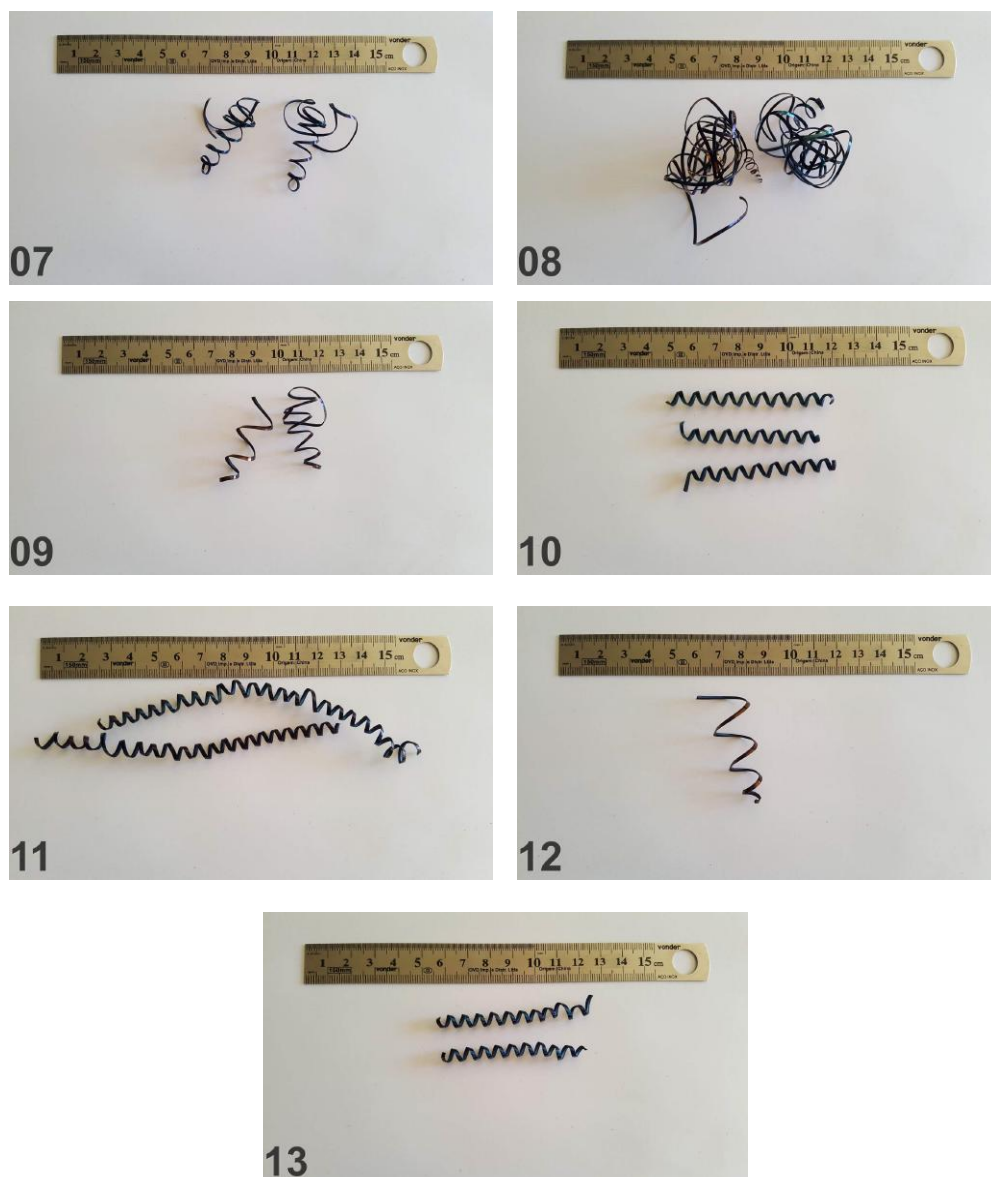
Como citado anteriormente, os primeiros 13 testes de desbaste em laboratório foram realizados através de aproximação de taxa de remoção de material. Os cavacos resultantes dos parâmetros da Tabela 9 estão presentes nas figuras subsequentes (Figura 43 e Figura 44).

Figura 43 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (1-6)



Fonte: Autoria própria

Figura 44 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (7-13)



Fonte: Autoria própria

A classificação dos cavacos das amostras 1-13 está presente na tabela abaixo (Tabela 12). Adicionalmente à classificação de tipo (MACHADO; SILVA, 2004) e forma através da norma ISO 3685 (1993), foi feita a classificação quanto à cor, que descreve o efeito da temperatura.

A predominância dos cavacos contínuos e de forma indesejável, ainda que útil, segundo Klocke e Gerschwiler (2008), é notável.

Nos 13 testes seguintes (Figura 45 e Figura 46) é possível apreciar os cavacos obtidos de acordo com as variações de parâmetro da Tabela 10, cuja consideração foi a aproximação dos resultados pela variável  $v_c$ . A profundidade máxima atingida antes que o torno mais potente disponível (15cv) viesse a parar foi obtida com os parâmetros da amostra 12.

Tabela 12 – Classificação dos cavacos - TRM

<b>Amostra</b>	<b>Tipo</b>	<b>Forma</b>	<b>Cor</b>
1	contínuo	helicoidal	azul/cobre
2	contínuo	espiral	amarelo
3	descontínuo	espiral	amarelo/prata
4	contínuo	helicoidal	azul
5	contínuo	espiral	azul/cobre
6	contínuo	espiral	azul
7	contínuo	helicoidal/emaranhado	azul
8	contínuo	fita/emaranhado	azul
9	contínuo	espiral	azul
10	contínuo	helicoidal	azul
11	contínuo	helicoidal	azul
12	contínuo	espiral	azul/cobre
13	contínuo	helicoidal	azul

Fonte: Autoria própria

Uma informação importante aqui é que a taxa de remoção de material já não foi mais levada em conta para estes "passes", uma vez que ela implica ou em maiores valores de velocidade de corte pela própria natureza de sua definição descrita na Equação (3), ou ainda em valores maiores de avanço e profundidade de corte, ambos não suportados pelos equipamentos disponíveis em laboratório.

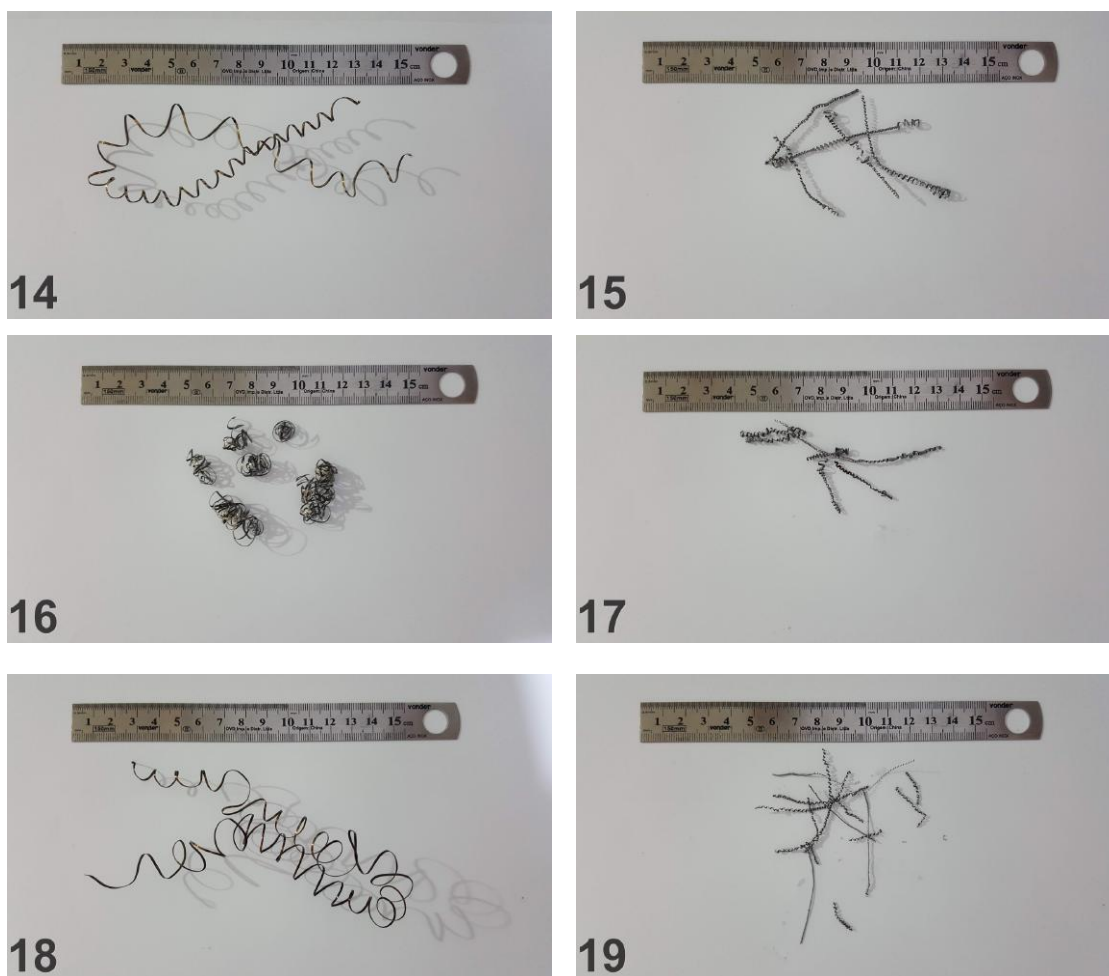
De maneira análoga às primeiras 13 amostras, a classificação dos cavacos segundo tipo, forma e coloração está presente na tabela abaixo (Tabela 13).

Tabela 13 – Classificação dos cavacos -  $v_c$ 

<b>Amostra</b>	<b>Tipo</b>	<b>Forma</b>	<b>Cor</b>
14	contínuo	espiral/helicoidal	prata/bronze
15	contínuo	tubular	prata
16	contínuo	emaranhado	prata
17	contínuo	tubular	prata
18	contínuo	helicoidal	bronze
19	contínuo	tubular	prata
20	contínuo	helicoidal	azul/bronze
21	contínuo	helicoidal/emaranhado	azul
22	contínuo	helicoidal/emaranhado	azul
23	contínuo	helicoidal	amarelado
24	contínuo	helicoidal/dentes de serra	azul/bronze
25	contínuo	helicoidal	azul/bronze
26	contínuo	helicoidal/dentes de serra	azul/bronze

Fonte: Autoria própria

Figura 45 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (14-19)



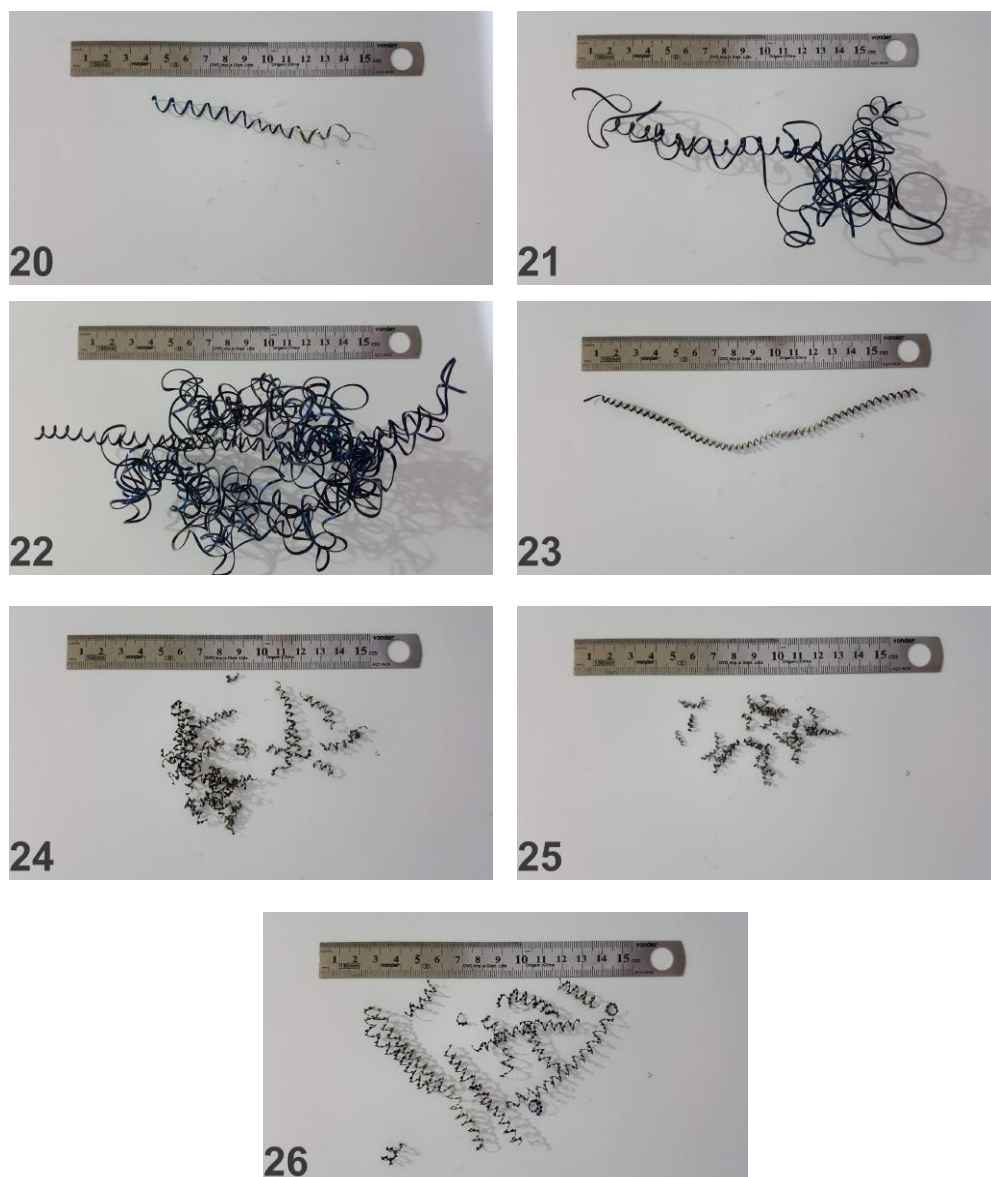
Fonte: Autoria própria

Comparando com amostras que levaram em consideração uma taxa de remoção de material similar ou até maior que as do eixo real da empresa, é possível perceber que houve alterações na coloração das amostras, que ainda obtiveram coloração azul, por vezes bronze. No entanto houve amostras com coloração prata (15, 16 e 17), onde os valores de profundidade foram reduzidos, juntamente com a velocidade de corte, demonstrando indícios de queda de temperatura.

Quanto à morfologia, ainda é possível notar a predominância dos cavacos contínuos nas amostras, ainda que os valores de velocidade de corte tenham sido reduzidos (de valores médios anteriores de 200-300m/min para 90-115m/min).

Este comportamento foi previsto por Machado et al. (2009), que atribui o aumento da temperatura às grandes velocidades de corte. Uma vez que o tarugo disponível possui dimensões muito inferiores às do eixo real, a variável  $v_c$  teve seu valor aumentado (mais especificamente em termos de rotação da máquina), para que os valores de taxa de remoção de material fossem obtidos.

Figura 46 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (20-26)



Fonte: Autoria própria

Dados os resultados negativos quanto à morfologia, ainda que os parâmetros tenham sido variados com auxílio da literatura (maiores avanços, menores profundidades), houve a suspeita nos dois testes anteriores existiria algo em comum e que poderia ter causado estes problemas.

Como os valores de profundidade de corte e avanço já haviam sido alterados inutilmente de forma a tentar melhorar as morfologias, temos como alternativa a análise mais detalhada do quê poderia existir em comum. Quando analisamos somente a TRM, sabemos que ela depende de três fatores:

- Profundidade de corte;
- Avanço;

- Velocidade de corte.

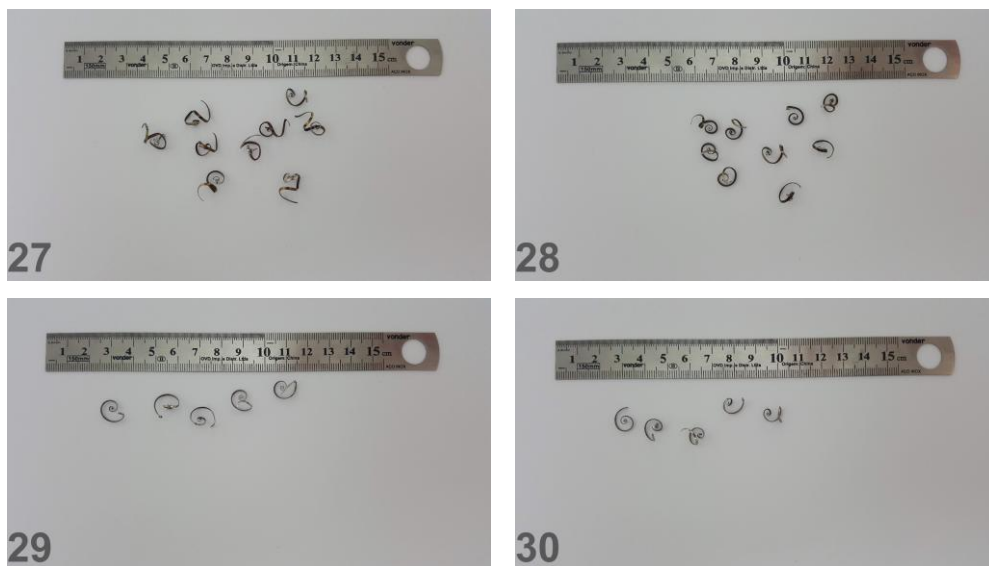
Como já explicado, os testes por si só já haviam levado em consideração variações de profundidades em avanço. Cabe então analisarmos a última variável descrita, a velocidade de corte. Esta depende de dois fatores. Eles são:

- Diâmetro da peça;
- Rotação da máquina.

Ainda que esta variável tivesse sido reduzida no segundo ciclo de desbastes, a morfologia dos cavacos continuou indesejável. A partir destas análises foram feitos mais quatro testes para que fosse testada a hipótese de que a rotação poderia estar influenciando diretamente a morfologia dos cavacos.

Esta foi escolhida já que o diâmetro da peça é uma variável que não podemos alterar de forma abrupta, já que para os testes em laboratório foram disponibilizados tarugos de 3 polegadas. Além do fato de que os tornos não têm a capacidade de rotacionar peças muito grandes. Os resultados deste terceiro teste estão evidenciados na Figura 47.

Figura 47 – Cavacos obtidos com variação de parâmetros no laboratório (27-30)



Fonte: Autoria própria

Como já feito para os outros dois ciclos, a classificação das últimas quatro amostras pode ser visualizada na Tabela 14.

Estes resultados evidenciam e demonstram que a rotação teve influência no tipo, forma e coloração dos cavacos, já que implica obrigatoriamente em um aumento da velocidade de corte.

Diferentemente das amostras que levaram em consideração uma TRM similar ou até maior que as do eixo real da empresa ou valores similares de  $v_c$ , é possível perceber significativa alteração na coloração das amostras, que tiveram muito mais a presença de cavacos prateados

e menos azuis e/ou bronze, sinalizando para uma menor temperatura durante seu processo de formação, menor ou não presença de óxidos que trariam estas colorações.

Tabela 14 – Classificação dos cavacos - menores valores de n

Amostra	Tipo	Forma	Cor
27	descontínuo	espiral	prata
28	descontínuo	espiral	prata
29	descontínuo	espiral	prata
30	descontínuo	espiral	prata

Fonte: Autoria própria

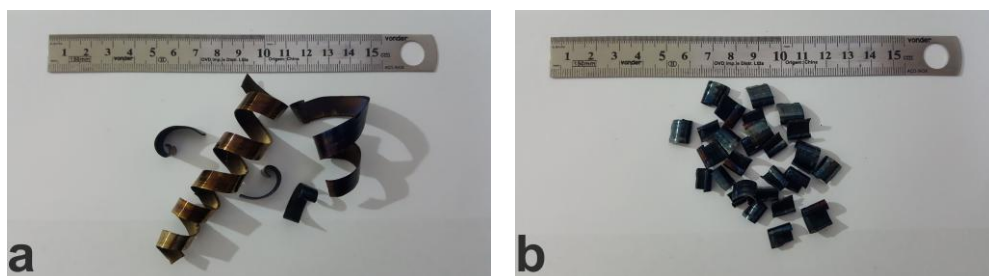
## 4.2 Empresa

Partindo do princípio que a velocidade de corte através da rotação possui papel essencial no controle da morfologia dos cavacos, juntamente ao controle dos parâmetros descritos na literatura, serão analisados nesta seção os resultados obtidos com a variação destes na empresa, no momento do desbaste do eixo.

Para desbastes de eixos de grande diâmetro são empregados valores muito menores de rotação se comparados aos dos experimentos, pois os diâmetros os compensam. Não somente por estes motivos, mas também porque os motores precisariam ser muito mais potentes do que já são para que os desbastes pesados fossem feitos a rotações maiores (constatado durante visita).

As imagens abaixo (Figura 48) demonstram as morfologias resultantes dos parâmetros mais utilizados na empresa durante o desbaste (já citadas anteriormente) e na Figura 49 as morfologias sugeridas com base na literatura.

Figura 48 – Resultantes dos parâmetros na empresa



Fonte: Autoria própria

As tabelas Tabela 17 e Tabela 18 demonstram respectivamente os valores de velocidade de corte e taxa de remoção de material de cada amostra para efeitos de comparação.

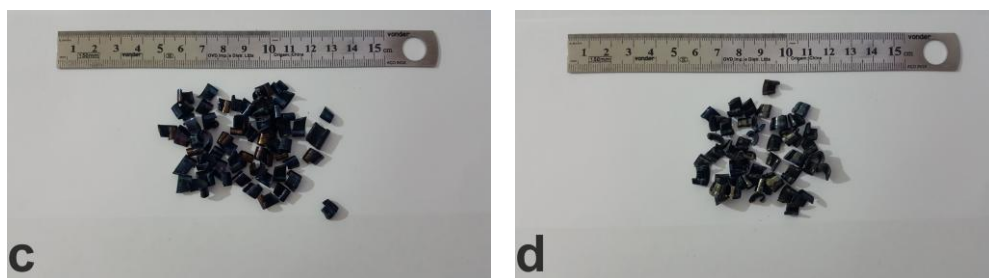
Pode-se perceber uma melhora evidente na morfologia dos cavacos, que ficaram menores. Se compararmos as velocidades de corte dos parâmetros utilizados pela empresa (a) e

Tabela 15 – Classificação dos cavacos - parâmetros empresa

Amostra	Tipo	Forma	Cor
a	contínuo	espiral	azul/bronze
b	parcialmente segmentado	arco	azul

Fonte: Autoria própria

Figura 49 – Resultantes dos parâmetros sugeridos



Fonte: Autoria própria

Tabela 16 – Classificação dos cavacos - parâmetros sugeridos

Amostra	Tipo	Forma	Cor
c	parcialmente segmentado	arco	azul
d	segmentado	arco	azul

Fonte: Autoria própria

(b) com os sugeridos (c) e (d) podemos notar aumento nesta variável. A produtividade por outro lado teve pequena queda quando se observou melhora na morfologia dos cavacos. Isto se deve ao fato de que os valores de profundidade foram reduzidos pela metade em comparação aos valores utilizados na empresa. Valores intermediários não foram testados, porém poderiam trazer resultados mais satisfatórios. Cavacos mais "estriados" e menos lisos já haviam sido previstos por Vieregge (1959), através da influência do ângulo de saída ( $\gamma_f$ ), que neste trabalho é negativo em sua totalidade

No entanto, como discutido diversas vezes ao longo do presente trabalho, uma melhor morfologia traz consigo uma série de outros benefícios, entre eles: reduzir o impacto causado na vida útil da ferramenta, menores riscos ao operador, menores condições de usinabilidade, melhores superfícies em termos de rugosidade, melhor alojamento de cavacos, entre outros.

Por fim a melhoria na qualidade superficial através dos parâmetros que trouxeram a uma melhor morfologia dos cavacos pode ser identificada através da imagem abaixo (Figura 50). Esta melhoria poderia ser utilizada por exemplo nos últimos passes de desbaste para eventualmente preparar a superfície para a próxima ferramenta de acabamento.



Tabela 17 – Valores de  $v_c$ 

Amostra	$a_p$ (mm)	$f$ (mm/rot)	$n$ (rpm)	$d$ (mm)	$v_c$ (m/min)
a	10	0,425	100	270	84,8232
b	10	0,5	125	270	106,029
c	5	0,478	125	250	98,175
d	5	0,7	125	250	98,175

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 – Valores de taxa de remoção de material

Amostra	$v_c$ (mm/min)	$f$ (mm/rot)	$a_p$ (mm)	$Q$ (mm <sup>3</sup> /min)
a	84823,2	0,425	10	360498,6
b	106029	0,5	10	530145
c	98175	0,478	5	234638,25
d	98175	0,7	5	343612,5

Fonte: Autoria própria

Figura 50 – Qualidade superficial provocada pela melhoria da morfologia dos cavacos



Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÃO

Na etapa de pré-processamento do material através do desbaste pesado destes eixos, são levados muitas vezes em conta a utilização de parâmetros não tão favoráveis no que se refere à morfologia do cavaco. Adicionalmente à estes parâmetros, existem fatores intrínsecos ao projeto muitas vezes, como o material a ser torneado, cuja dureza também influi na morfologia dos cavacos produzidos. Como dissertado anteriormente, materiais mais dúcteis tendem a ser piores para operações de usinagem.

No caso do eixo de turbina estudado, no qual os testes e estudos foram feitos, a dureza dos dois materiais é relativamente baixa. Isto se deve à falta de tratamentos térmicos no aço ABNT/AISI 1045 levados em consideração no momento do projeto. Todavia estes tratamentos não são obrigatórios e dependem da forma de trabalhar de cada empresa; de cada projeto individualmente. O eixo para o gerador, por exemplo, sofreu tratamentos de têmpera e revenimento. Pode-se notar nele melhores morfologias dos cavacos, comparados com o eixo para turbina, que não teve, por sua vez, qualquer tratamento além da normalização.

A necessidade destes tratamentos, no caso do eixo de gerador, também pode ser questionada, já que agregam custos ao projeto. Portanto são também critérios de viés econômico: ganha-se em termos de usinagem, mas perde-se em termos de custos com tratamentos.

Cabe ainda a análise da combinação de um material de dureza relativamente baixa com a utilização de um inserto de raio relativamente grande. A morfologia do cavaco tende a piorar com a utilização de insertos de maiores raios (vide utilização de insertos redondos, que provocam cavacos em sua maioria contínuos em fita e emaranhados), evidenciados também no desbaste do eixo para gerador, cujos cavacos tiveram morfologia melhor e o inserto era um triangular, de raio de ponta menor.

No caso do eixo estudado (turbina), o suporte e inserto, demonstrado na Figura 22, não é o ideal para este tipo de processo, já que o suporte se trata de um suporte de "reaproveitamento", pois proporciona desbastes com a aresta lateral do inserto romboidal. Aresta, que por sua vez tem um raio maior (mais resistência mecânica (Figura 13)) que a aresta principal deste inserto, possibilitando maiores profundidades de corte de uma vez só (maior produtividade). Outra vez o critério econômico foi a justificativa para estas escolhas, já que pode-se reaproveitar o inserto ao invés de simplesmente descartá-lo. Novamente a consequência é a piora na morfologia dos cavacos.

Quanto à influência dos parâmetros, a percepção de que valores de rotação influenciam diretamente na morfologia dos cavacos foi decisiva para os testes e escolha dos parâmetros, pois as altas rotações impossibilitaram a obtenção de cavacos de boa morfologia ainda que os avanços tenham sido aumentados e profundidades diminuídas. Ainda posto que altas rotações fazem com que as velocidades de corte tenham acréscimo e consequentemente os cavacos ficam mais quentes e difíceis de quebrar.

Portanto, verifica-se a influência da rotação, que dificulta muito o controle da morfologia quando aliada aos fatores citados nos últimos parágrafos: baixa dureza do material não tratado e ângulos de ponta maiores.

A utilização do fluido de corte em testes de laboratório não teve muita influência na morfologia dos cavacos, ainda que feita por jorro. Embora seja muito mais interessante tentar reproduzir todos os fatores da usinagem na empresa em laboratório, o fluido de corte com função refrigerante é empregado com o intuito de diminuir a temperatura da peça, e não dos cavacos, para que os riscos de empenamento durante o torneamento sejam reduzidos.

Apesar dos resultados com as morfologias terem sido positivos na empresa, otimizando o processo de forma geral sugerindo melhores parâmetros para aquele conjunto específico de ferramentas e melhorando assim de uma forma geral o desgaste pesado dos eixos, pode-se concluir que não existe simplicidade em reproduzir torneamento pesado sem realmente estar torneando um eixo de grandes dimensões. Os testes foram, no entanto, válidos para ajudar a entender o processo encontrar problemas que influenciassem na morfologia dos cavacos, levando realmente à significativas melhoras.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de continuidade da investigação de como a usinagem pesada é realizada são:

- Utilização de diferentes métodos de lubrificação que otimizam gastos, como por exemplo o MQF, para este tipo de eixos;
- Variação de insertos, para que se possa chegar a uma ferramenta de geometria que leve em conta a produtividade e a morfologia dos cavacos;
- Variação de suportes;
- Investigação da temperatura durante o processo de torneamento destes tipos de eixo, uma vez que esta se mostra como uma variável que tem grande influência sobre o processo.

## Referências

- Aço Forja. **Certificado de qualidade**. [S.l.], 2016. Citado na página 19.
- ASTAKHOV, V.; SHVETS, S.; OSMAN, M. **Chip structure classification based on mechanics of its formation**. 247–257 p. Tese (Doutorado), 11 1997. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013697000812>>. Citado na página 7.
- AZoM. **AISI 1045 medium carbon steel**. 2012. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>>. Citado na página 19.
- BFT Burzoni. **Suportes para Torno**. 2017. 6–61 p. Citado na página 26.
- Big Tools. **Big Tools - Ferramentas para torneamento**. 2015. 30 p. Citado na página 25.
- BRUNO, R.; PEREIRA, D. **Influência do quebra-cavaco na dinâmica do torneamento do aço ABNT 1045**. Tese (Doutorado), 2011. Disponível em: <[https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Robson\\_Bruno\\_Dutra\\_Pereira.pdf](https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Robson_Bruno_Dutra_Pereira.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition**. [S.l.: s.n.], 2009. 992 p. ISBN 0470941669. Citado 4 vezes nas páginas 18, 20, 21 e 22.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. [S.l.: s.n.], 1986. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- CIMM. **Histórico da usinagem**. 2015. Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/4857-historico#.WxgeHiBv\\_IU](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4857-historico#.WxgeHiBv_IU)>. Citado na página 3.
- CORRÊA, F. C. et al. **Torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro e cermet**. Tese (Doutorado), 2002. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2002/trabalhos/tema13/CPB0822.PDF>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. 2013. 272 p. Citado na página 16.
- FERNANDES, U. d. B. **Análise de métodos de lubri-refrigeração aplicados no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho em aços endurecidos**. 149 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/100925>>. Citado na página 18.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1977. 751 p. Citado 4 vezes nas páginas 4, 6, 12 e 13.
- GAUTAM, A. **Structural analysis of kaplan turbine shaft using ansys**. 53 p. Tese (Doutorado), 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing**. [S.l.: s.n.], 2010. 1205 p. Citado 5 vezes nas páginas 4, 5, 16, 20 e 22.
- ISO 3685. **Tool-life testing with single-point turning tools**. 1993. 48 p. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 41.

- ISO NBR 3002-1. **Grandezas básicas em usinagem e retificação - Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte — Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos**. 2013. 70 p. Citado na página 10.
- ISO NBR 513. **Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas - Denominação dos grupos principais e grupos de aplicação**. 2004. 3 p. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- JUNIOR, A. S. A. **Desempenho de óleos vegetais comestíveis aplicados por MQF no fresamento frontal do aço ABNT 1045**. 162 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Citado na página 17.
- KALPAKJIAN, S. **Manufacturing engineering and technology**. [S.l.: s.n.], 2000. 1180 p. ISBN 1574443364. Citado na página 3.
- KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. **Zerspanen von Stahl**. [s.n.], 2008. Disponível em: <[http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB137\\_Zerspanen\\_von\\_Stahl.pdf](http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB137_Zerspanen_von_Stahl.pdf)>. Citado 5 vezes nas páginas 7, 8, 9, 13 e 41.
- MACHADO, R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. [S.l.: s.n.], 2009. 312 p. Citado 16 vezes nas páginas 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 21, 27, 37 e 43.
- MACHADO, R.; SILVA, M. B. d. **Usinagem dos Metais**. 2004. 262 p. Citado 4 vezes nas páginas 11, 17, 18 e 41.
- MOURA, R. R. **Fresamento de aço para matrizes VP20ISOF com ferramentas reafiadas**. 2012. 106 p. Citado na página 14.
- Romi. **Linha tormax e linha ES 40**. 2016. 8 p. Citado na página 34.
- RONALD, A. W.; CORMIER, R. D. **Machining and metalworking handbook**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 974 p. ISBN 0-07-145787-9. Citado na página 4.
- SALDARRIAGA, P. A. C. Estudo dos campos de tensão gerados por inclusões durante o processo de torneamento em aços ABNT 1045 utilizando o método dos elementos finitos. 2008. Citado na página 3.
- SANDVIK. **Como escolher a pastilha de torneamento correta**. 2017. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>>. Citado na página 15.
- Simufact. **Freiformschmieden**. 2018. Disponível em: <<https://www.simufact.de/freiformschmieden.html>>. Citado na página 21.
- STOETERAU, R. L. **Fundamentos dos Processos de Usinagem**. São Paulo: USP, 2003. 75 p. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULARS1.pdf>>. Citado na página 15.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. [S.l.: s.n.], 2000. 446 p. ISSN 0350-820X. ISBN 075067069X. Citado 5 vezes nas páginas 1, 3, 6, 12 e 16.
- VIEREGGE, G. **Zerspanung der Eisenwerkstoffe**. [S.l.: s.n.], 1959. 346 p. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 47.

WIDIA. **WIDIA master catalogue 2017**. 2017. 1972 p. Citado na página 23.

## Apêndices

**APÊNDICE A – Dimensões dos cavacos das amostras coletadas - Eixo do Gerador**

Tabela 19 – Dimensões da primeira amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	1,3	0,6
2	1,6	0,6
3	1,45	0,65
4	1,45	0,6
5	1,35	0,6
<b>Média</b>	1,43	0,61
<b>Desvio Padrão</b>	0,115108644	0,02236068

Fonte: Autoria própria

Tabela 20 – Dimensões da segunda amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	1,7	0,55
2	1,85	0,55
3	1,75	0,55
4	1,8	0,65
5	1,8	0,6
<b>Média</b>	1,78	0,58
<b>Desvio Padrão</b>	0,057008771	0,04472136

Fonte: Autoria própria

Tabela 21 – Dimensões da terceira amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	2,75	0,5
2	2,6	0,55
3	2,8	0,5
4	2,7	0,55
5	2,6	0,55
<b>Média</b>	2,69	0,53
<b>Desvio Padrão</b>	0,089442719	0,027386128

Fonte: Autoria própria



Tabela 22 – Dimensões da quarta amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	3,25	0,55
2	3,35	0,5
3	3,3	0,45
4	3,35	0,45
5	3,3	0,55
<b>Média</b>	3,31	0,5
<b>Desvio Padrão</b>	0,041833001	0,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 23 – Dimensões da quinta amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	3,3	0,5
2	3,45	0,5
3	3,3	0,45
4	3,2	0,45
5	3,4	0,5
<b>Média</b>	3,33	0,48
<b>Desvio Padrão</b>	0,097467943	0,027386128

Fonte: Autoria própria

**APÊNDICE B – Dimensões dos cavacos das amostras coletadas - Eixo da Turbina**

Tabela 24 – Dimensões da primeira amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	10,4	0,73
2	8,45	0,7
3	11,15	0,9
4	10,9	0,92
5	7,55	0,94
<b>Média</b>	9,69	0,838
<b>Desvio Padrão</b>	1,598202115	0,113666178

Fonte: Autoria própria

Tabela 25 – Dimensões da segunda amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	1	0,37
2	1	0,34
3	1	0,34
4	1	0,35
5	1	0,3
<b>Média</b>	1	0,34
<b>Desvio Padrão</b>	0	0,025495098

Fonte: Autoria própria

Tabela 26 – Dimensões da terceira amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	9,65	1,2
2	10,75	1
3	9,2	1,04
4	10,25	1,1
5	10	1,16
<b>Média</b>	9,97	1,1
<b>Desvio Padrão</b>	0,588005102	0,082462113

Fonte: Autoria própria

Tabela 27 – Dimensões da quarta amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	6	1,06
2	5,9	1,1
3	5,9	1
4	6	1
5	5,9	1
<b>Média</b>	5,94	1,032
<b>Desvio Padrão</b>	0,054772256	0,046043458

Fonte: Autoria própria

Tabela 28 – Dimensões da quinta amostra

<b>Cavaco</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	6	1,6
2	6,15	1,66
3	6,2	1,64
4	6,1	1,6
5	6,15	1,6
<b>Média</b>	6,12	1,62
<b>Desvio Padrão</b>	0,075828754	0,028284271

Fonte: Autoria própria

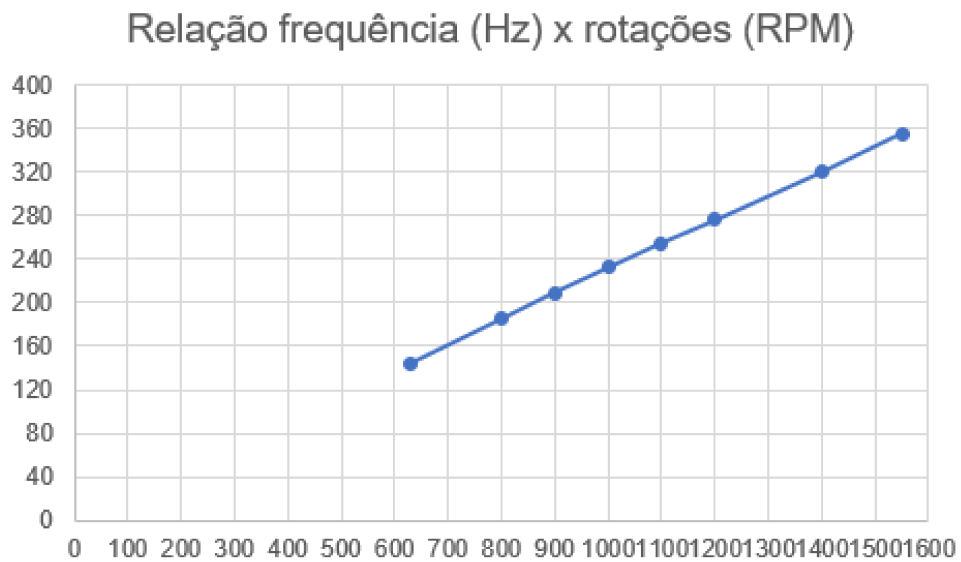
## APÊNDICE C – Medidas de frequência para rotações desejadas para os experimentos

Tabela 29 – Relação frequência x rotações do torno American Tool Works Co.

n (RPM)	f (Hz)
630	144
800	185
900	209
1000	233
1100	254
1200	276
1400	320
1550	355

Fonte: Autoria própria

Figura 51 – Rotações utilizadas nos desbastes e respectivas frequências



Fonte: Autoria própria