

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO PAULO SPAGNOLO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA  
PARA USINAGEM ECONÔMICA EM UM PROCESSO  
DE TORNEAMENTO E MANDRILAMENTO EM UMA  
INDÚSTRIA NÃO AUTOMATIZADA**

SÃO CARLOS - SP  
2023

PEDRO PAULO SPAGNOLO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA USINAGEM ECÔNOMICA EM  
PROCESSOS DE TORNEAMENTO E MANDRILAMENTO EM UMA INDÚSTRIA NÃO  
AUTOMATIZADA**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentada ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de São Carlos, para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo Sette  
Antonialli

São Carlos-SP  
2023

Spagnolo Pereira, Pedro Paulo

Desenvolvimento de uma metodologia para usinagem econômica em processos de torneamento e mandrilamento em uma indústria não automatizada / Pedro Paulo Spagnolo Pereira -- 2023. 77f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli

Banca Examinadora: Armando Ítalo Sette Antonialli,

Fabrizio Tadeu Paziani, Leandro Ataíde Torres

Bibliografia

1. Custos de produção. 2. Tempos de produção . 3. Geração de energia. I. Spagnolo Pereira, Pedro Paulo. II. Título.

## ERRATA

SOBRENOME, Nome. **Título do trabalho:** subtítulo (se houver). Ano da defesa. nº de páginas. Natureza (Grau) - Departamento, Universidade, Cidade, ano de publicação.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
Indicar o nº da folha	Indicar o nº da linha	Indicar o erro	Indicar a correção



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 10/2023/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

PEDRO PAULO SPAGNOLO PEREIRA

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA USINAGEM ECONÔMICA EM UM PROCESSO DE TORNEAMENTO E MANDRILAMENTO EM UMA INDÚSTRIA NÃO AUTOMATIZADA

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 30 de março de 2023

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Armando Ítalo Sette Antonialli
Membro da Banca 1	Fabrizio Tadeu Paziani
Membro da Banca 2	Leandro Ataide Torres



Documento assinado eletronicamente por **Armando Ítalo Sette Antonialli, Docente**, em 30/03/2023, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabrizio Tadeu Paziani, Docente**, em 30/03/2023, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0983393** e o código CRC **01A20C1A**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.009098/2023-01

SEI nº 0983393

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho ao querido e amado Raphinha, o segundo pai que a vida me deu e hoje não está mais entre nós. Tenho certeza que você está muito orgulhoso do seu filhão!

## AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a minha família, em especial à minha mãe, Lúcia Helena Gonçalves Spagnolo. Mãe solteira e que durante 25 anos lutou e batalhou muito para que eu pudesse chegar até aqui. Muito obrigado pelo apoio, carinho, amor, ensinamentos e motivação ao longo de toda essa trajetória.

Agradeço ao meu querido padrasto, Raphael Pina, por ter sido verdadeiro anjo na minha vida. Assim como agradeço ao meu irmão, Artur Henrique e meu pai Eurípedes Pereira.

Também agradeço a minha namorada Ana Júlia Castro Rodrigues pela ajuda, cumplicidade e companheirismo, principalmente, durante o período de desenvolvimento do TCC.

Agradeço a Equipe Baja UFSCar pelas oportunidades e momentos únicos que proporcionou na minha formação como Engenheiro Mecânico. Agradeço aos amigos e amigas que estiveram juntos comigo durante os incansáveis dias pré-competições, assim como nas muitas noites viradas de oficina.

Agradeço aos meus amigos de Ribeirão Preto que estiveram comigo há mais de 20 anos. Mesmo pela distância e a minha ausência durante os anos de faculdade estiveram presentes nos momentos em que precisei. Também agradeço aos amigos de São Carlos que passaram pela minha vida ao longo dos anos de graduação, todos contribuíam, de uma forma ou de outra, para o meu amadurecimento profissional e pessoal.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Armando Italo Sette Antonialli por todo apoio e suporte técnico para o desenvolvimento deste trabalho. Assim, também agradeço a UFSCar e ao Departamento de Engenharia Mecânica pela estrutura e ensino oferecido ao longo desses anos. Faço um agradecimento ao Mateus Keniti pela grande ajuda na caracterização dos insertos utilizado no desenvolvimento do presente trabalho.

Por fim, agradeço a empresa Andritz Hydro pela oportunidade de estágio ao longo do último ano e a todo o time da Engenharia Industrial e Fábrica Mecânica, pelo suporte técnico e profissional para realização deste TCC.

## RESUMO

O setor hidrelétrico é tido como uma das principais fontes de geração de energia elétrica no país, vista a alta capacidade de produção envolvendo essa matriz energética, além da grande abundância desse recurso a nível nacional. Dentro de um contexto industrial, a fabricação de componentes mecânicos para usinas hidrelétricas é altamente influenciada pelos processos convencionais de usinagem, como torneamento e mandrilamento. Em se tratando de um modelo de fabricação não automatizado, justamente pelas particularidades de cada projeto, não existe um padrão referente a parâmetros de usinagem, quantidade de insertos utilizados, geometria de peça e tempo de usinagem, fatores, esses, fundamentais para determinação de tempos e custos de produção de cada componente. Dessa forma, no presente trabalho, buscar-se identificar os principais parâmetros de usinagem utilizados, quantidade de insertos utilizados por lote de peças, tempo de usinagem e custo em uma empresa fabricante de equipamentos mecânicos para pequenas, médias e grandes usinas hidrelétricas, com o objetivo de desenvolver uma metodologia para determinar as condições econômicas de usinagem em termos de máxima produção e mínimo custo. Os parâmetros estudados foram apontados a partir da coleta de dados referente aos protocolos de usinagem da empresa de cada operação de processo, assim como, a quantidade de materiais utilizados em fabricações passadas e atuais em relação a realização do estudo em questão. Em suma, a metodologia aplicada foi capaz de mapear a usinagem do Rotor Francis de uma maneira analítica e determinar a influência real da velocidade de corte nos custos e tempo produção.

**Palavras-chave:** Geração de energia, componentes mecânicos, tempos de produção, custos de produção.

## ABSTRACT

The hydroelectric sector is considered one of the main sources of electricity generation in the country, given the high production capacity involving this energy matrix, in addition to the great abundance of this resource at the national level. Within an industrial context, the manufacturing of mechanical components for hydroelectric power plants is highly influenced by conventional machining processes, such as turning and boring. In the case of a non-automated manufacturing model, precisely because of the peculiarities of each project, there is no standard regarding machining parameters, quantity of inserts used, piece geometry, and machining time, factors that are fundamental to determine production times and costs for each component. Thus, in the present work, we aim to identify the main machining parameters used, quantity of inserts used per batch of parts, machining time, and cost in the manufacturing of mechanical equipment for small, medium, and large hydroelectric power plants, with the objective of developing a methodology to determine the economic conditions of machining in terms of maximum production and minimum cost. The parameters studied were pointed out from the data collected regarding the machining protocols of the company for each process operation, as well as the quantity of materials used in past and current fabrications in relation to the study in question. In short, the applied methodology was able to map the machining of the Francis turbine rotor in an analytical way and to determine the real influence of the cutting speed on costs and production time.

**Keywords:** Energy generation, mechanical components, production times, production costs.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação gráfica das parcelas de tempo.....	18
Figura 2 – Representação gráfica do custo de produção.....	21
Figura 3 – Representação gráfica do IME.....	22
Figura 4 – Tempo de vida da ferramenta.....	25
Figura 5 – Tempo e Custo de produção pela vida da ferramenta.....	26
Figura 6 – Desgaste da ferramenta para aço S41426 e S41000.....	28
Figura 7 – Evolução do Desgaste da Ferramenta.....	29
Figura 8 – Condições da ferramenta de corte após usinagem do aço S41426.	29
Figura 9 – Desgaste da ferramenta para aço S41426.....	32
Figura 10 – Tempo de vida da ferramenta em função da velocidade de corte.	32
Figura 11 – Curva de vida em função da velocidade de corte em escala logarítmica.....	33
Figura 12 – Rotor Francis.....	34
Figura 13 – Rotor Francis após etapa de soldagem.....	35
Figura 14 – Croqui para etapa de mandrilhamento.....	36
Figura 15 – Croqui para etapa de torneamento.....	36
Figura 16 – <i>Setup</i> em máquina – Etapa 1.....	37
Figura 17 – <i>Setup</i> em máquina – Etapa 1 (Vista Frontal).....	38
Figura 18 – <i>Setup</i> em máquina – Etapa 2.....	38
Figura 19 – <i>Setup</i> em máquina – Etapa 3.....	39
Figura 20 – <i>Setup</i> em máquina – Etapa 3 (Vista Frontal).....	40
Figura 21 – Rotor Finalizado.....	40
Figura 22 – Movimento cinemático do fresamento helicoidal.....	43
Figura 23 – Inserto Utilizado para Desbaste.....	53
Figura 24 – Inserto Utilizado para Acabamento.....	54
Figura 25 – Tempo e Custo de Produção para Etapa 1.....	56
Figura 26 – Tempo e Custo de Produção para Etapa 2.....	56
Figura 27 – Tempo e Custo de Produção para Etapa 3.....	57
Figura 28 – Tempo e Custo de Produção para Etapa 4.....	57
Figura 29 – Intervalo de Máxima Eficiência nas 4 Etapas.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de corte do ensaio.....	29
Tabela 2 – Composição química dos materiais.....	28
Tabela 3 – Dureza.....	29
Tabela 4 – Definição dos parâmetros $x$ e $k$ da Equação de Taylor.....	32
Tabela 5 – Parâmetros de usinagem para cálculo teórico do torneamento.....	42
Tabela 6 – Parâmetros de usinagem para cálculo teórico do mandrilamento.....	46
Tabela 7 – Definição das constantes de tempo de produção.....	49
Tabela 8 – Tempo de produção de cada etapa em função de $v_c$ .....	49
Tabela 9 – Definição das constantes de tempo de produção.....	52
Tabela 10 – Custo de produção de cada etapa em função de $v_c$ .....	51
Tabela 11 – Comparativo de usinagem teórico e prático do rotor francis.....	54
Tabela 12 – Comparativo final velocidades de corte posicionadas no IME.....	57
Tabela 13 – Impacto das velocidades de corte fora do IME.....	57

## LISTA DE SIGLAS

GW	Gigawatt
VB	Desgaste flanco
R\$	Valor em reais
IME	Intervalo de Máxima Eficiência
CNC	Controle Numérico por Computador
Et al	E outros
PCD	Diamante policristalino
rev	Revolução
MD	Metal duro
CVD	Deposição de Vapor Químico
FHI	Fresamento helicoidal interpolado
rpm	Rotação por minuto
3D	3 dimensões
CN	Controle numérico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_c$	Velocidade de corte
$V_{co}$	Velocidade de mínimo custo
$V_{cmxp}$	Velocidade de máxima produção
$t_t$	Tempo total de usinagem de uma peça
$t_c$	Tempo de corte
$t_a$	Tempo de aproximação e afastamento
$t_p$	Tempo de preparo da máquina
$t_{ft}$	Tempo de troca da ferramenta
$t_s$	Tempo fixação inspeção e retirada da peça
$Z$	Lote de peças
$t_{cp}$	Tempo de corte de produção
$T$	Tempo de vida da aresta
$K$	Constante Taylor
$x$	Constante Taylor
$t_{imp}$	Tempo improdutivo
$t_{fp}$	Tempo de corte útil da ferramenta
$C_p$	Custo de usinagem
$C_c$	Custo do corte em usinagem
$C_{mq}$	Custo de operação da máquina
$C_f$	Custo da ferramenta de corte
$C_{ft}$	Custo de troca de ferramenta
$S_h$	Custo do operador da máquina
$S_{mq}$	Custo de operação da máquina
$C_1$	Constante independente da velocidade de corte
$C_2$	Soma das despesas com mão de obra e com máquina
$C_3$	Constante de custo relativo à ferramenta
$K_{p1}$	Custo de produção independente da velocidade de corte
$K_{pm}$	Custo de produção dependente da mão de obra
$K_{pf}$	Custo de produção dependente da vida da ferramenta
$Q$	Taxa de remoção de cavaco
$f_c$	Avanço de corte

$z$	Número de dentes da fresa
$f_z$	Avanço axial ou passo da rosca
$f$	Avanço por volta
$a_p$	Profundidade de corte
$\mu\text{m}$	Micrometros
$\log$	Operação logarítmica
$B_0$	Altura de referência principal
$t_{cn}$	Tempo de corte diâmetro $n$
$L$	Comprimento do corte
$p$	Quantidade de passes
$n_f$	Número troca de ferramenta por operação
$v_f$	Velocidade de avanço
$d_f$	Diâmetro final
$d_i$	Diâmetro inicial
$d_m$	Diâmetro médio
$t_{ct}$	Tempo de corte total
$Q_{ct}$	Taxa total de remoção de cavaco
$V_t$	Volume de cavaco total produzido
$l_f$	Comprimento de corte
$v_{fz}$	Velocidade do movimento axial
$t_{cf}$	Tempo de corte do fresamento
$\alpha$	Ângulo velocidade avanço axial e circular
$v_{fxy}$	Velocidade de avanço circular
$v_{fz}$	Velocidade de avanço axial
$f_z$	Avanço axial ou passo da rosca
$d_h$	Diâmetro de giro da fresa
$D_{furo}$	Diâmetro do furo
$D_{fresa}$	Diâmetro da fresa
$t_{cfn}$	Tempo de corte do fresamento helicoidal interpolado $n$
$\pi$	Número PI
$t_{ctf}$	Tempo de corte do fresamento helicoidal interpolado final
$\emptyset$	Diâmetro
$n_f$	Quantidade de inserto por etapa

$V_{si}$

Custo de Aquisição de um porta ferramenta

$N_s$

Número de arestas de corte

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1 OBJETIVOS .....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	23
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	24
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	30
3.1 MATERIAIS.....	30
3.2 DEFINIÇÃO DOS COEFICIENTES DE TAYLOR.....	31
3.3 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS DE USINAGEM DO ROTOR.....	34
<b>3.3.1 Usinagem de Desbaste – Etapa 1</b> .....	37
<b>3.3.2 Usinagem de Furação e Roscas – Etapa 2</b> .....	38
<b>3.3.3 Usinagem de Acabamento – Etapa 3</b> .....	39
<b>3.3.4 Usinagem de Desbaste e Acabamento – Etapa 4</b> .....	40
3.4 DEFINIÇÃO DOS TEMPOS DE CORTE.....	41
<b>3.4.1 Definição do Tempo de Corte Teórico para Etapas 1, 3 e 4</b> .....	41
<b>3.4.2 Definição Do Tempo De Corte Teórico da Etapa 2</b> .....	43
3.5 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES ECONOMICAS DE USINAGEM....	47
<b>3.5.1 Definição do Tempo e Máxima Velocidade de Produção</b> .....	47
<b>3.5.2 Determinação dos Custos de Produção</b> .....	50
<b>4. RESULTADOS</b> .....	53
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	60
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61
<b>APÊNDICE A – CROQUIS</b> .....	63
<b>APÊNDICE B – TABELAS DE MAPEAMENTO DE USINAGEM</b> .....	64



## 1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de geração de energia hidrelétrica é uma das mais desenvolvidas e importantes do mundo, devido ao grande potencial hidrelétrico do país. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética do Brasil, o potencial energético do país é estimado em 172 GW, dos quais mais de 60% já foram aproveitados. Nesse cenário de competitividade e abundância energética, a indústria responsável pela fabricação de componentes para usinas buscam por soluções práticas e assertivas como referência no intuito de contemplar as expectativas de mercado.

Diante dessa premissa, de acordo com Stahl (2012), o modelo de manufatura econômica mais clássicos são modelos nos quais envolvem a microeconomia. Grande parte desses modelos são baseados na Equação de Taylor. Nesses casos, também é assumido, na grande maioria dos casos, que as velocidades de corte permanecem constantes assim como o fator limite da vida de ferramenta é progressivo e mensurado a partir do desgaste de flanco (VB).

Nesse contexto, Ferraresi (2003) apresenta uma solução numérica que descreve as condições econômicas de usinagem. Dessa forma, entende-se que a velocidade de corte para produção máxima é aquela na qual é usinado o máximo volume de cavaco. Por outro lado, a velocidade econômica de corte se relaciona com um custo de fabricação mínimo. Nos dias atuais as definições de velocidade de corte de máxima produção está mais bem definido como velocidade de corte, sendo aquela em que o tempo de produção de uma peça em um lote é mínimo (MACHADO et al, 2015).

Independentemente da metodologia, o tema relacionado a condições econômicas de usinagem mostra sempre que a velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste, conseqüentemente, sobre a vida da ferramenta. Esse fator indica que, de forma geral, para otimização da produtividade em um processo de usinagem, deve-se, a princípio, aumentar a profundidade de usinagem, na sequência, aumentar o avanço e, por fim, elevar a velocidade de corte, mas sempre atento a limitação de potência da máquina e a resistência mecânica da peça e das ferramentas. Ainda nesse contexto, como o avanço está relacionado ao

acabamento superficial, seu aumento também será limitado por esse fator (MACHADO *et al.*, 2015).

Nesse ponto, existe um valor o qual se relacionada com a menor velocidade de produção, nesse caso, é chamada de velocidade de mínimo custo ( $v_{co}$ ). Existe uma velocidade intermediária que resulta no menor tempo total para a fabricação de uma peça. Essa velocidade é conhecida como velocidade de máxima produção ( $v_{cmxp}$ ) (DINIZ *et al.*, 2014).

Dessa maneira, para determinar essa primeira faixa relacionada a velocidade de máxima produção ( $v_{cmxp}$ ), segundo Machado *et al.* (2015), faz-se necessário estabelecer cada uma das sequencias de processos baseada em parâmetros de tempo: o tempo total de usinagem de uma peça ( $t_t$ ), tempo de corte ( $t_{cp}$ ), tempo de colocação e fixação da peça ( $t_s$ ), tempo de aproximação e afastamento da ferramenta ( $t_a$ ), tempo de preparo da máquina ( $t_p$ ), tempo de troca da ferramenta ( $t_{ft}$ ) e o lote de  $Z$  peças.

$$t_t = t_{cp} + (t_s + t_a + \frac{t_p}{Z}) + (\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z}) \cdot t_{ft} \quad (1)$$

$$t_t = t_{cp} + (t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} \cdot t_{ft}) + \frac{t_c}{T} \cdot t_{ft} \quad (2)$$

Diante daquilo que Diniz *et al.* (2014) descreve tem-se que o tempo de vida das arestas ( $T$ ), também é função da velocidade de corte, segundo a Equação de Taylor (3).

$$T \cdot V_c^x = K \quad (3)$$

Assim, o tempo total de usinagem é calculado por:

$$t_t = t_{cp} + t_{imp} + t_{fp} \quad (4)$$

Os termos da equação 4 são explicitados da seguinte forma:

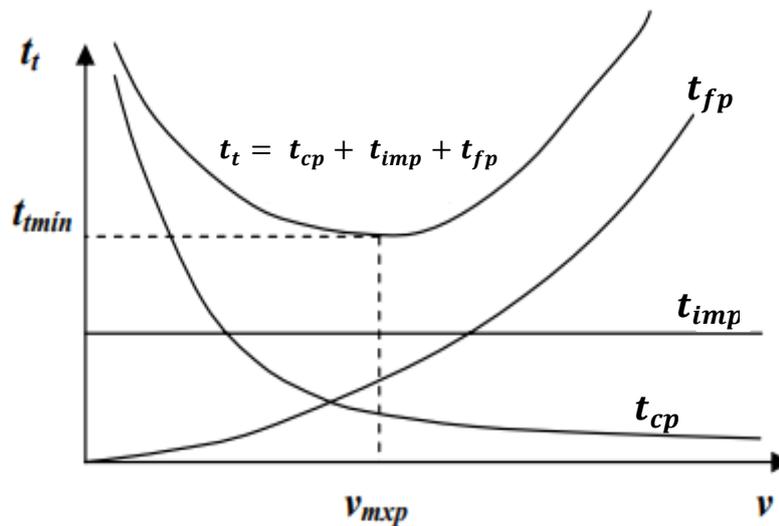
$$t_{cp} = t_c \cdot v_c^{-1} \quad (5)$$

$$t_{imp} = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \quad (6)$$

$$t_{fp} = \left( \frac{t_{ft} \cdot t_c}{K} \right) \cdot v_c^{x-1} \quad (7)$$

As parcelas acima são contextualizadas graficamente através da Figura 1, logo abaixo.

Figura 1 – Representação gráfica das parcelas de tempo.



Fonte: Adaptado de Diniz *et al* (2014).

De acordo com Machado *et al.* (2015), observa-se que a parcela do tempo improdutivo ( $t_{imp}$ ) sempre terá uma forma constante independentemente da velocidade corte. A parcela ( $t_{cp}$ ), por sua vez, apresenta um comportamento inverso em relação à velocidade de corte, de forma que diminui com o aumento da velocidade de corte. Já a terceira parcela ( $t_{fp}$ ) aumenta exponencialmente com a velocidade de corte.

Para a velocidade de máxima produção ( $v_{cmxp}$ ) e o tempo de vida da ferramenta de máxima produção ( $T_{cmxp}$ ), Diniz *et al.* (2014) apresenta conforme as duas equações abaixo.

$$V_{cmxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}} \quad (8)$$

$$T_{cmxp} = (x-1) \cdot t_{ft} \quad (9)$$

Por outro lado, para os cálculos da velocidade econômica de corte, necessita-se determinar primeiramente o custo da operação de usinagem. Segundo Diniz *et al.* (2014), os custos envolvidos em um processo produtivo podem ser tão complexos quanto se deseja, ou seja, as variáveis incluídas vão determinar a complexidade relativa aos custos de produção. A abordagem deste trabalho foca apenas nas condições de contorno relacionadas a usinagem assumindo-se, assim, as demais constantes.

Dessa maneira, as variáveis de custos são definidas por Diniz *et al.* (2014) como: Custo de usinagem de uma peça de um lote de Z peças ( $C_p$ ), Custo do corte em usinagem ( $C_c$ ), Custo de operação da máquina ( $C_{mq}$ ), Custo da ferramenta de corte ( $C_f$ ) e Custo de troca de ferramenta ( $C_{ft}$ ).

$$C_p = \left( \frac{t_{imp}}{60} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (S_h + S_{mq}) + \frac{t_c}{60} \cdot (S_h + S_{mq}) + \frac{t_{cp}}{T} \cdot \left( C_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} (S_h + S_{mq}) \right) \quad (10)$$

Como simplificação, se constituem 3 constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ :

$$C_1 = \left( \frac{t_{imp}}{60} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (S_h + S_{mq}) \quad (11)$$

$$C_2 = (S_h + S_{mq}) \quad (12)$$

$$C_3 = C_{ft} + \frac{t_{ft}}{60}(S_h + S_{mq}) \quad (13)$$

Onde:  $C_1$  = constante independente da velocidade de corte [R\$/peça]

$C_2$  = soma das despesas com mão de obra e com máquina [R\$/hora]

$C_3$  = constante de custo relativo à ferramenta

$S_h$  = custo do operador da máquina

$S_{mq}$  = custo de operação da máquina

Dessa maneira, o custo de produção se resume em:

$$C_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3 \quad (14)$$

As parcelas da equação 14 são reescritas da seguinte forma:

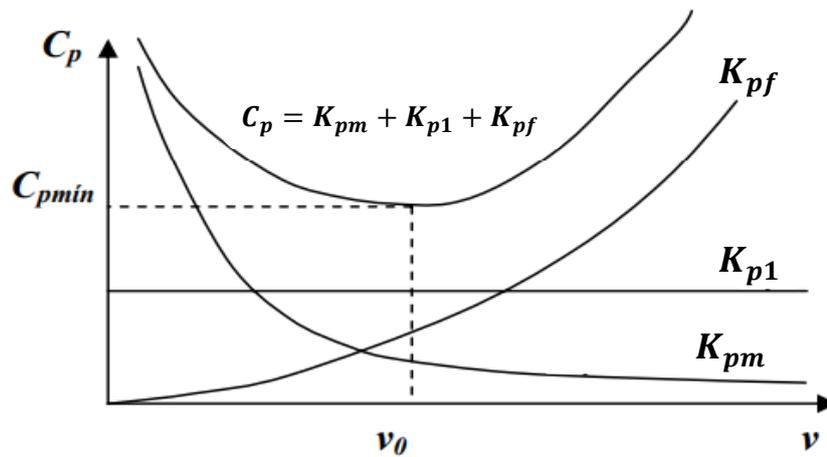
$$K_{p1} = C_1 \quad (15)$$

$$K_{pm} = \frac{t_c}{60} \cdot C_2 \quad (16)$$

$$K_{pf} = \frac{t_c}{T} \cdot C_3 \quad (17)$$

Após os termos definidos e apresentados, os mesmos podem ser representados graficamente pela Figura 2 (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 2 – Representação gráfica do custo de produção.



Fonte: Adaptado de Diniz *et al.* (2014)

Segundo Machado *et al.* (2015), as parcelas relacionadas ao custo seguem a mesma dinâmica do que já foi apresentado sobre a representação gráfica do tempo de corte. Nesse caso, se a velocidade de corte usada for muito alta, os custos de troca de ferramenta serão dominantes o que implica em um aumento do custo total. Em contrapartida, caso utilizar a velocidade de corte muito baixa, os custos de operação serão altos, o que contribui para aumentar o custo total.

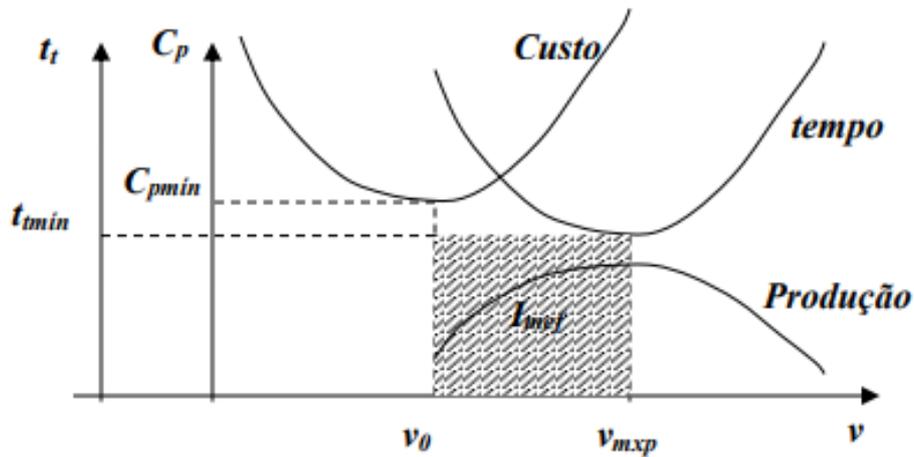
Portanto, a velocidade econômica de corte ( $v_{co}$ ), também apresentada por Diniz *et al.* (2014) é descrita na equação 14.

$$v_{co} = \sqrt[x]{\frac{K \cdot C_2}{60 \cdot (x - 1) \cdot C_3}} \quad (18)$$

Conforme abordado, a partir dos dois limites estabelecidos pelas velocidades  $v_{co}$  e  $v_{cmxp}$  tem-se o intervalo de máxima eficiência determinado. De acordo com Ferraresi (2003), o intervalo de máxima eficiência (IME) é primordial para eficiência de usinagem de uma fábrica que as operações estejam dentro do intervalo visto pela Figura 3. Em intervalos menores que a velocidade econômica de corte ( $v_{co}$ ), haverá um aumento dos custos devido a uma significativa parcela referente a longos tempos de corte, os quais são influenciados diretamente pelo custo operacional das máquinas, além de uma queda na produção. Por outro lado, caso seja utilizado velocidades acima da velocidade  $v_{cmxp}$  tem-se a influência dos custos de ferramentas

e da alta frequência de paradas referentes a trocas de ferramentas, assim como a redução da produção.

Figura 3 – Representação gráfica do IME.



Fonte: Diniz et al. (2014).

O grande ponto de atenção para analisar e determinar o intervalo de máxima eficiência está em relação as constantes da Equação de Taylor (3) as quais são obtidas através de métodos experimentais para cada par ferramenta/peça e para condições de corte constantes (MACHADO *et al*, 2015).

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver uma metodologia baseada em condições econômicas de usinagem para analisar o processo de torneamento e mandrilamento de um rotor Francis no intuito de encontrar e definir indicadores para otimizar o desempenho de usinagem.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar dados dos parâmetros de usinagem utilizados nos processos de torneamento e mandrilamento;
- Coletar tempo de usinagem de cada etapa de usinagem;
- Encontrar um tempo de vida estimado para peça/ferramenta;
- Determinar os intervalos de máxima eficiência para cada etapa de usinagem;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O presente trabalho aborda um estudo de caso de um processo fabril particular de uma empresa de usinagem pesada. No entanto, a revisão bibliográfica que será apresentada nesta seção busca discutir diversas abordagens que envolvam processos de usinagem aliado às condições econômicas.

Nesse contexto, Juan *et al.* (2003) apresenta um estudo utilizando um algoritmo construído com base em uma rede polinomial capaz de aprender as relações entre parâmetros de corte como a velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte axial e a vida útil da ferramenta por meio de uma técnica auto organizável. Nesse caminho, uma vez que o volume de remoção de material para as peças usinadas e vários componentes de tempo e custo das operações de fresamento são fornecidos, um algoritmo de otimização determina os parâmetros de corte ideais. A taxa de remoção de cavaco, a qual determina o volume de remoção de material nos componentes pode ser calculada baseada na equação 19 em operações de fresamento, mas também, pela equação 20 em processos de torneamento.

$$Q = f_c \cdot z \cdot V_c \cdot f_z \quad (19)$$

Onde:  $Q$  = taxa de remoção de cavaco [mm<sup>3</sup>/min]

$f_c$  = avanço de corte [mm/dente da fresa]

$z$  = número de dentes da fresa

$f_z$  = avanço axial ou passo da rosca [mm]

$$Q = f \cdot V_c \cdot a_p \quad (20)$$

Onde:  $f$  = avanço por volta [mm/rotação]

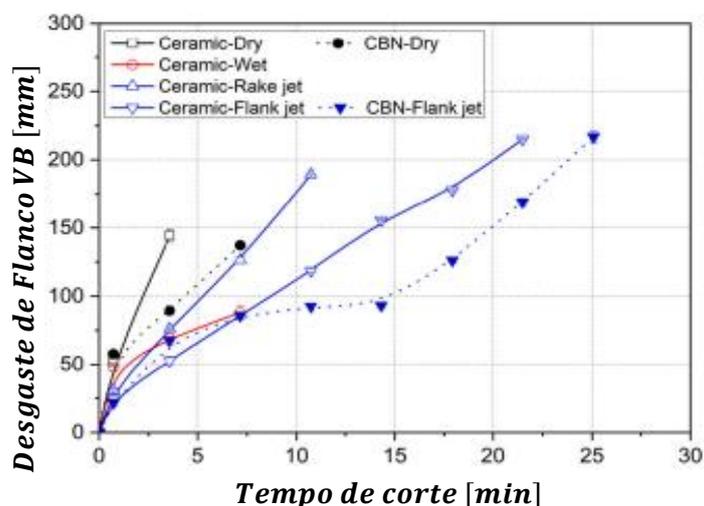
$a_p$  = profundidade de corte [mm]

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

Em uma abordagem focada no comparativo da eficiência e custo-benefício de duas máquinas CNC de 3 e 5 eixos para usinagem de uma pá de turbina feita de aço de liga EM 34CrNiMo6, Zębala *et al.* (2014) apresentam como principais parâmetros o custo de produção e o tempo de usinagem. Nesse caso, a capacidade das duas máquinas para alcançar o acabamento superficial da peça é usado como indicador, assim como a rentabilidade de cada uma delas. Se tratando de um processo produtivo, em qualquer empresa de usinagem, o planejamento e estudo de qual máquina é capaz de executar a operação das peças é essencial para que se atinja as condições propostas em um intervalo de máxima eficiência.

Outro fator importante aliado às condições econômicas de usinagem envolvem as características de corte relacionadas ao custo e tempo de vida de uma ferramenta. Kim *et al.* (2021), abordam a utilização de um método de *spray* criogênico para reduzir a temperatura de corte e melhorar a vida útil da ferramenta durante as operações de usinagem. Este estudo aponta que a vida útil da ferramenta, utilizando o método de resfriamento durante o processo de corte, reduziu o tempo total de utilização da máquina. A Figura 4, logo abaixo, apresenta as curvas dos diferentes processos analisados experimentalmente e o tempo de vida da ferramenta, considerando como critério de desgaste máximo 200  $\mu\text{m}$ .

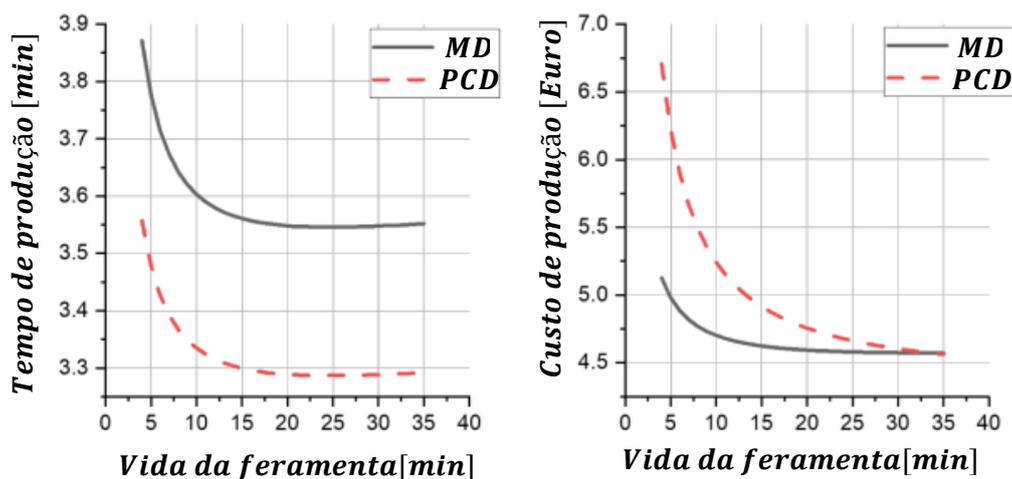
Figura 4 – Tempo de vida da ferramenta.



Fonte: Adaptado de Kim *et al.* (2021).

Por sua vez, Johansson *et al.* (2019) aborda um interessante estudo sobre a possibilidade de substituição de ferramentas livre de carboneto cimentado (MD), com a presença de cobalto e tungstênio, por insertos com a presença de diamante policristalino (PCD). Para tal, o artigo combina desempenho de corte e desempenho de produção para permitir uma avaliação abrangente de custos e para um processo de produção. Os principais parâmetros para avaliação incluem dados de corte, vida útil e custos da ferramenta, rejeições de qualidade, disponibilidade do processo, investimento em equipamentos, pessoal e instalações. Mediante a uma análise experimental em um processo de torneamento com  $a_p = 0,3$  mm e  $f = 0,12$  mm/rev, tem-se as curvas comparativas em relação ao tempo de e custo de produção pelo tempo de vida da ferramenta.

Figura 5 – Tempo e custo de produção pela vida da ferramenta.



Fonte: Adaptado de Johansson et al. (2019).

Em suma, o trabalho apresentado por Johansson et al. (2019), definem metodologia sobre como examinar o desempenho de custo das ferramentas de corte, ou seja, compreender de forma clara o que impulsiona os custos e desperdícios de tempo, impactando no trabalho diário para otimizar o volume de produção e a capacidade de produção.

Adentrando em um contexto mais próximo do que será apresentado no presente trabalho, Mashinini *et al.* (2021) utilizam uma ferramenta de corte de carbeto de tungstênio texturizado para usinar barras de aço inoxidável 316. A velocidade de

corte e a taxa de avanço na faixa de 70-170 m/min e 0,1-0,5 mm/rev, respectivamente, foram escolhidas como parâmetros de processo de entrada e, como consequência, a vida útil da ferramenta e o tempo de usinagem são considerados como respostas para os experimentos propostos. Nesse caso, fazendo o uso da Equação de Taylor é possível determinar os coeficientes  $K$  e  $x$  relacionados ao tempo de vida do par peça/ferramenta por meio de uma regressão linear.

$$T \cdot V_c^x = K \quad (21)$$

Onde:  $T$  = Tempo de Vida da ferramenta [min]

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

$x$  = constante relacionada ao coeficiente de reta

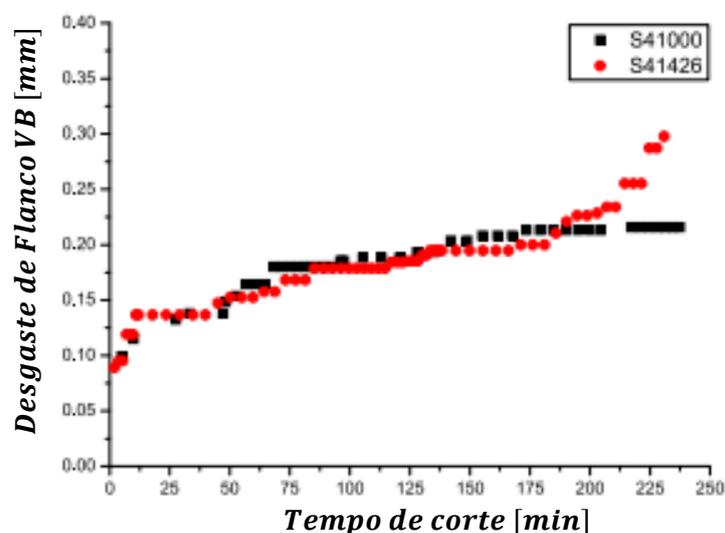
$K$  = constante relacionada a vida da ferramenta em uma determinada velocidade de corte

O presente trabalho discute de maneira mais aprofundada a utilização da Equação de Taylor para determinação das constantes  $K$  e  $x$  a partir do método de regressão linear na próxima seção. A partir disso, ainda sobre o estudo de Mashinini *et al.* (2021), o custo unitário de produção é determinado diante de suposições padrão. A investigação feita no artigo relata a vida útil máxima da ferramenta e o tempo de usinagem mínimo necessário para a remoção de metal definida.

Com o a introdução do assunto envolvendo a Equação de Taylor e a vida útil de ferramenta, Corrêa (2017) apresenta um estudo no qual foram investigados os mecanismos de desgaste presente nas superfícies de ferramentas revestidas com TiC/TiCN/TiN por CVD durante o torneamento de dois aços inoxidáveis: S41000 martensítico e S41426 supermartensítico. Nesse caso, tanto o tipo de ferramenta utilizado, assim como o aço liga S411426 apresentam características mecânicas e químicas muito similares aos materiais em estudo neste trabalho.

Assim, Corrêa (2017) realizou uma série de testes para monitorar o desgaste de flanco, o qual é apresentado pela Figura 6, em que se tem curva de evolução do desgaste no tempo em uma condição pré-determinada e controlada de usinagem.

Figura 6 – Desgaste da ferramenta para Aço S41426 e S41000.



Fonte: Adaptado de Corrêa (2017).

Para esse ensaio, mostrado pela Figura 6, o VB considerado como critério de fim de vida foi de 0,3 mm. A ferramenta utilizada por Corrêa (2017) foi uma ferramenta de metal duro com revestimento em CVD com uma camada de 2,5  $\mu\text{m}$  de TiC – TiCN – TiN no intuito de garantir melhor resistência ao desgaste.

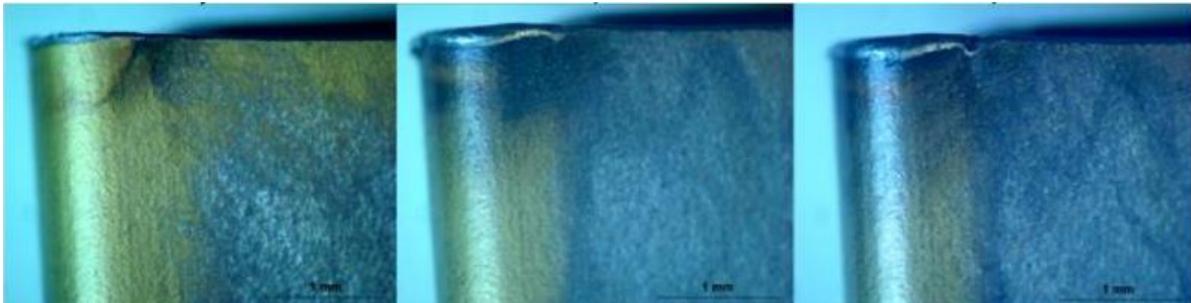
Conforme Figura 7, logo abaixo, é possível acompanhar o desgaste na fase inicial, média e final do ensaio nas condições apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de corte do ensaio.

<b>Velocidade de Corte (<math>V_c</math>)</b>	<b>Avanço (f)</b>	<b>Profundidade de Corte (<math>a_p</math>)</b>	<b>Desgaste de Flanco (VB)</b>
100,15 m/min	0,35 mm/volta	1,00 mm	0,3 mm

Fonte: Adaptado de Corrêa (2017).

Figura 7 – Evolução do desgaste da ferramenta

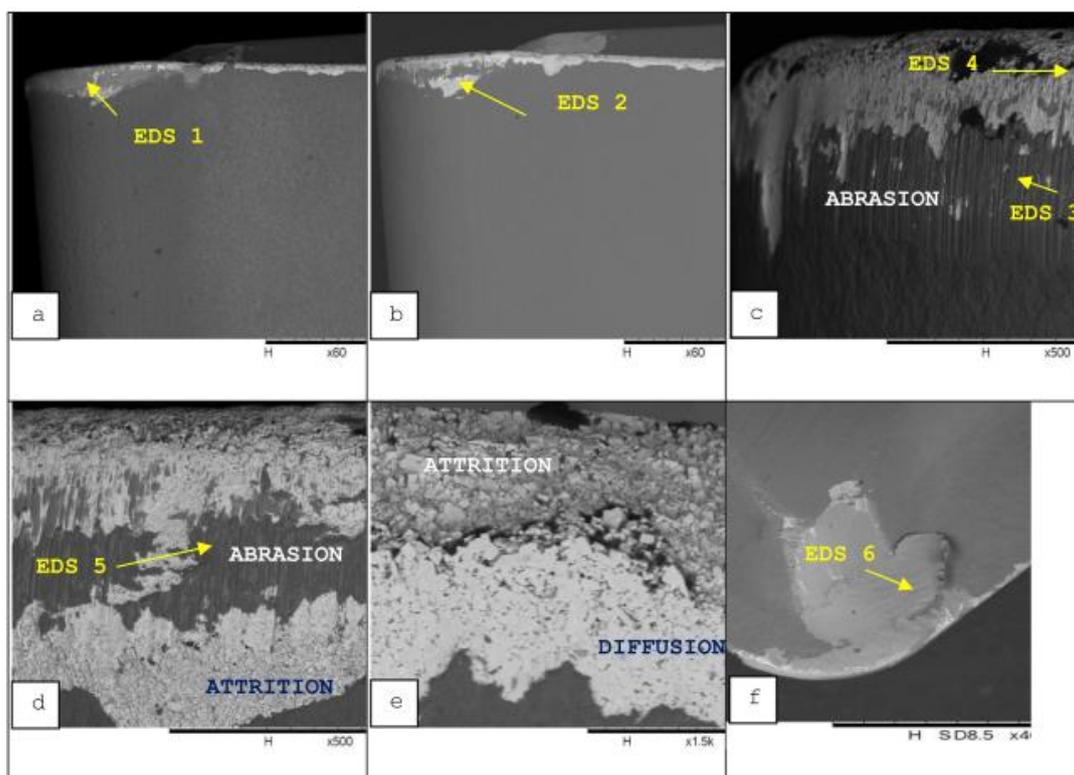


Fonte: Adaptado de Corrêa (2017).

Os resultados do estudo mostram que em altas velocidades de corte e altas profundidades de corte o aço supermartensítico apresenta uma vida de ferramenta menor em comparação ao metal martensítico. Os desgastes predominantes para o aço inoxidável supermartensítico são o atrito e a abrasão.

No caso, a Figura 8, é capaz de exemplificar a partir da microestrutura da ferramenta como é o desgaste por atrito e abrasão citado anteriormente.

Figura 8 – Condições da ferramenta de corte após usinagem do aço S41426.



Fonte: Corrêa (2017).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi realizado um estudo de caso para determinar as condições econômicas de usinagem em um processo produtivo de um Rotor Francis. Nesse contexto, fora necessário o estudo dos fatores da Equação de Taylor, K e x com o objetivo de avaliar o tempo de vida da ferramenta em razão da velocidade de corte. Para estabelecer o intervalo de máxima eficiência de cada uma das etapas de usinagem, avaliou-se os respectivos tempos de corte e determinou-se as velocidades de máxima produção e mínimo custo dentro do processo produtivo.

#### 3.1 MATERIAIS

O modelo de Rotor Francis em questão é definido como um aço inoxidável supermartensítico, designado pela ASTM (2021) como A743 CA6NM, o que indica que o material passou por um processo de tratamento térmico. Diante dessa premissa, Corrêa (2017) apresenta um estudo sobre o tempo de vida de ferramenta para uma interface peça-ferramenta específica.

Desse modo, como já introduzido na última seção, Corrêa (2017) desenvolve a caracterização de um material com propriedades mecânicas e químicas similares ao A743 CA6NM, o que possibilitou ser usado como apoio para desenvolvimento do presente trabalho. A Tabela 2, logo abaixo, mostra a composição química dos materiais.

Tabela 2 – Composição química dos materiais.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	C	Ti	Al	N
A743 CA6NM	0,06	1	1	0,04	0,03	11,5- 14,0	0,40- 1,0	3,5- 4,5	-	-	-	-
S41426	0,012	0,25	0,50	0,015	0,001	12,20	2,00	6,00	0,04	0,15	0,02	0,01

Fonte: Adaptado de ASME (2021) e CORRÊA (2014).

Além da composição química, na qual apresenta, como base comparativa, uma proximidade considerável na presença de Cromo, Níquel e Molibdênio entre as duas

ligas, se faz necessário a comparação com a dureza. Os dois parâmetros citados influenciam diretamente na interface peça-ferramenta e, dessa maneira, a Tabela 3 apresenta o comparativo entre as respectivas durezas.

Tabela 3 – Dureza.

<b>Material</b>	<b>HB (Brinell)</b>
A743 CA6NM	285
S41426	277

Fonte: Adaptado de ASME (2021) e CORRÊA (2017).

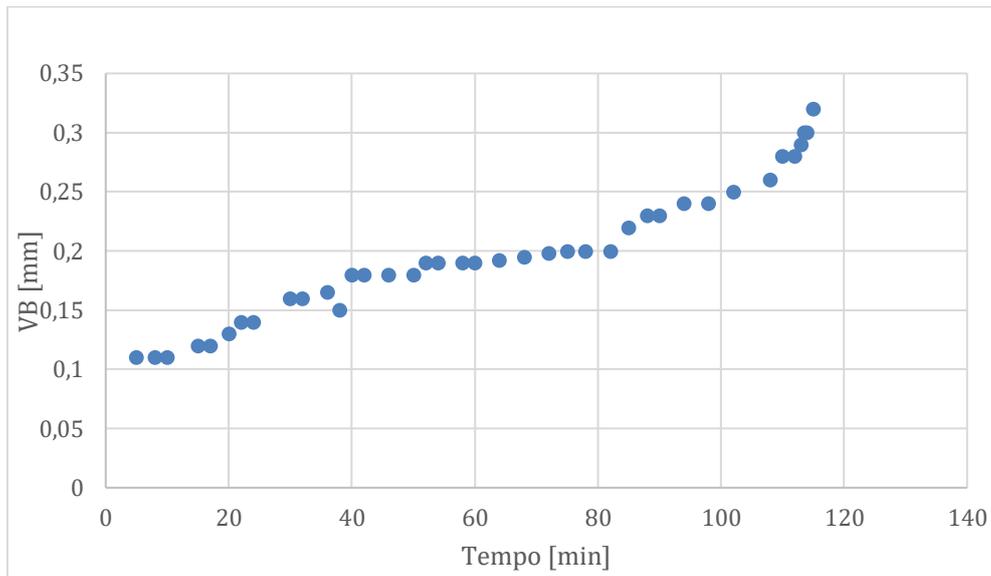
### 3.2 DEFINIÇÃO DOS COEFICIENTES DE TAYLOR

Conforme já abordado ao início deste trabalho, a definição dos coeficientes  $K$  e  $x$  na fórmula de Taylor determinados experimentalmente pelo tempo de vida da ferramenta em função da velocidade de corte, são fundamentais para determinação das condições econômicas em um processo de usinagem.

Dentro de um contexto industrial torna-se muito difícil determinar as constantes, uma vez que as mesmas são definidas para cada par ferramenta/peça a partir do desgaste da ferramenta. Dessa maneira, não há disponibilidade para acompanhar minuto a minuto de usinagem ao lado da máquina, e medir, a cada parada de rotação, o desgaste do inserto.

Assim, como já dito na Revisão de Literatura, Corrêa (2017) realizou um estudo para determinar a usinabilidade de uma liga de aço supermartensítica, no caso, o aço inoxidável S41426. Para um melhor entendimento, para a Figura 9, retirou-se a curva de evolução do desgaste no tempo, em uma condição pré-determinada e controlada de usinagem, apenas o material de interesse.

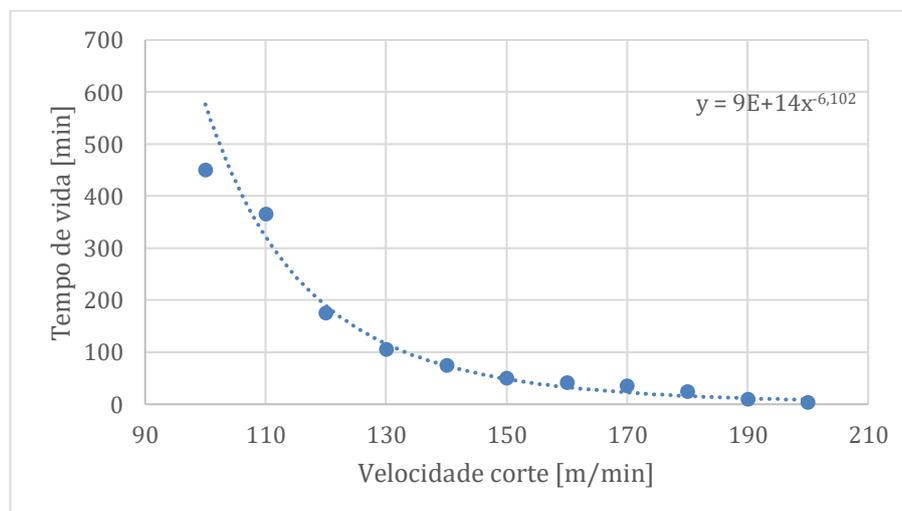
Figura 9 – Desgaste da ferramenta para aço S41426.



Fonte: Adaptado de Corrêa (2017).

Com a curva de desgaste de ferramenta em razão do tempo de vida determinada, foi aproveitado do estudo de Corrêa (2014), nesse caso, anterior à Corrêa (2017), os pontos estabelecidos em uma condição de avanço ( $f$ ) de 0,2 mm/volta e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 1,0 mm, com desgaste fixado em um VB de 0,3 mm.

Figura 10 – Tempo de vida da ferramenta em função da velocidade de corte.



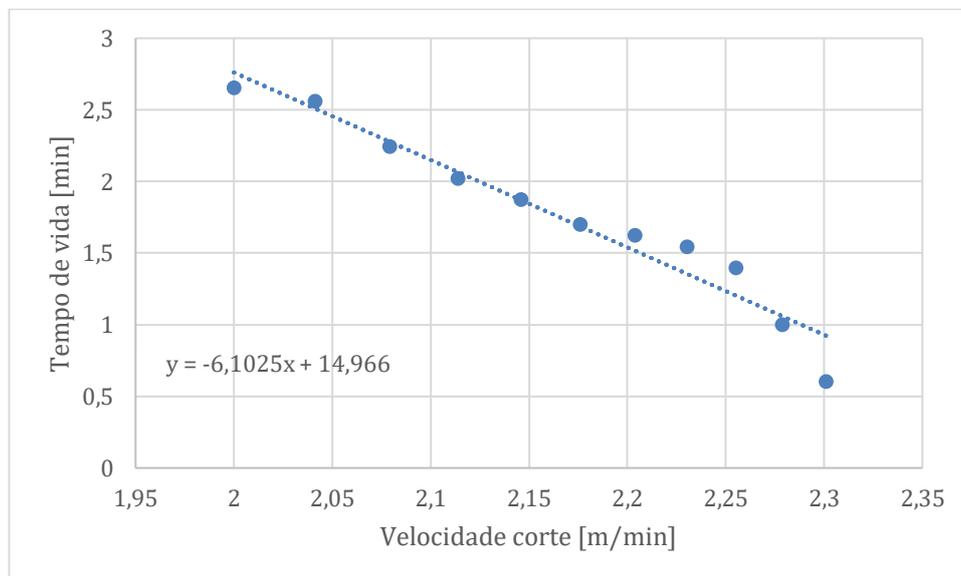
Fonte: Adaptado de Corrêa (2014).

Diante da curva acima, a partir da equação de Taylor, logo abaixo, é possível calcular os parâmetros  $x$  e  $K$  da equação de Taylor para condição de usinagem apresentada acima. Para isso, foi necessário transformar a curva em escala logarítmica no intuito de definir as constantes por um método de regressão linear

$$T = \frac{K}{V_c^x} \quad (21)$$

$$\log T = \log K - x \cdot \log V_c \quad (22)$$

Figura 11 – Curva de vida em função da velocidade de corte em escala logarítmica.



Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, a curva de tendência definida por uma regressão linear define os parâmetros  $x$  e  $K$  apresentado pela Tabela 4, abaixo.

Tabela 4 – Definição dos parâmetros  $x$  e  $K$  da Equação de Taylor.

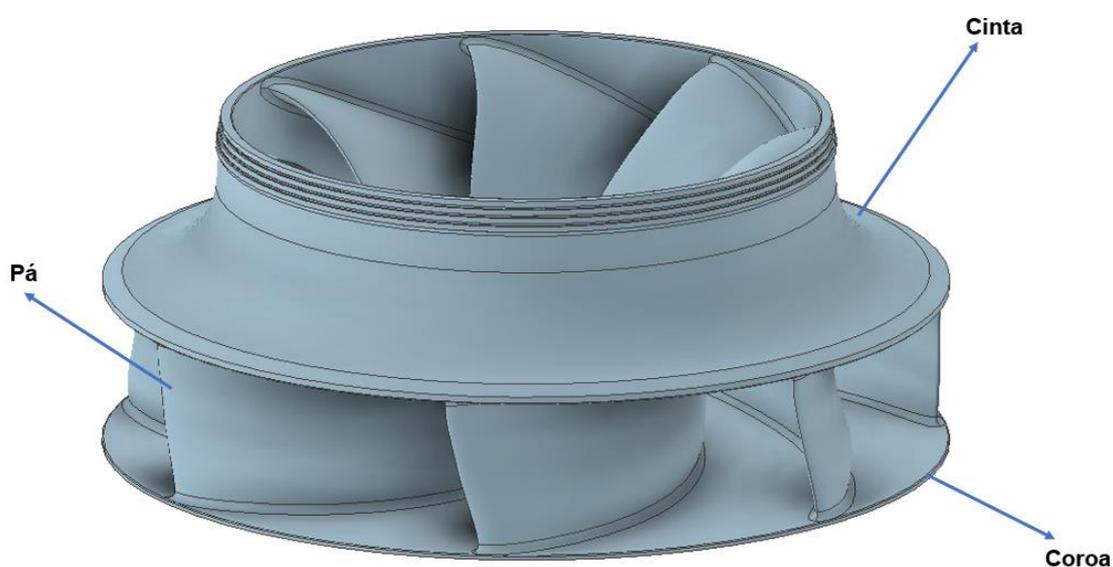
$\log K = 10^{14,96}$	$x$
$9,12 \times 10^{14}$	6,1

Fonte: Próprio Autor.

### 3.3 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS DE USINAGEM DO ROTOR

Um rotor tipo Francis é um componente rotativo fixado ao eixo da turbina e, composto por uma determinada quantidade de pás soldadas na coroa e na cinta, conforme indica a Figura 12, logo abaixo.

Figura 12 – Rotor Francis.



Fonte: Próprio Autor.

Como visto pela Figura 12, acima, o modelo de rotor o qual foi utilizado para estudo é composto por 8 pás soldadas ao longo de todo o raio interno da cinta, assim como na superfície da coroa. Para tanto, o foco deste trabalho é apenas nos principais processos de usinagem para fabricação do componente. Porém, com o propósito de facilitar o entendimento do leitor, a Figura 13 mostra o Rotor logo após a finalização da etapa de soldagem, nas medidas brutas, totalmente pronto para início do processo de torneamento.

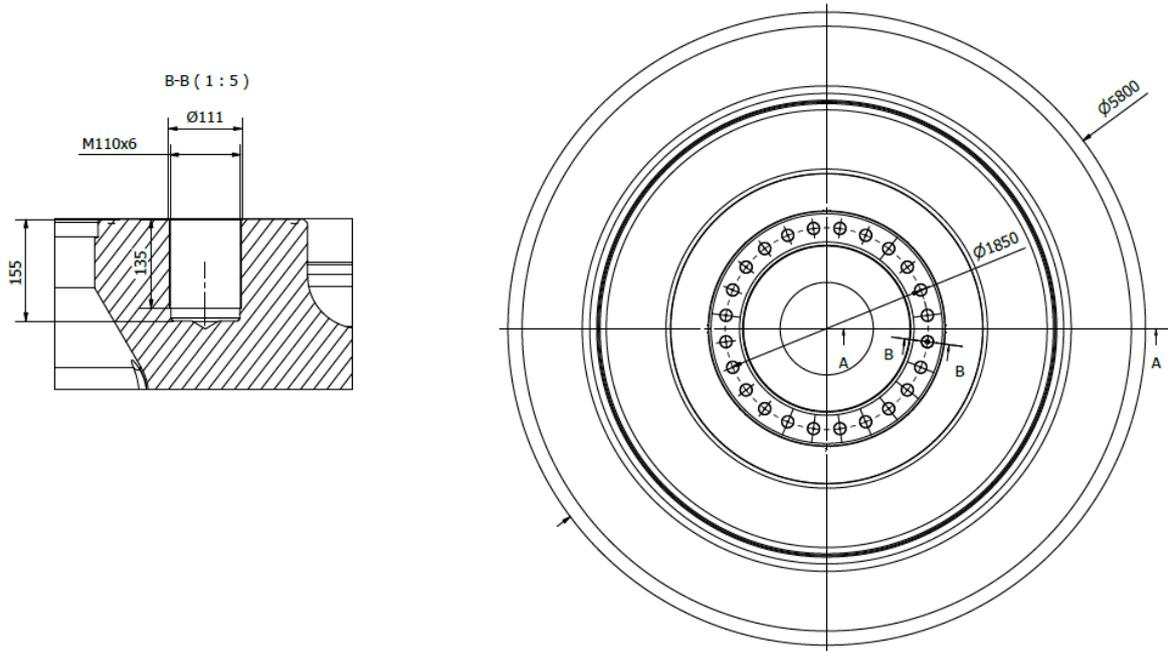
Figura 13 – Rotor Francis após etapa de soldagem.



Fonte: Próprio Autor.

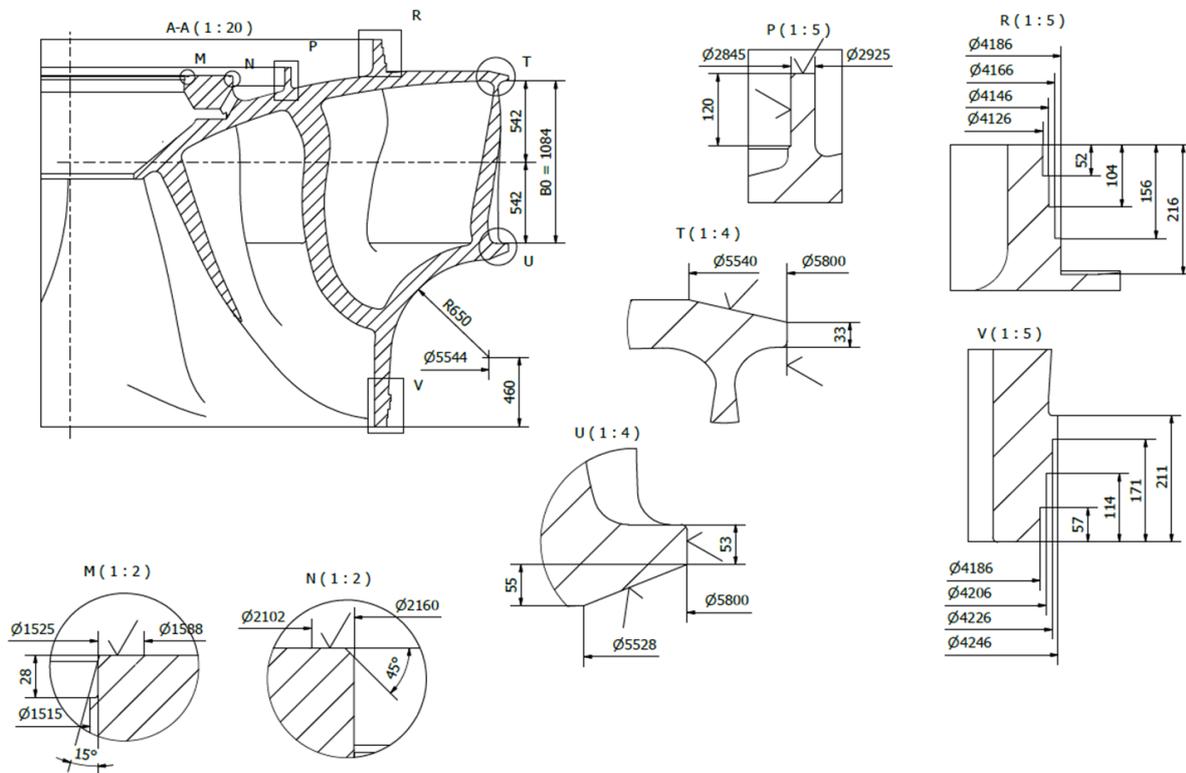
Diante da Figura 13 é válido ressaltar que todas as regiões de usinagem possuem 9 a 10 mm de sobremetal. O processo de todas as etapas de torneamento segue o mesmo desenvolvimento, nesse caso, desbaste deixando 1 mm para as etapas de acabamento. Assim, as Figuras 14 e 15 mostram os croquis com as medidas finais para as etapas de madrilamento (Etapa 2) e torneamento (Etapa 1, 3 e 4).

Figura 14 – Croqui para etapa de mandrilamento.



Fonte: Próprio Autor

Figura 15 – Croqui para etapa de torneamento.



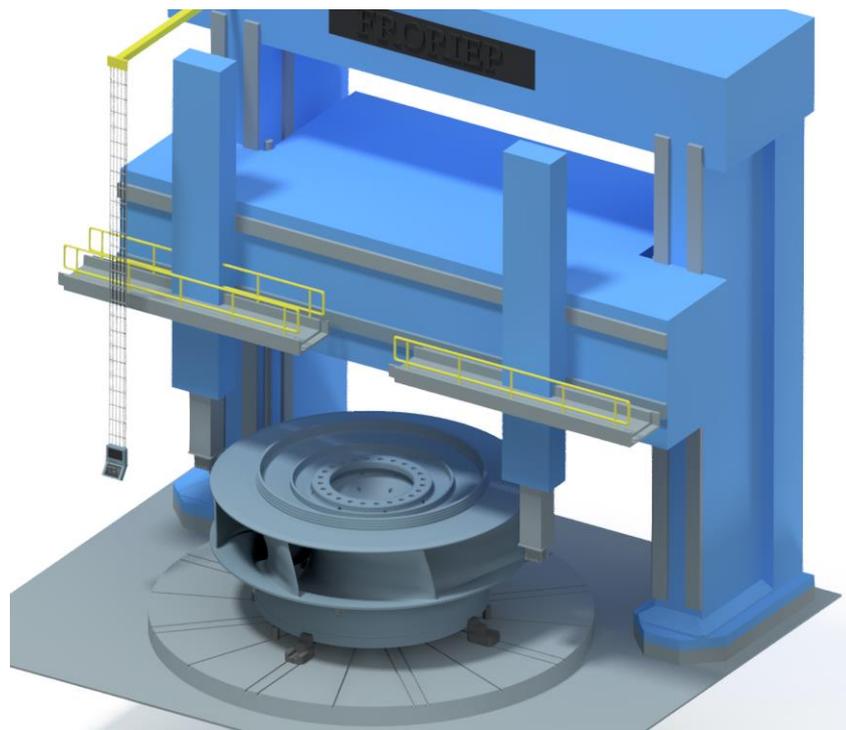
Fonte: Próprio Autor.

### 3.3.1 Usinagem de desbaste – Etapa 1

Assim, diante do que é visto pela Figura 15, a principal referência para início do torneamento é a altura indicada como “B0”, através dela que o programa CNC avança para usinagem de todas as outras medidas desta etapa.

Esse processo acontece em um torno vertical com uma placa de 6000 mm de diâmetro. A Figura 16 apresenta o modelo computacional do rotor posicionado no equipamento para o início do processo. A partir dessa referência visual fica de fácil entendimento as dificuldades em relação à essa usinagem, de forma que a altura de 2334,8 mm do componente, além do diâmetro de 5800 mm geram, principalmente, problemas de vibração os quais influenciam diretamente no acabamento final da peça.

Figura 16 – *Setup* em máquina – Etapa 1.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 17 - *Setup* em máquina – Etapa 1 (Vista Frontal).



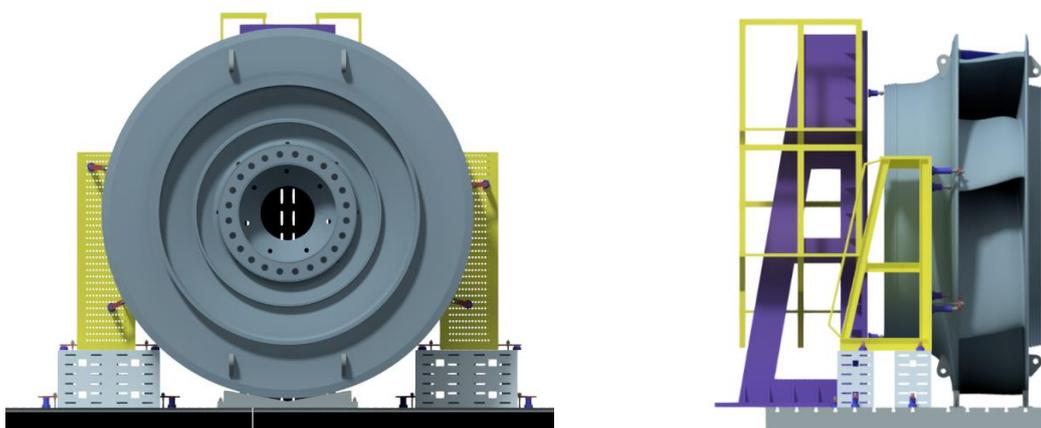
Fonte: Próprio Autor.

### 3.3.2 Usinagem de furação e roscas – Etapa 2

Na etapa de furação e rosca é utilizado uma fresa de topo em um cabeçote prolongador para abrir os 24 furos de maneira interpolada, conforme mostrado pela Figura 14.

Após abrir a furação interpolada para um diâmetro de 101 mm, tem-se início ao desbaste do diâmetro com uma fresa disco de 102 mm de diâmetro. O posicionamento da peça em mandriladora é observada pela Figura 18.

Figura 18 – *Setup* em máquina – Etapa 2.



Fonte: Próprio Autor.

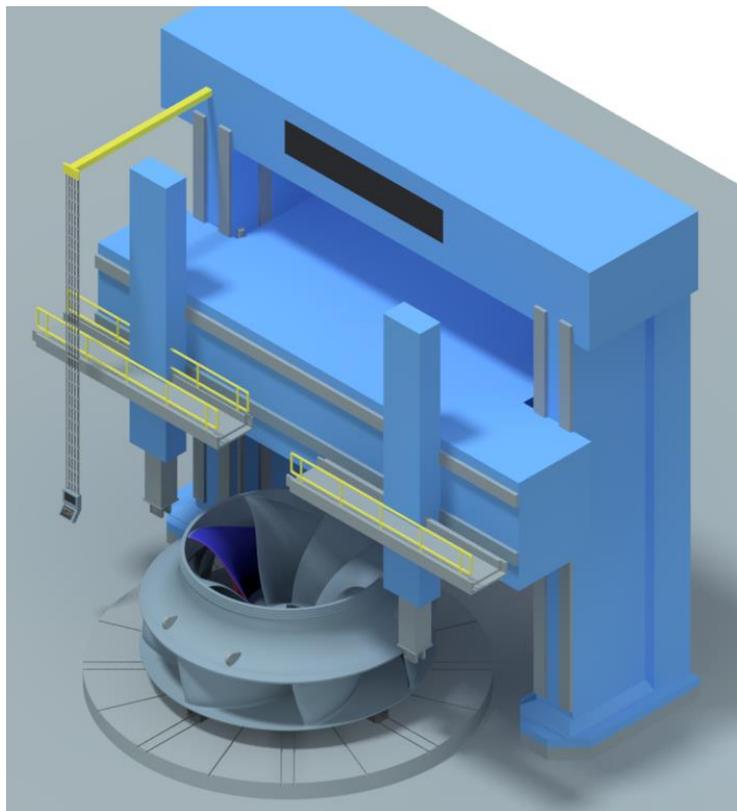
Após o mandrilamento para furação de 102mm é possível iniciar a fresamento helicoidal interpolado (FHI) para usinagem das roscas M110x6 mm.

### 3.3.3 Usinagem de Acabamento – Etapa 3

Na terceira e, penúltima etapa, a peça volta ao Torno Vertical com a cinta voltada para cima, diferentemente do que aconteceu na Etapa 1. O rotor tem suas medidas acabadas nessa etapa mediante o que indica o detalhe V da Figura 13.

Apenas para referência do leitor, a Figura 19, logo abaixo, mostra como a peça é posicionada na placa do Torno Vertical. Assim como dito na Etapa 1, as mesmas dificuldades apresentadas na primeira etapa surgem, também, no *setup* 3.

Figura 19 – *Setup* em máquina – Etapa 3.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 20 – *Setup* em máquina – Etapa 3 (Vista Frontal).



Fonte: Próprio Autor.

#### 3.3.4 Usinagem de Desbaste e Acabamento – Etapa 4

A última etapa segue a mesma referência de usinagem em relação a Etapa 1, também visto pela Figura 15. No entanto, por se tratar da última etapa todos os diâmetros os quais ficaram com sobremetal, mas foram utilizados como referência de medida e posicionamento para as Etapas 2 e 3, são desbastados e acabados.

A Figura 21, mostra a peça após todos os processos e finalizado.

Figura 21 – Rotor finalizado.



Fonte: Andritz Hydro Brasil.

### 3.4 DEFINIÇÃO DOS TEMPOS DE CORTE

#### 3.4.1 Definição do Tempo de Corte Teórico para Etapas 1, 3 e 4

Para facilitar o mapeamento e entender cada uma das etapas de uma maneira mais precisa, os tempos de corte foram subdividido por cada diâmetro usinado e depois acrescido ao tempo de corte total. Assim, a Equação 24, abaixo, demonstra como foi definido o tempo de corte para as respectivas etapas sobre o diâmetro em torneamento longitudinal.

$$t_{c1} = \left( \frac{L}{v_f} \right) \cdot p \quad (23)$$

$$t_{c1} = \left( \frac{L}{f \cdot n} \right) \cdot p \quad (24)$$

Onde:  $t_{c1}$  = tempo de corte diâmetro 1 [min]

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

$L$  = comprimento do corte [mm]

$f$  = avanço [mm/rotação]

$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d}$  [rpm]

$p$  = quantidade de passes

Além do torneamento longitudinal, também há operações de faceamento, de forma que a rotação não é constante em razão da variação do diâmetro. Para essas operações, fora estabelecido o diâmetro final ( $d_f$ ) menos o inicial ( $d_i$ ), em que a partir do diâmetro médio ( $d_m$ ) foi calculado a velocidade de corte média ( $v_{cm}$ ). Nesse caso, a velocidade média entra no cálculo da rotação ( $n$ )

Dessa maneira, o tempo total de corte é determinado pela somatória de todos os diâmetros apresentados na sub seção anterior. A Equação 25 mostra como se estabelece o somatório.

$$\sum t_{c1} + t_{c2} + \dots + t_{cn} = t_{ct} \quad (25)$$

Como método e critério de comparação, o tempo de corte determinado nas subseções 3.4.1 e 3.4.2 foram feitos, primeiramente, em um contexto teórico. Desse modo, o indicativo definido como base de comparação entre o cálculo do tempo de corte teórico e prático é a taxa de remoção de cavaco e, conseqüentemente, o volume de cavaco produzido por operação.

Analogamente ao tempo de corte, a taxa de remoção de cavaco foi calculada a cada operação e somada para definir o volume de cavaco por etapa. As equações 26, 27 e 28 exemplificam o contexto apresentado a seguir.

$$Q_{c1} = f \cdot v_c \cdot a_p \quad (26)$$

Onde:  $Q_{c1}$  = taxa de remoção de cavaco [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]

$f$  = avanço por volta [ $\text{mm}/\text{rotação}$ ]

$a_p$  = profundidade de corte [ $\text{mm}$ ]

$v_c$  = velocidade de corte [ $\text{m}/\text{min}$ ]

$$\sum Q_{c1} + Q_{c2} + \dots + Q_{cn} = Q_{ct} \quad (27)$$

$$V_t = \frac{Q_{ct}}{t_{ct}} \quad (28)$$

Onde:  $Q_{ct}$  = taxa de remoção de cavaco total [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]

$V_t$  = volume de cavaco total produzido [ $\text{mm}^3$ ]

Para tanto, as operações de desbaste e acabamento foram definidas nos parâmetros apresentados pela Tabela 5, considerando todos eles constantes em cada um dos diâmetros usinados.

Tabela 5 – Parâmetros de usinagem para cálculo teórico do torneamento.

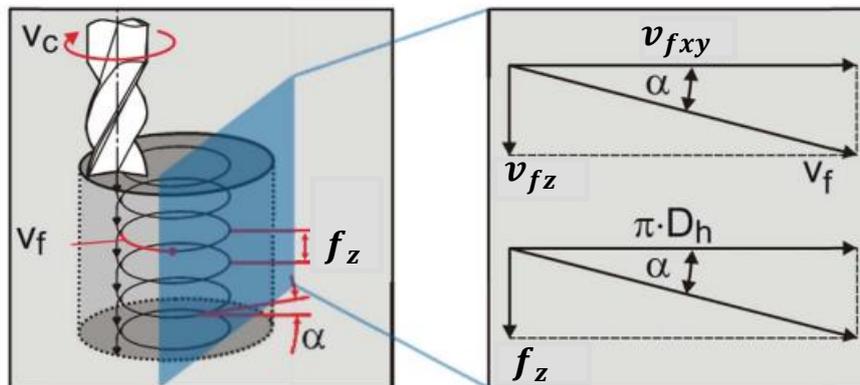
Operação	$V_c$ (m/min)	$a_p$ (mm)	$f$ (mm/rot)
Desbaste	130	1 a 4	1,6
Acabamento	150	0,3 a 0,5	0,14

Fonte: Próprio Autor.

### 3.4.2 Definição Do Tempo De Corte Teórico da Etapa 2

A Etapa 2, como já foi mencionada, tem uma particularidade sobre o tempo de corte por se tratar de um fresamento helicoidal interpolado (FHI). A cinemática do movimento pode ser descrita pela Figura 22, vista logo abaixo.

Figura 22 – Movimento cinemático do fresamento helicoidal.



Fonte: Retirado de Denkena et al. (2011).

Como a sequência de usinagem já fora explicitada, o tempo de corte é definido pelo percurso com o comprimento do furo ( $l_f$ ), o que implica assumir a velocidade do movimento axial ( $v_{fz}$ ).

$$t_{cf} = \frac{l_f}{v_{fz}} \quad (29)$$

Onde:  $t_{cf}$  = tempo de corte do fresamento [min]

$l_f$  = comprimento de corte [mm]

$v_{fz}$  = velocidade do movimento axial [mm/min]

Para determinar a Velocidade do Movimento Axial ( $v_{fz}$ ) basta utilizar a relação entre a tangente de alfa ( $\alpha$ ) e realizar as respectivas passagens mostradas abaixo.

$$tg\alpha = \frac{v_{fz}}{v_{fxy}} \quad (30)$$

Onde:  $v_{fz}$  = velocidade de avanço axial [mm/min]

$v_{fxy}$  = velocidade de avanço circular [mm/min]

Substituindo pelos vetores mostradas na Figura 22

$$tg\alpha = \frac{f_z}{\pi \cdot d_h} \quad (31)$$

Onde:  $f_z$  = avanço axial ou passo da rosca [mm]

$d_h$  = diâmetro de giro da fresa [mm]

Igualando equação (30) com a equação (31):

$$\frac{v_{fz}}{v_{fxy}} = \frac{f_z}{\pi \cdot d_h} \quad (32)$$

Sabendo que a velocidade de avanço circular ( $v_{fxy}$ ) é determinada por:

$$v_{fxy} = n \cdot f_c \cdot z \quad (33)$$

Onde:  $v_{fxy}$  = velocidade de corte circular [mm/min]

$n$  = rotação [rpm]

$f_c$  = avanço circular/dente [mm/inserto]

$z$  = quantidade de insertos

Substituindo a equação (33) em (32):

$$v_{fz} = \frac{n \cdot f_c \cdot z \cdot f_z}{\pi \cdot d_h} \quad (34)$$

Nesse caso, o diâmetro de giro da fresa é definido por:

$$d_h = D_{furo} - D_{fresa} \quad (35)$$

Onde:  $D_{furo}$  = diâmetro do furo [mm]

$D_{fresa}$  = diâmetro da fresa [mm]

Assim, substituindo a equação (35) em (34):

$$v_{fz} = \frac{n \cdot f_c \cdot z \cdot f_z}{\pi \cdot (D_{furo} - D_{fresa})} \quad (36)$$

Dessa maneira, substituindo a equação (36) na (29), o tempo de corte do fresamento helicoidal interpolado ( $t_{cf1}$ ) é:

$$t_{cf1} = \frac{l_f \cdot \pi \cdot (D_{furo} - D_{fresa})}{n \cdot f_c \cdot z \cdot f_z} \quad (37)$$

Onde:  $n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_{fresa}}$  [rpm]

$\pi = 3,14$

$d_{fresa}$  = diâmetro da fresa [mm]

Da mesma forma que foi estabelecido os tempos de corte na sub seção anterior, o tempo total soma os três processos apresentados na seção 3.3.2. A equação 38 exemplifica o contexto algebricamente.

$$\sum t_{cf1} + t_{cf2} + t_{cf3} = t_{ctf} \quad (38)$$

Logo, taxa de remoção de cavaco foi calculada para cada uma das três operações e somada para definir o volume de cavaco por etapa. As equações 39, 40 e 41 exemplificam o contexto apresentado a seguir.

$$Q_{cf1} = f \cdot v_c \cdot a_p \quad (39)$$

Onde:  $Q_{cf1}$  = taxa de remoção de cavaco do fresamento [mm<sup>3</sup>/min]

$f$  = avanço por volta [mm/rotação]

$a_p$  = profundidade de corte [mm]

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

$$\sum Q_{cf1} + Q_{cf2} + Q_{cf3} = Q_{ctf} \quad (40)$$

$$V_t = \frac{Q_{ctf}}{t_{ctf}} \quad (41)$$

Onde:  $Q_{ctf}$  = taxa de remoção de cavaco total do fresamento [mm<sup>3</sup>/min]

$V_t$  = volume de cavaco total produzido [mm<sup>3</sup>]

Para tanto, as operações de abertura do diâmetro das 24 furações, acabamento dos mesmos e usinagem das rocas foram definidas nos parâmetros apresentados pela Tabela 6, considerando todos eles constantes em cada um dos diâmetros usinados.

Tabela 6 – Parâmetros de Usinagem para Cálculo Teórico do Mandrilamento.

<b>Operação</b>	<b><math>V_c</math> (m/min)</b>	<b><math>f_z</math> (mm)</b>	<b><math>f</math> (mm/rot)</b>
Abertura do $\varnothing$	160	2	1,2
Acabamento do furo	130	2	0,12
Rosca M110x6	130	6	1,2

Fonte: Próprio Autor.

### 3.5 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES ECONOMICAS DE USINAGEM

A teoria do tema relacionado às condições econômicas de usinagem já foram apresentadas na introdução do presente trabalho, no entanto, conforme visto, os parâmetros para determinação do intervalo de máxima eficiência precisam estar estabelecidos. Assim, as próximas duas sub seções focaram em detalhar e explicar como foi determinado cada um dos critérios relacionados ao tempo e custo.

#### 3.5.1 Definição do Tempo e Velocidade de Produção Máxima

Para sequência de desenvolvimento e determinação da velocidade de corte de máxima produção ( $v_{cmxp}$ ) é fundamental determinar o tempo de produção ( $t_i$ ) em cada uma das etapas. Como as etapas foram subdividas por cada um dos diâmetros e faces usinados, o modelo matemático para definição dos parâmetros seguiu a mesma base demonstrada para o cálculo do tempo de corte total teórico.

Ainda assim, como a contabilização do desgaste da ferramenta está sendo somado a cada operação, foi necessário dividir o fator de tempo de troca de ferramenta pelo número de insertos por operação ( $n_f$ ), uma vez que, na prática essa troca será menos frequente. Válido ressaltar que cada etapa teve a quantidade de insertos contabilizados, sejam eles com arestas ou redondos. Dessa maneira, a quantidade de insertos por operação foi estimada através do total utilizado dividido pelo número de operações mapeadas.

No entanto, o tempo de corte relacionado à produção fora estabelecido em função da velocidade para que se tornasse possível aplicar uma representação

gráfica do tempo total de produção ( $t_t$ ) aliado às três curvas: o tempo de corte ( $t_{cp}$ ), tempo improdutivo ( $t_{imp}$ ) e o tempo relacionado à troca de ferramenta ( $t_{fp}$ )

Analogamente como foi definido o tempo de corte teórico na seção 3.4.1, as etapas em que há presente o torneamento cilíndrico externo longitudinal, os três termos são apresentados a seguir.

$$t_{cp} = \left( \frac{L \cdot \pi \cdot d}{f \cdot 1000} \right) \cdot v_c^{-1} \quad (42)$$

$$t_{imp} = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z \cdot n_f} \quad (43)$$

$$t_{fp} = \left( \frac{t_{ft} \cdot L \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot K \cdot n_f} \right) \cdot v_c^{x-1} \quad (44)$$

$$t_t = t_{cp} + t_{imp} + t_{fp} \quad (45)$$

Onde:  $t_s$  = fixação, inspeção e retirada da peça

$t_a$  = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta

$t_p$  = tempo de preparo da máquina

$t_{ft}$  = tempo de troca de ferramenta

$Z$  = lote de  $Z$  peças

$n_f$  = número de ferramenta por operação

Dessa mesma maneira, o tempo de corte total relacionado a produção na etapa de mandrilamento, similar a somatória de cada diâmetro e comprimento de corte definidos na seção 3.4.2, é descrita conforme as equações 46, 47 e 48 abaixo.

$$t_{cp} = \left( \frac{l_f \cdot \pi^2 \cdot (D_{furo} - D_{fresa}) \cdot D_{fresa}}{1000 \cdot f_c \cdot z \cdot f_z} \right) \cdot v_c^{-1} \quad (46)$$

$$t_{imp} = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z \cdot n_f} \quad (47)$$

$$t_{fp} = \left( \frac{t_{ft} \cdot l_f \cdot \pi^2 \cdot (D_{furo} - D_{fresa}) \cdot D_{fresa}}{1000 \cdot f_c \cdot z \cdot f_z \cdot K \cdot n_f} \right) \cdot v_c^{x-1} \quad (48)$$

Após definir o modelo analítico que determina a curva de tempo de produção em um determinado intervalo de velocidade de corte, foram definidos os valores das constantes apresentadas acima pela Tabela 7.

Tabela 7 – Definição das constantes de tempo de produção.

Parâmetro	Valores	Unidade
Tempo fixação inspeção e retirada da peça ( $t_s$ )	240	[min]
Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta ( $t_a$ )	2	[min]
Tempo de preparo da máquina ( $t_p$ )	60	[min]
Tempo de troca de ferramenta ( $t_{ft}$ )	40	[min]
Lote Z de peças	4	[-]
Quantidade de insertos por operação – Etapa 1 ( $n_{f1}$ )	2,5	[-]
Quantidade de insertos por operação – Etapa 2 ( $n_{f2}$ )	2	[-]
Quantidade de insertos por operação – Etapa 3 ( $n_{f3}$ )	2,2	[-]
Quantidade de insertos por operação – Etapa 4 ( $n_{f4}$ )	1,6	[-]

Fonte: Próprio Autor.

Para sequência do estudo, os tempos de produção, relacionados aos respectivos termos já citados, foram tabelados para serem usados de base na definição dos resultados. Assim, a Tabela 8, abaixo, discrimina esses valores.

Tabela 8 – Tempo de produção de cada etapa em função de  $v_c$ .

<b>Etapa</b>	$t_{cp}(v_c^{-1})$	$t_{imp}$	$t_{fp}(v_c^{x-1})$
1	27076,41	255,75	1,47E-10
2	62345,28	255,33	4,43E-10
3	178229,07	254,5	1,93E-09
4	83069,41	256	3,60E-10

Fonte: Próprio Autor.

### 3.5.2 Determinação dos Custos de Produção

Os custos aliados a produção estão relacionados à velocidade econômica de corte ( $v_{co}$ ). Como já foi descrito, uma parte considerável dos custos de usinagem dependem, em especial, da velocidade de corte. Dessa maneira, há 3 constantes que estabelecem esta relação, nesse caso,  $C_1$  é independente da velocidade de corte,  $C_2$  aponta as despesas com mão de obra e com máquina e  $C_3$  indica o custo relativo à ferramenta.

No mesmo contexto da última sub seção, para a modelagem de torneamento cilíndrico externo, os termos de Custo de Produção são apresentados na sequência pelas equações 49, 50 e 51.

$$K_{p1} = C_1 \quad (49)$$

$$K_{pm} = \left( \frac{C_2 \cdot L \cdot \pi \cdot d}{f \cdot 6000} \right) \cdot v_c^{-1} \quad (50)$$

$$K_{pf} = \left( \frac{C_3 \cdot L \cdot \pi \cdot d}{f \cdot 1000 \cdot K} \right) \cdot v_c^{x-1} \quad (51)$$

Os termos dos custos de produção atrelados a etapa de mandrilamento seguem a mesma metodologia das sequencias anteriores, assim, as equações logo abaixo apresentam de maneira explícita a modelagem. No entanto, conforme já dito na seção 3.5.1, como o desgaste da ferramenta é somado ao final de cada etapa, torna-se necessário dividir o fator de tempo de troca de ferramenta em razão do número de insertos por operação.

$$K_{p1} = C_1 \quad (52)$$

$$K_{pm} = \left( \frac{C_2 \cdot l_f \cdot \pi^2 \cdot (D_{furo} - D_{fresa}) \cdot D_{fresa}}{6000 \cdot f_c \cdot z \cdot f_z} \right) \cdot v_c^{-1} \quad (53)$$

$$K_{pf} = \left( \frac{C_3 \cdot l_f \cdot \pi^2 \cdot (D_{furo} - D_{fresa}) \cdot D_{fresa}}{1000 \cdot f_c \cdot z \cdot f_z \cdot K \cdot n_f} \right) \cdot v_c^{x-1} \quad (54)$$

A partir do custo de produção em um determinado intervalo de velocidade de corte, foi definido os valores das constantes apresentadas acima pela Tabela 9.

Tabela 9 – Definição das constantes de tempo de produção.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Salário do operador ( $S_h$ )	35,00	[R\$/hora]
Custo total da máquina ( $S_m$ )	350,00	[R\$/hora]
Custo de Aquisição de um porta ferramenta ( $V_{si}$ )	2600,00	[R\$]
Número de arestas de corte ( $N_s$ )	4,00	[-]
Custo de Aquisição de ferramenta	650,00	[R\$]
Lote de Z peças	4,00	[-]
C1	1544,81	[R\$/hora]
C2	385,00	[R\$/hora]
C3	682,08	[R\$]
Quantidade de inserto por operação – Etapa 1 ( $n_{f1}$ )	2,5	[-]
Quantidade de inserto por operação – Etapa 2 ( $n_{f2}$ )	2	[-]
Quantidade de inserto por operação – Etapa 3 ( $n_{f3}$ )	2,2	[-]
Quantidade de inserto por operação – Etapa 4 ( $n_{f4}$ )	1,6	[-]

Fonte: Próprio Autor.

Para sequência do estudo, os custos de produção, também foram tabelados para serem usados de base na definição dos resultados. Assim, a Tabela 10 discrimina esses valores.

Tabela 10 – Custo de produção de cada etapa em função de  $v_c$ .

<b>Etapa</b>	$K_{pm}(v_c^{-1})$	$K_{p1}$	$K_{pf}(v_c^{x-1})$
1	173740,33	682,08	2,00E-08
2	400048,89	682,08	4,60E-08
3	1143636,56	682,08	1,32E-07
4	533028,69	682,08	6,13E-08

Fonte: Próprio Autor.

## 4 RESULTADOS

A fim de entender o comportamento das pastilhas utilizadas durante os processos de usinagem, foi feita uma análise da micro estrutura de superfícies desses insertos após a finalização de todas as etapas de torneamento. Para isso, foi utilizado o equipamento para medição óptica 3D do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, o *Alicona InfiniteFocus SL*.

As imagens obtidas mostram o grau de desgaste de algumas pastilhas, em que na grande maioria apresentam desgaste de cratera, muito provavelmente proveniente do processo de usinagem sem o uso de fluido refrigerante. No entanto, torna-se difícil afirmar pois não houve um acompanhamento diário do desgaste da ferramenta em razão da velocidade de corte. As figuras abaixo exemplificam em detalhe as arestas em demarcadas em regiões que houveram o tipo de desgaste citada.

Figura 23 – Inseto utilizado para desbaste e medição óptica 3D.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Inserto utilizado para acabamento e medição óptica 3D.



Fonte: Próprio Autor.

Diante dos resultados obtidos das análises micro estruturais de algumas ferramentas utilizadas, no caso, inserto de metal duro com revestimento CVD e uma camada de TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN em que uma foi para desbaste pesado (Figura 23) e a outra para acabamento (Figura 24), os próximos resultados estão focados no desempenho de usinagem e definição do intervalo de máxima eficiência em cada uma das 4 etapas.

Como fora explicado durante o desenvolvimento deste trabalho, para facilitar o mapeamento do processo de usinagem por completo as etapas foram divididas por *setup* da peça na máquina.

Conforme abordado na seção 3.4, os tempos de corte ( $t_c$ ) foram determinados a partir da velocidade de corte ( $v_c$ ) constante para o cálculo teórico, no entanto, devido as limitações relacionadas a rotação máxima, fixação da peça, o operador da máquina define os parâmetros de corte em razão da rotação. Por se tratar de diâmetros não usuais dentro do contexto da usinagem leve convencional, para atingir as velocidades de corte teóricas sugeridas pelo fornecedor de ferramenta, a rotação definida pelo operador seria maior do que a capacidade máxima da máquina.

Diante desse fator limitante, foram feitos uma coleta de dados a partir de informações fornecidas pelos torneiros e mandriladores a respeito dos parâmetros utilizados em cada um dos segmentos usinados nas 4 etapas. Somente assim foi

possível fazer um contraponto entre os tempos de corte determinados pelos programas CN e os reais utilizados na prática.

Dessa maneira, a Tabela 11, logo abaixo, introduz os valores teóricos calculados para o tempo de corte e volume de cavaco produzido, assim como os resultados obtidos após o acompanhamento das etapas de usinagem.

Tabela 11 – Comparativo de usinagem teórico e prático do Rotor Francis.

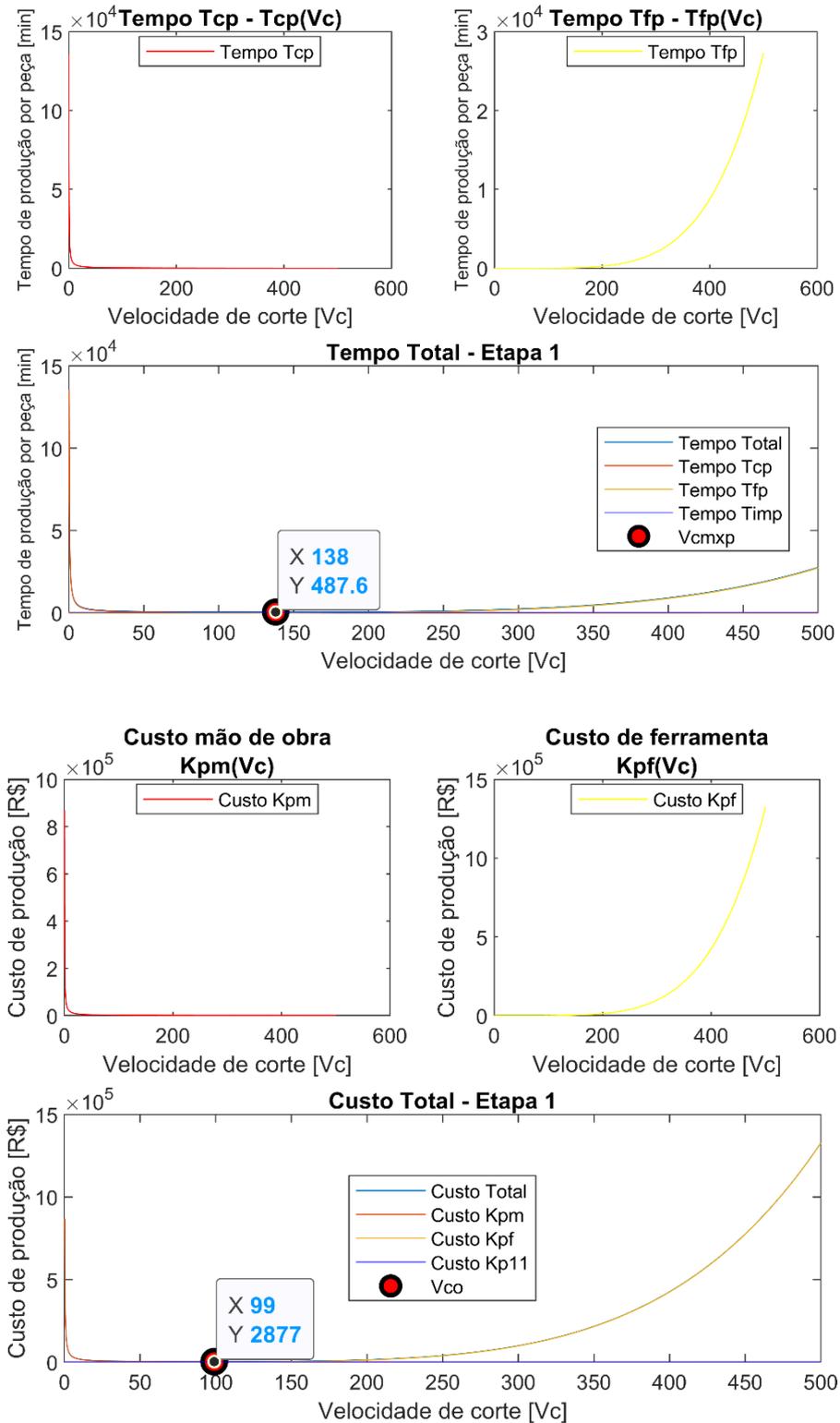
<b>Tempo de Usinagem total</b>				
<b>Etapa</b>	<b>Teórico</b>		<b>Prático</b>	
	<b>Tempo [horas]</b>	<b>Volume de cavaco [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>Tempo [horas]</b>	<b>Volume de cavaco [mm<sup>3</sup>]</b>
1	23,77	1133801,45	25,66	1133801,45
2	7,10	199810,29	14,46	199810,29
3	38,26	71127,74	40,72	71127,74
4	18,69	27801,58	35,05	27801,58
<b>Total</b>	<b>87,82</b>	<b>1432541,06</b>	<b>115,88</b>	<b>1432541,06</b>

Fonte: Próprio Autor.

Como os diâmetros para o cálculo do tempo teórico e prático são iguais, o volume de cavaco necessariamente deve apresentar valores iguais. Nesse caso, esse parâmetro garante uma maior segurança na forma de analisar e validar os dados obtidos através do mapeamento prático de usinagem. As horas de torneamento e mandrilamento práticas apresentaram um resultado 32% maior em relação aos cálculos teóricos, justamente pelo fato que em muitas operações a rotação utilizada nas operações práticas foram mais baixas em relação a teoria.

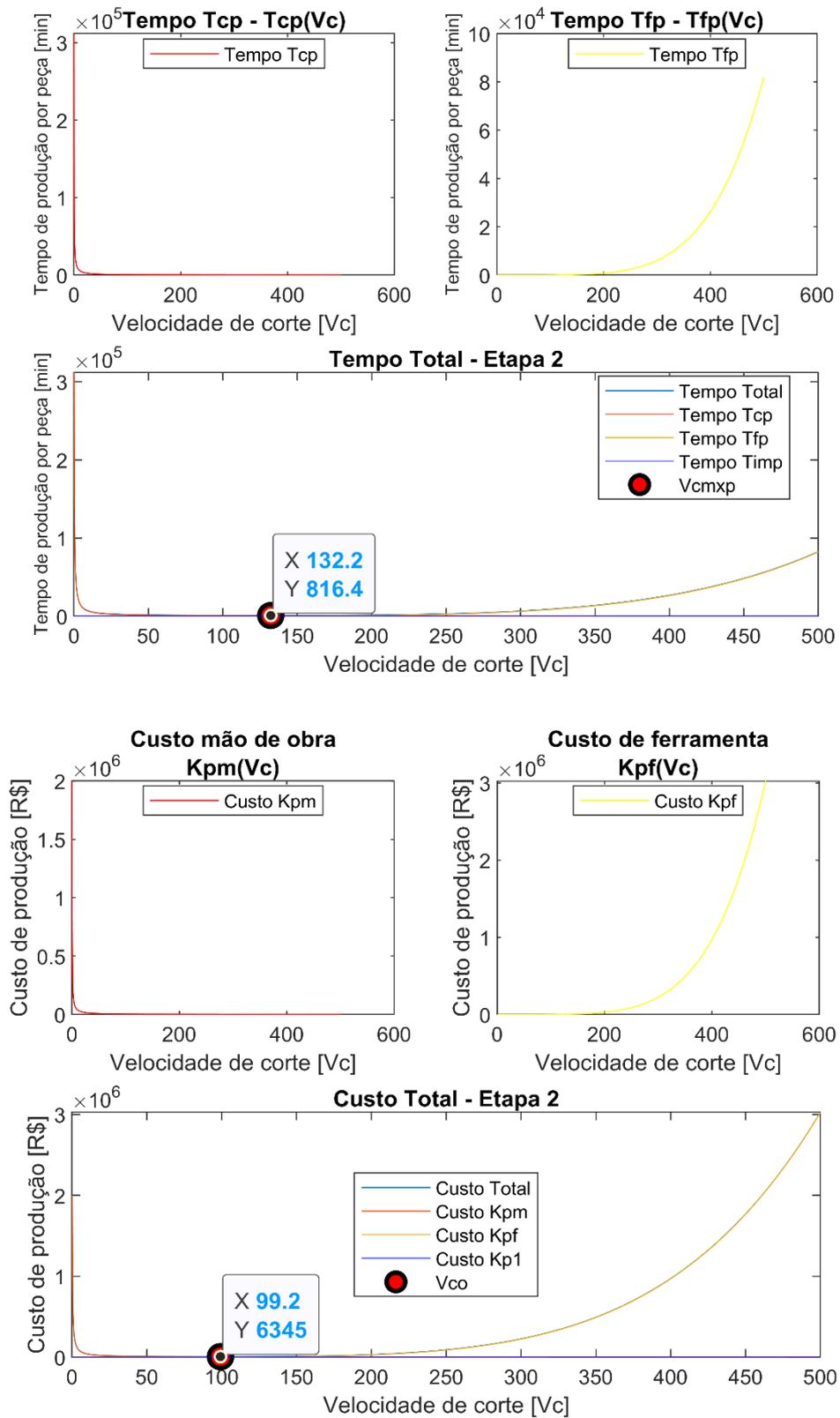
Tendo em vista o que foi desenvolvido na seção 3.5, através dos dados explicitados pelo tempo de produção de cada etapa em função de  $v_c$  (Tabela 8) e custos, também em função de  $v_c$  (Tabela 10), foi possível determinar, através do *Matlab*®, as curvas de tempo e custo de produção para cada uma das 4 etapas.

Figura 25 – Tempo e custo de produção para etapa 1.



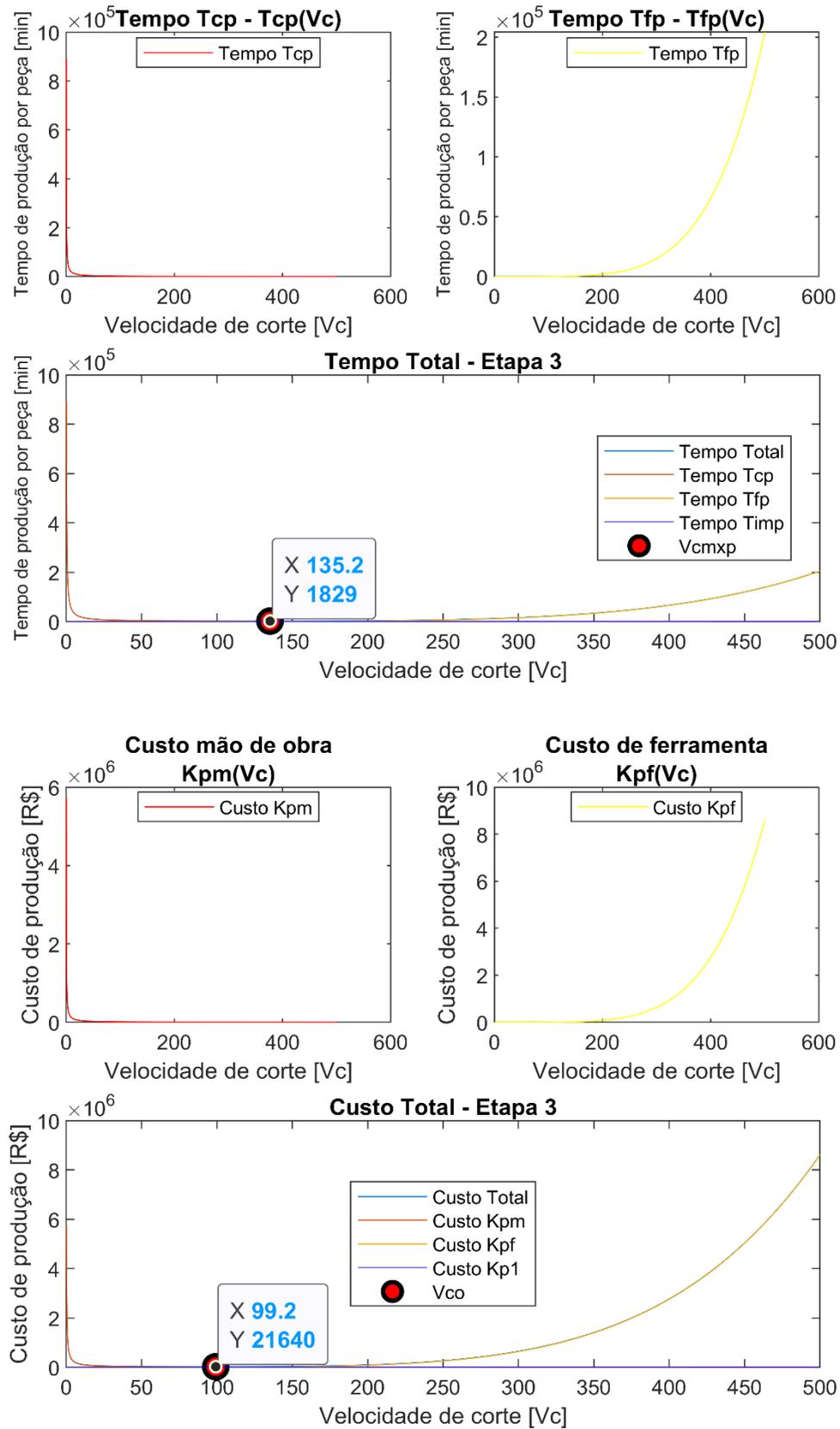
Fonte: Próprio Autor.

Figura 26 – Tempo e custo de produção para etapa 2.



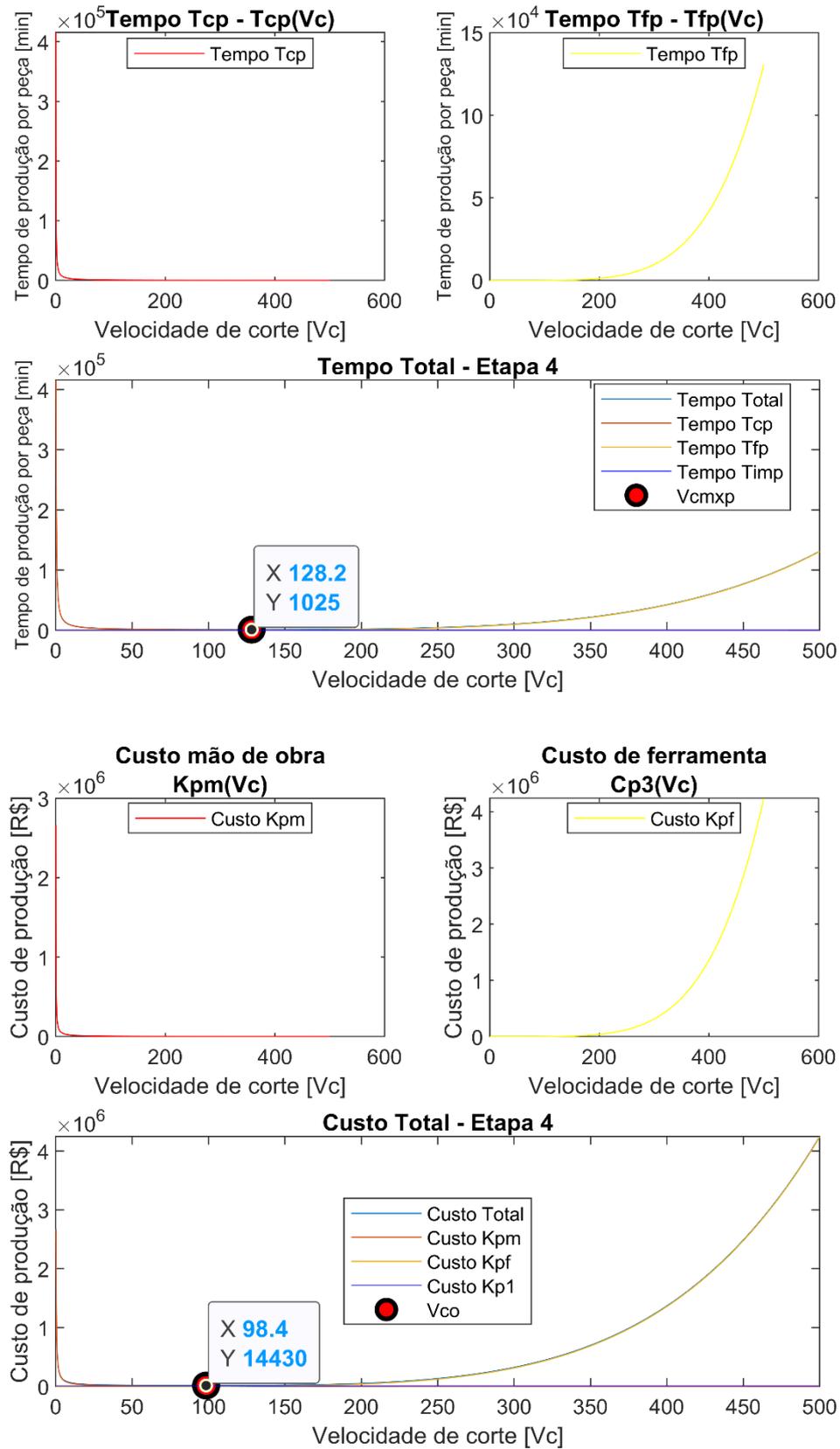
Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Tempo e custo de produção para etapa 3.



Fonte: Próprio Autor.

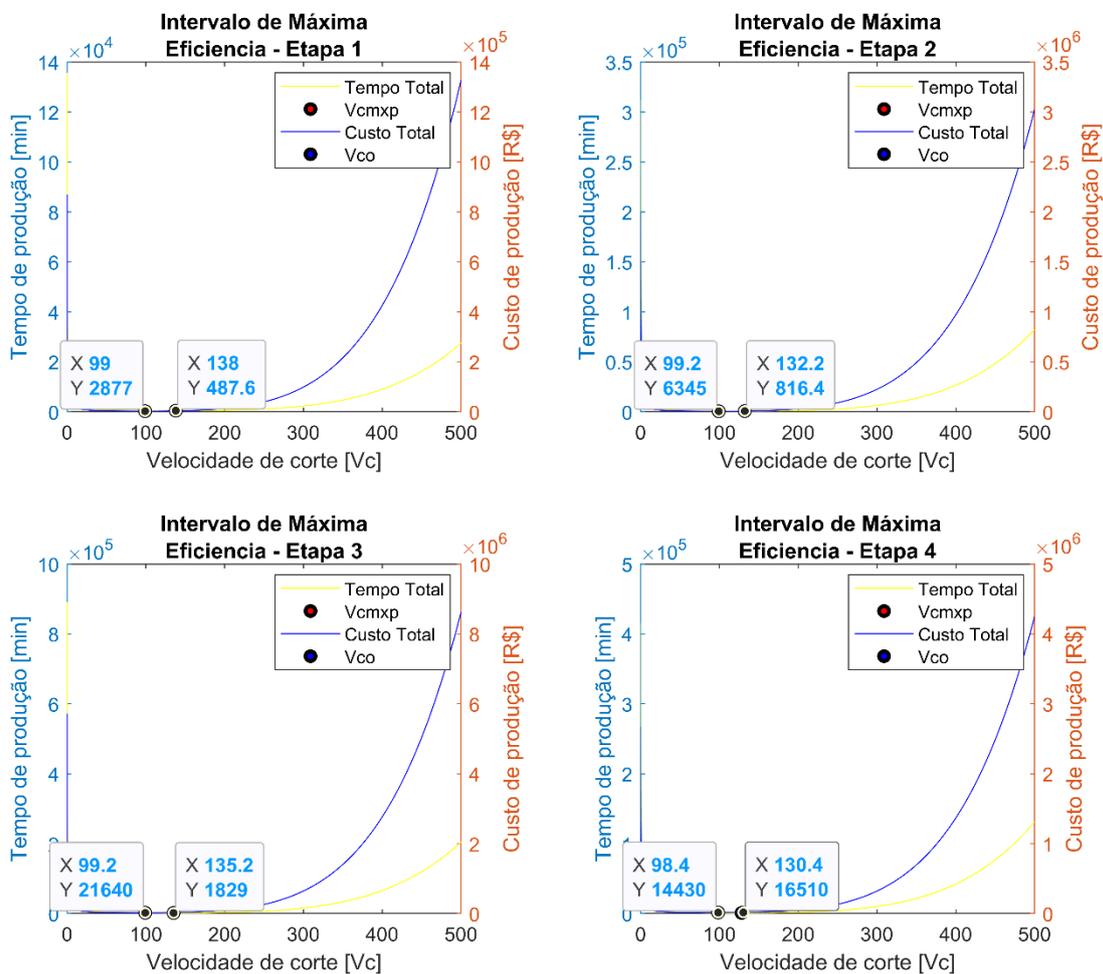
Figura 28 – Tempo e custo de produção para etapa 4.



Fonte: Próprio Autor.

Nesse caso, dado os gráficos que apresentam a velocidade de máxima produção e velocidade econômica de corte, define-se o intervalo de máxima eficiência para as 4 etapas. Como para o cálculo das constantes relacionadas ao tempo e custo foram considerados as quantidades de insertos utilizados por *setup*, cada uma delas apresentou faixas de máxima eficiência diferentes. A Figura 27, abaixo, a região determinada.

Figura 29 – Intervalo de máxima eficiência nas 4 etapas.



Fonte: Próprio Autor.

As tabelas contidas no Apêndice B explicita todos os valores teóricos das velocidades de corte em cada um dos segmentos das etapas do processo produtivo,

além das velocidades mapeadas após o estudo de caso. Dessa maneira, foi possível posicionar cada uma das velocidades de corte programadas e efetivas e, assim, pela Tabela 12, quantificar a porcentagem das velocidades durante todo o processo que estiveram dentro do intervalo de máxima eficiência de usinagem (IME).

Tabela 12 – Comparativo final das velocidades de corte posicionadas no IME.

<b>Etapa</b>	<b><math>V_{co}</math> [m/min]</b>	<b><math>V_{cmxp}</math> [m/min]</b>	<b><math>V_{cteórico}</math> posicionadas no IME [%]</b>	<b><math>V_{cprático}</math> posicionadas no IME [%]</b>
1	99,03	138,04	100,00	85,71
2	99,20	132,20	66,67	33,33
3	99,27	135,17	50,00	50,00
4	98,37	128,29	0,00	42,85

Fonte: Próprio Autor.

A porcentagem de valores posicionados no IME, apresentados na Tabela 12, foram calculados em relação a quantidade de operações dentro do IME, descritas nas tabelas do apêndice B, pela quantidade total de operações de usinagem. Nesse contexto, é interessante ressaltar que o intervalo de máxima eficiência exclui na etapa 4 os valores sugeridos, pelas fabricantes de ferramentas, para as velocidades de corte em operações desbaste e acabamento. Isso acontece pois cada processo de usinagem tem diferentes particularidades, além dos custos envolvidos variarem de uma empresa para outra.

Ainda sobre a verificação de cada uma das operações executadas, a partir dos valores que estão fora do intervalo de máxima eficiência, foi possível mapear quais estavam tendo maior impacto no custo de produção ou no tempo de produção dentro de cada uma das etapas. A Tabela 13, explicita esses valores de forma clara.

Tabela 13 – Impacto das velocidades de corte fora do IME.

<b>Etapa</b>	<b>Quantidade de operações fora do IME</b>	<b>V<sub>cprático</sub> abaixo de v<sub>co</sub> [%]</b>	<b>V<sub>cprático</sub> acima de v<sub>cmxp</sub> [%]</b>
1	2	14,29	0,00
2	2	66,67	0,00
3	3	0,00	50,00
4	10	56,25	6,25

Fonte: Próprio Autor.

## 5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados é possível perceber que a metodologia desenvolvida estabeleceu uma visão analítica sobre o impacto das etapas de usinagem no ciclo produtivo do Rotor Francis. Nesse caso, em três etapas do processo, os intervalos menores que a velocidade econômica de corte ( $v_{co}$ ), impactam em um aumento dos custos devido a uma significativa parcela referente a longos tempos de corte, os quais são influenciados diretamente pelo custo operacional das máquinas, além de uma queda na produção.

Apenas em uma etapa que a maior influência está relacionada às velocidades acima da máxima produção ( $v_{cmxp}$ ), o que acarreta nos custos de ferramentas e na alta frequência de paradas referentes a trocas das mesmas, assim como a redução da produção.

Outro ponto importante de ser abordado é sobre a possibilidade de os operadores determinarem os parâmetros em máquina de acordo com a preparação técnica fornecida pela empresa e experiência durante a usinagem, o que, de fato, influencia positivamente na produtividade. Nesse caso, foi constatado que essa variável, em questão, se mostrou mais assertiva em 50% das etapas de produção e nas duas que esteve abaixo, manteve uma diferença máxima, em comparação com as velocidades teóricas, de 33%.

Em suma, a metodologia desenvolvida se mostrou eficaz na forma de avaliar o impacto de usinabilidade da liga de aço A743 CA6NM nos custos e tempo de produção inserido em um contexto industrial. Nesse caso, a utilização do conceito de condições econômicas de usinagem pode ser de alto valor a um processo de produção seriado, uma vez que nem sempre altas velocidades de corte vão acelerar e melhorar o desempenho da usinagem, seja visando custo ou tempo e vice versa.

## REFERÊNCIAS

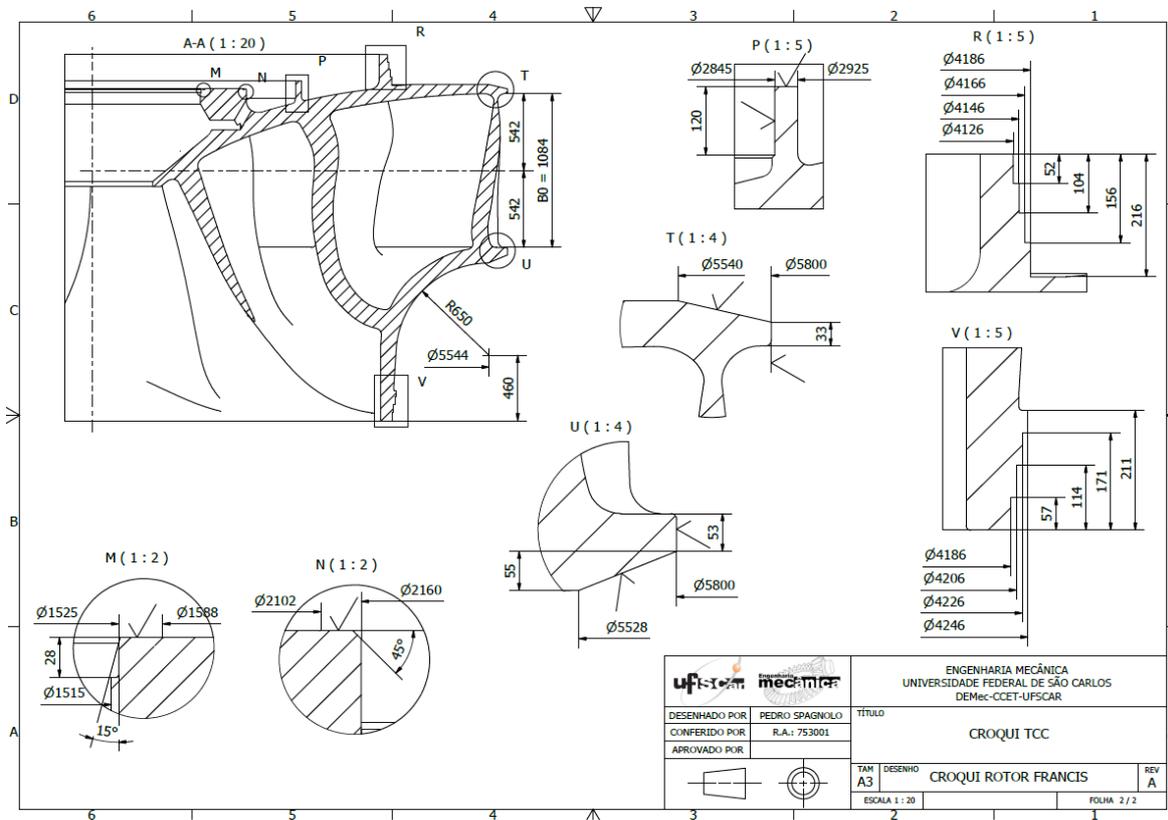
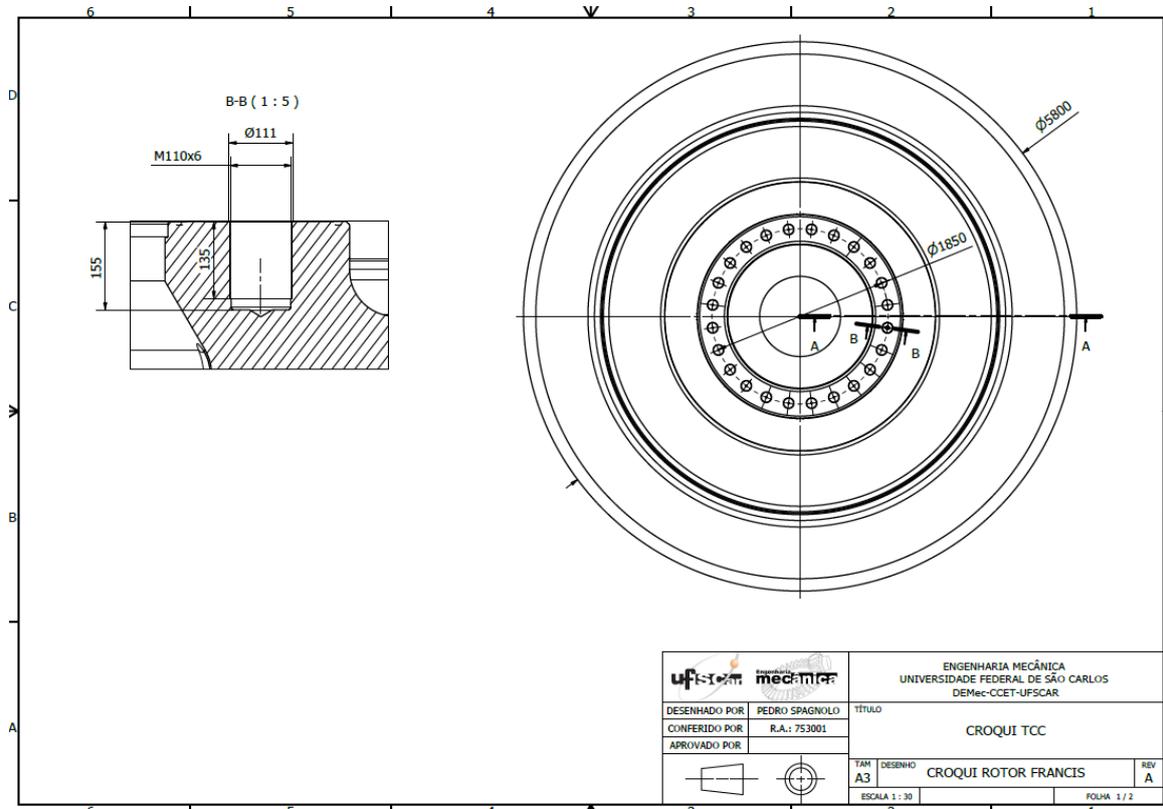
- CORRÊA, J. **Usinabilidade de aços inoxidáveis martensíticos aplicados na indústria de petróleo**. 2014. 213 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- CORRÊA, Janaina Geisler et al. Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels. **Tribology International**. Uberlândia, p. 102-117. jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.035>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9 ed. São Paulo: Editora Artliber, 2014, 272 p.
- DENKENA, B. *et al.* Helical milling of CFRP - titanium layer compounds. **CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology**. Garbsen, p. 64-69. dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.09.009>. Acesso em: 21 fev. 2023
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 11 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003, 751p.
- JOHANSSON, D. *et al.* Assessment of Metal Cutting Tools using Cost Performance Ratio and Tool Life Analyses. **Procedia Manufacturing**. Lund, p. 816-823. jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.114>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- JUAN, H. *et al.* The optimal cutting-parameter selection of production cost in HSM for SKD61 tool steels. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture: Design Research and Application**. Yunlin, p. 679-686. jan. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00038-5). Acesso em: 21 fev. 2023.
- KIM, D. M. *et al.* Tool wear, economic costs, and CO2 emissions analysis in cryogenic assisted hard-turning process of AISI 52100 steel. **Sustainable Materials And Technologies**. Ulsan, p. 1-14. dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00349>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- MACHADO, A. L; ABRÃO, A. M; COELHO, R. T; SILVA. M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015, 371 p.
- MASHININI, P.M. *et al.* Design and optimum process parameters for unique production cost. **Materialstoday: Proceedings**. Johannesburg, p. 578-581. mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.348>. Acesso em: 21 fev. 2023.

STAHL, J. E. **Metal cutting theories and models**. 1 ed. Suécia: Editora Elanders, 2012, 580 p.

Zębala, W. *et al.* Comparative study of 3- and 5-axis CNC centers for free-form machining of difficult-to-cut material. **International Journal Of Production Economics**. Toronto, p. 345-358. dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.08.006>. Acesso em: 21 fev. 2023.

## APÊNDICE A – CROQUIS

Figura A.1 – Croqui com dimensões Finais do Rotor Francis



Fonte: Próprio Autor.

## APÊNDICE B – TABELAS DE MAPEAMENTO DE USINAGEM

Tabela B.1 – Parâmetros de Corte Teórico de Desbaste da Coroa.

Desbaste								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passe	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
1	130,00	7,12	5809,00	33,00	4,00	1,60	3,50	11,58
2	130,00	7,12	5809,00	53,00	4,00	1,60	3,50	18,60
3	130,00	7,30	5670,00	260,00	16,00	1,60	3,50	356,26
4	130,00	7,31	5663,00	273,00	15,00	1,60	3,50	350,26
5	130,00	9,86	4195,60	191,00	12,00	1,60	5,00	145,24
6	130,00	14,57	2840,00	120,00	4,00	1,60	2,50	20,59
7	130,00	14,29	2895,00	100,00	2,00	1,60	2,50	8,75
8	130,00	19,16	2160,00	635,00	2,00	1,60	5,00	41,43
9	130,00	26,59	1556,50	105,00	2,00	1,60	5,00	4,94
10	130,00	7,45	5553,00	1021,02	3,00	1,60	4,00	256,90
11	130,00	9,84	4206,20	175,40	2,00	1,60	2,50	22,29
12	130,00	9,75	4246,20	211,00	14,00	1,60	4,00	189,45
	<b>Tempo de usinagem [horas]</b>							<b>23,77</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.2 – Remoção de Cavaco Teórica por Operação (Etapa 1).

Desbaste		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
1	728,00	8431,27
2	728,00	13541,14
3	728,00	259354,81
4	728,00	254987,20
5	1040,00	151052,73
6	520,00	10706,55
7	520,00	4547,46
8	1040,00	43090,08
9	1040,00	5134,38
10	832,00	213743,56
11	520,00	11588,82
12	832,00	157623,44
	<b>TOTAL</b>	<b>1133801,45</b>

Fonte: Próprio Autor

Tabela B.3 – Parâmetros de Corte Prático de Desbaste da Coroa.

Desbaste								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passe	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
1	127,75	7,00	5809,00	33,00	4,00	1,60	3,50	11,79
2	127,75	7,00	5809,00	53,00	4,00	1,60	3,50	18,93
3	124,69	7,00	5670,00	260,00	16,00	1,60	3,50	371,43
4	124,54	7,00	5663,00	273,00	15,00	1,60	3,50	365,63
5	105,45	8,00	4195,60	191,00	12,00	1,60	5,00	179,06
6	107,07	12,00	2840,00	120,00	4,00	1,60	2,50	25,00
7	109,14	12,00	2895,00	100,00	2,00	1,60	2,50	10,42
8	81,43	12,00	2160,00	635,00	2,00	1,60	5,00	66,15
9	58,68	12,00	1556,50	105,00	2,00	1,60	5,00	10,94
10	122,12	7,00	5553,00	1021,02	3,00	1,60	4,00	273,49
11	132,14	10,00	4206,20	175,40	2,00	1,60	2,50	21,93
12	133,40	10,00	4246,20	211,00	14,00	1,60	4,00	184,63
	<b>Tempo de usinagem [horas]</b>							<b>25,66</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.4 – Remoção de Cavaco Prática por Operação (Etapa 1).

Desbaste		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
1	715,38	8431,27
2	715,38	13541,14
3	698,26	259354,81
4	697,40	254987,20
5	843,58	151052,73
6	428,26	10706,55
7	436,56	4547,46
8	651,44	43090,08
9	469,43	5134,38
10	781,55	213743,56
11	528,57	11588,82
12	853,75	157623,44
	<b>TOTAL</b>	<b>1133801,45</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.5 – Parâmetros Teórico de Corte para Rosca M110x6.

Interpolação $\varnothing 102$ mm										
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_m$ (mm)	$D_f$ (mm)	Facas	$L_f$ (mm)	$f_z$ (mm)	$f_c$ (mm/ins.)	$f$ (mm/rot)	T (min/furo)
1	160,00	795,77	64,00	102,0	4,00	155,0	2,00	0,30	1,20	9,69
	Tempo de usinagem [horas] - 24 furos									<b>3,88</b>
Mandrilamento $\varnothing 104$										
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_m$ (mm)	$D_f$ (mm)	Facas	$L_f$ (mm)	$f_z$ (mm)	$f_c$ (mm/ins.)	$f$ (mm/rot)	T (min/furo)
2	130,00	397,89	-	104,0	4,00	155,0	2,00	0,03	0,12	3,25
	Tempo de usinagem [horas] - 24 furos									<b>1,30</b>
Execução rosca M110 x 6										
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_m$ (mm)	$D_f$ (mm)	Facas	$L_f$ (mm)	$f_z$ (mm)	$f_c$ (mm/ins.)	$f$ (mm/rot)	T (min/furo)
3	130,00	646,57	64,00	110,0	4,00	155,0	6,00	0,30	1,20	4,81
	Tempo de usinagem [horas] - 24 furos									<b>1,92</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.6 – Remoção de Cavaco Teórica por Operação (Etapa 2).

Interpolação $\varnothing 102$ mm		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
1	384,00	3720,45
	<b>TOTAL</b>	<b>89290,71</b>
Mandrilamento $\varnothing 104$		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
2	31,20	101,28
	<b>TOTAL</b>	<b>2430,84</b>
Execução rosca M110 x 6		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
3	936,00	4503,70
	<b>TOTAL</b>	<b>108088,75</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.7 – Parâmetros Prático de Corte para Rosca M110x6.

Interpolação $\varnothing 102$ mm										
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_m$ (mm)	$D_f$ (mm)	Facas	$L_f$ (mm)	$f_z$ (mm)	$f_c$ (mm/ins.)	$f_n$ (mm/rot)	T (min)
1	100,50	500,0	64,0	102,0	4,0	155,0	2,0	0,30	1,20	15,42
	Tempo de usinagem [horas] - 24 furos									<b>6,17</b>
Mandrilamento $\varnothing 104$										
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_m$ (mm)	$D_f$ (mm)	Facas	$L_f$ (mm)	$f_z$ (mm)	$f_c$ (mm/ins.)	$f_n$ (mm/rot)	T (min)
2	81,60	250,0	-	104,0	4,00	155,0	2,0	0,03	0,12	5,17
	Tempo de usinagem [horas] - 24 furos									<b>2,07</b>
Execução rosca M110 x 6										
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_m$ (mm)	$D_f$ (mm)	Facas	$L_f$ (mm)	$f_z$ (mm)	$f_c$ (mm/ins.)	$f_n$ (mm/rot)	T (min)
3	40,20	200,0	64,0	110,0	4,00	155,0	6,00	0,30	1,20	15,56
	Tempo de usinagem [horas] - 24 furos									<b>6,22</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.8 – Remoção de Cavaco Teórica por Operação.

Interpolação $\varnothing 102$ mm		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
1	241,27	3720,45
	<b>TOTAL</b>	<b>89290,71</b>
Mandrilamento $\varnothing 104$		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
2	19,60	101,28
	<b>TOTAL</b>	<b>2430,84</b>
Execução rosca M110 x 6		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
3	289,53	4503,70
	<b>TOTAL</b>	<b>108088,75</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.9 – Parâmetros Teórico de Corte Etapa 3.

Desbaste								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
1	130,00	7,45	5553,0	1021,0	1	1,60	2,50	85,63
2	130,00	9,84	4206,2	175,4	1	1,60	2,50	11,14
3	130,00	9,75	4246,2	211,0	1	1,6	2,50	13,53
<b>Tempo de usinagem [horas]</b>								<b>1,84</b>
Acabamento								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
4	150,00	8,60	5553,0	1021	2	0,14	0,3	1696,38
5	150,00	11,35	4206,2	175,4	2	0,14	0,3	220,74
6	150,00	11,24	4246,2	211	2	0,14	0,3	268,07
<b>Tempo de usinagem [horas]</b>								<b>36,42</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.10 – Remoção de Cavaco Teórica por Operação (Etapa 3).

Desbaste		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
1	520,00	44529,91
2	520,00	5794,41
3	520,00	7036,76
<b>TOTAL</b>		<b>57361,08</b>
Acabamento		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
4	6,30	10687,18
5	6,30	1390,66
6	6,30	1688,82
<b>TOTAL</b>		<b>13766,66</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.11 – Parâmetros Prático de Corte Etapa 3.

Desbaste								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
1	122,12	7,00	5553,0	1021,0	1	1,60	2,50	91,16
2	118,93	9,00	4206,2	175,4	1	1,60	2,50	12,18
3	120,06	9,00	4246,2	211,0	1	1,60	2,50	14,65
<b>Tempo de usinagem [horas]</b>								<b>1,97</b>
Acabamento								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
4	139,56	8,00	5553,0	1021,0	2	0,14	0,30	1823,25
5	145,36	11,00	4206,2	175,4	2	0,14	0,30	227,79
6	146,74	11,00	4246,2	211,0	2	0,14	0,30	274,03
<b>Tempo de usinagem [horas]</b>								<b>38,75</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.12 – Remoção de Cavaco Prático por Operação (Etapa 3).

Desbaste		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
1	488,47	44529,91
2	475,71	5794,41
3	480,23	7036,76
<b>TOTAL</b>		<b>57361,08</b>
Acabamento		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
4	5,86	10687,18
5	6,1	1390,66
6	6,16	1688,82
<b>TOTAL</b>		<b>13766,66</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.13 – Parâmetros Teórico de Corte Etapa 4.

Desbaste								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
1	130,00	7,13	5806,0	33,00	2,00	1,60	1,00	5,79
2	130,00	7,13	5806,0	33,00	2,00	1,60	1,00	5,79
3	130,00	7,13	5800,0	10,00	2,00	1,60	1,00	1,75
4	130,00	9,86	4195,6	191,00	2,00	1,60	1,00	24,21
5	130,00	14,57	2840,0	120,00	2,00	1,60	1,00	10,29
6	130,00	14,31	2892,0	100,00	2,00	1,60	1,00	8,74
7	130,00	19,16	2160,0	635,00	2,00	1,60	1,00	41,43
8	130,00	27,26	1518,0	105,00	2,00	1,60	1,00	4,81
<b>Tempo total de usinagem [horas]</b>								<b>1,71</b>
Acabamento								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
9	150,00	8,22	5809,0	33,00	2,00	0,14	0,30	57,36
10	150,00	8,22	5809,0	33,00	2,00	0,14	0,30	57,36
11	150,00	8,23	5800,0	10,00	2,00	0,14	0,30	17,35
12	150,00	11,38	4195,6	191,00	2,00	0,14	0,30	239,77
13	150,00	16,81	2840,0	120,00	2,00	0,14	0,30	101,97
14	150,00	16,49	2895,0	100,00	2,00	0,14	0,30	86,62
15	150,00	22,10	2160,0	635,00	2,00	0,14	0,30	410,38
16	150,00	31,45	1518,0	105,00	2,00	0,14	0,30	47,69
<b>Tempo total de usinagem [horas]</b>								<b>16,97</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.14 – Remoção de Cavaco Teórico por Operação (Etapa 4).

Desbaste		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )
1	208,00	1203,85
2	208,00	1203,85
3	208,00	364,42
4	208,00	5035,09
5	208,00	2141,31
6	208,00	1817,10
7	208,00	8618,02
8	208,00	1001,48
<b>TOTAL</b>		<b>21385,11</b>
Acabamento		
OPERAÇÃO	Q (mm <sup>3</sup> /min)	V(mm <sup>3</sup> )

9	6,30	361,34
10	6,30	361,34
11	6,30	109,33
12	6,30	1510,53
13	6,30	642,39
14	6,30	545,69
15	6,30	2585,41
16	6,30	300,44
	<b>TOTAL</b>	<b>6416,47</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.15 – Parâmetros Prático de Corte Etapa 4.

Desbaste								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
1	109,44	6,00	5806,00	33,00	2,00	1,60	1,00	6,88
2	109,44	6,00	5806,00	33,00	2,00	1,60	1,00	6,88
3	109,33	6,00	5800,00	10,00	2,00	1,60	1,00	2,08
4	65,90	5,00	4195,60	191,00	2,00	1,60	1,00	47,75
5	44,61	5,00	2840,00	120,00	2,00	1,60	1,00	30,00
6	45,43	5,00	2892,00	100,00	2,00	1,60	1,00	25,00
7	33,93	5,00	2160,00	635,00	2,00	1,60	1,00	158,75
8	23,84	5,00	1518,00	105,00	2,00	1,60	1,00	26,25
	<b>Tempo total de usinagem [horas]</b>							<b>5,06</b>
Acabamento								
OPERAÇÃO	$v_c$ (m/min)	Rotação (RPM)	$\varnothing D_i$ (mm)	L (mm)	Passes	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	T (min)
9	127,75	7,00	5809,00	33,00	2,00	0,14	0,30	67,35
10	127,75	7,00	5809,00	33,00	2,00	0,14	0,30	67,35
11	127,55	7,00	5800,00	10,00	2,00	0,14	0,30	20,41
12	131,81	10,00	4195,60	191,00	2,00	0,14	0,30	272,86
13	89,22	10,00	2840,00	120,00	2,00	0,14	0,30	171,43
14	90,95	10,00	2895,00	100,00	2,00	0,14	0,30	142,86
15	67,86	10,00	2160,00	635,00	2,00	0,14	0,30	907,14
16	47,69	10,00	1518,00	105,00	2,00	0,14	0,30	150,00
	<b>Tempo total de usinagem [horas]</b>							<b>29,99</b>

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B.16 – Remoção de Cavaco Prático por Operação (Etapa 4).

<b>Desbaste</b>		
<b>OPERAÇÃO</b>	<b>Q (mm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>V(mm<sup>3</sup>)</b>
1	175,1	1203,85
2	175,1	1203,85
3	174,92	364,42
4	105,45	5035,09
5	71,38	2141,31
6	72,68	1817,1
7	54,29	8618,02
8	38,15	1001,48
	<b>TOTAL</b>	<b>21385,11</b>
<b>Acabamento</b>		
<b>OPERAÇÃO</b>	<b>Q (mm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>V(mm<sup>3</sup>)</b>
9	5,37	361,34
10	5,37	361,34
11	5,36	109,33
12	5,54	1510,53
13	3,75	642,39
14	3,82	545,69
15	2,85	2585,41
16	2	300,44
	<b>TOTAL</b>	<b>6416,47</b>

Fonte: Próprio Autor.