

Rodrigo Berretta Käsemodel

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO DO  
FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS  
PARAMETRIZADO PELAS VELOCIDADES DE CORTE E  
AVANÇO**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia e  
Ciências Mecânicas da Universidade  
Federal de Santa Catarina para a  
obtenção do Título de mestre em  
engenharia e ciências mecânicas  
Orientador: Prof. Dr. Adriano Fagali  
de Souza  
Coorientador: Prof. Dr. Alessandro  
Roger Rodrigues

Joinville  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Käsemodel, Rodrigo Berretta  
SISTEMA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO DO  
FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS PARAMETRIZADO PELAS  
VELOCIDADES DE CORTE E AVANÇO / Rodrigo Berretta  
Käsemodel ; orientador, Adriano Fagali de Souza,  
coorientador, Alessandro Roger Rodrigues, 2019.  
130 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas,  
Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Usinagem  
de formas complexas. 3. Força de usinagem. 4.  
Otimização da velocidade de corte. 5. Diâmetro  
efetivo. I. Souza, Adriano Fagali de. II.  
Rodrigues, Alessandro Roger. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Rodrigo Berretta Käsemodel

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO DO  
FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS  
PARAMETRIZADO PELAS VELOCIDADES DE CORTE E  
AVANÇO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Joinville, 26 de Fevereiro de 2019.

---

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Fábio Antonio Xavier, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Helton da Silva Gaspar, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado à minha esposa, aos meus amigos e familiares.



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à Deus, pois sem Ele nada é possível.

Agradeço à minha amada esposa Dailine, por todo o amor, dedicação e, principalmente, apoio e compreensão que foi preciso neste último ano.

Ao professor Dr. Adriano Fagali por todo tempo dispendido em reuniões e conversas, por todo aconselhamento durante a execução dos trabalhos e pelo apoio e confiança em mim depositados.

A todos os membros e ex-membros do GPCAM, pelas inúmeras conversas e discussões que me ajudaram a desenvolver o trabalho. Agradeço em especial ao eng. Rodrigo Voigt pela amizade e parceria nestes dois anos de trabalhos, e ao Nicolas de Lima pelo suporte na fase inicial dos trabalhos.

Ao pessoal da USP – São Carlos: Igor, Arai e prof. Alessandro Roger Rodrigues por toda a ajuda durante a execução de parte dos experimentos, tratamento dos dados e sugestões ao longo do trabalho.



“Todos nós temos nossas máquinas do tempo. Algumas nos levam pra trás, são chamadas de memórias. Outras nos levam para frente, são chamadas sonhos.”

(Jeremy Iron)



## RESUMO

A fabricação de formas complexas é utilizada com diferentes objetivos, desde a obtenção de uma peça com finalidade estética, ergonômica até aerodinâmica ou funcional. Para o fresamento de acabamento deste tipo de geometria se utiliza ferramenta de ponta esférica, que em máquinas três-eixos resulta na variação da velocidade de corte devido à constante alteração do ponto de contato ferramenta-peça (diâmetro efetivo). A alteração da velocidade de corte afeta diretamente a qualidade da superfície e as forças envolvidas no processo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para corrigir e otimizar a velocidade de corte ao longo de uma trajetória complexa, mantendo o avanço por aresta constante. Este programa atua sobre o programa CNC inserindo ao final de cada bloco o comando para alterar rotação e a velocidade de avanço, sempre que necessário. O programa proposto foi avaliado em termos de funcionamento do programa, força de usinagem, qualidade da superfície usinada e tempo de usinagem. Os resultados mostram que o programa é capaz de modificar corretamente o programa CNC, mantendo a velocidade de corte em valores elevados, mesmo em regiões críticas. A força de usinagem foi reduzida em média 21%, e foi obtida uma melhor qualidade da superfície com a utilização do programa proposto. Ao utilizar o programa proposto pôde-se reduzir o tempo de usinagem em até 26% nos experimentos realizados.

**Palavras-chave:** Usinagem de formas complexas. Força de usinagem. Otimização da velocidade de corte. Diâmetro efetivo.



## ABSTRACT

The manufacture of complex shapes is used for different purposes, from obtaining a part with aesthetic, ergonomic, aerodynamic or functional demand. For finishing milling of this type of geometry, a ball-end mill is used, which in three-axis machines results in a variation of the cutting speed due to the constant change of the tool-workpiece contact point (effective diameter). Changing the cutting speed directly affects the quality of the surface and the forces involved in the process. This work presents the development of a system to correct and optimize the cutting speed along a complex toolpath, keeping constant the feed-per-tooth. This program works on the NC code by inserting at the end of each block the command to change the spindle speed and the feed rate, whenever necessary. The proposed program was evaluated in terms of program operation, machining force, machined surface quality and machining time. The results show that the program is capable of correctly modifying the NC code, keeping the cutting speed at high values, even in critical regions. The machining force was reduced by an average of 21%, and a better surface quality was obtained by using the proposed program. The use of the proposed program resulted in a reduction in machining time of up to 26% in the experiments performed.

**Keywords:** Complex geometries machining. Machining force. Cutting speed optimization. Effective diameter.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação do diâmetro efetivo ao longo de uma superfície complexa. ....	28
Figura 2 – Parâmetros de corte. ....	32
Figura 3 – Influência das variáveis na força de usinagem. ....	35
Figura 4 – Cálculo dos pontos CC e CL para ferramenta de ponta esférica. ....	36
Figura 5 – Componentes da força de usinagem. ....	41
Figura 6 – Contato e corte de uma ferramenta esférica em superfície complexa. (a) corte descendente, (b) corte ascendente. ....	43
Figura 7 – Variação do raio efetivo e velocidade de corte em função da posição da ferramenta. ....	44
Figura 8 – Distribuição da velocidade de corte na superfície usinada com (a) grande e (b) pequena profundidade de corte radial ( $ae$ ). ....	45
Figura 9 – Fluxograma do software proposto por Kim et al. (2002). ....	47
Figura 10 – Cálculo do diâmetro efetivo conforme Mikó e Beño. ....	47
Figura 11 – Corpo de prova. ....	53
Figura 12 – Geometria facetada. ....	54
Figura 13 – Geometria complexa. ....	54
Figura 14 – Trajetória da ferramenta. ....	56
Figura 15 – Planejamento dos experimentos. ....	57
Figura 16 – (a) Centro de usinagem Romi D600; (b) insertos intercambiáveis; (c) Montagem da haste da ferramenta e sistema de fixação. ....	58
Figura 17 – Equipamentos utilizados para aquisição das componentes da força de usinagem: (a) Dinamômetro e (b) amplificador. ....	59
Figura 18 – Direção e sentido das componentes cartesianas da força de usinagem. ....	59
Figura 19 – Microscópio confocal de varredura a laser Olympus LEXT OLS4100. ....	60
Figura 20 – Variáveis envolvidas no cálculo do diâmetro efetivo. ....	62
Figura 21 – Gradiente de cor do sistema desenvolvido aplicado à superfície complexa do corpo de prova. ....	65
Figura 22 – Fluxograma da rotina para obtenção dos vetores normais e superfície com padrão de cores em função da velocidade de corte efetiva. ....	66
Figura 23 – Fluxograma do programa CAM Speed. ....	67
Figura 24 – Interface do programa CAM Speed. ....	68
Figura 25 – Planilha de Vetores com os cálculos já realizados. ....	69
Figura 26 – Exemplo de programa CNC importado. ....	69

Figura 27 – Planilha CNC.....	70
Figura 28 – Perfil da rotação e velocidade de avanço ao longo da trajetória complexa para o programa CNC original e proposto.....	71
Figura 29 – Perfil da rotação e velocidade de avanço ao longo da trajetória facetada para o programa CNC original e proposto.....	72
Figura 30 – Perfil da velocidade de corte ao longo da trajetória complexa para o programa CNC original e proposto. ....	73
Figura 31 – Perfil da velocidade de corte ao longo da trajetória facetada para o programa CNC original e proposto. ....	74
Figura 32 – Faixa de variação da velocidade de corte na geometria facetada utilizando o programa original.....	75
Figura 33 – Faixa de variação da velocidade de corte na geometria facetada utilizando o programa proposto. ....	75
Figura 34 – Tempo de execução dos programas.....	77
Figura 35 – Componentes cartesianas da força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa original. ....	78
Figura 36 – Componentes cartesianas da força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa proposto.....	78
Figura 37 – Força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa original.....	80
Figura 38 – Força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa proposto. ....	80
Figura 39 – Componentes da força de usinagem na geometria facetada utilizando o programa original.....	81
Figura 40 – Componentes da força de usinagem na geometria facetada utilizando o programa proposto. ....	83
Figura 41 – Força de usinagem para geometria facetada com programa original.....	84
Figura 42 – Força de usinagem para geometria facetada com programa proposto. ....	84
Figura 43 – Média da força de usinagem em cada face. ....	85
Figura 44 – Média da componente $F_x$ em cada face.....	86
Figura 45 – Média da componente $F_y$ em cada face.....	87
Figura 46 – Média da componente $F_z$ em cada face. ....	88
Figura 47 – Rugosidade $R_a$ na geometria complexa para um intervalo de confiança de 95%.....	89
Figura 48 – Rugosidade $R_z$ na geometria complexa para um intervalo de confiança de 95%.....	90
Figura 49 – Imagens com ampliação de 430x de: (a) Região 04 usinada pelo programa original, (b) Região 04 usinada pelo programa proposto,	

(c) Região 06 usinada pelo programa original e (d) Região 06 usinada pelo programa original. ....	91
Figura 50 – Superfícies usinadas apresentam aspecto fosco. ....	92
Figura 51 – Rugosidade $R_a$ na geometria facetada para um intervalo de confiança de 95%. ....	93
Figura 52 – Rugosidade $R_z$ na geometria facetada para um intervalo de confiança de 95%. ....	94
Figura 53 – Face 05 (a) Programa original e (b) Programa proposto. Imagens com ampliação de 430x. ....	95
Figura 54 – Imagens com ampliação de 430x de: (a) Face 04 usinada pelo programa original, (b) Face 04 usinada pelo programa proposto, (c) Face 06 usinada pelo programa original e (d) Face 06 usinada pelo programa original. ....	96
Figura 55 – Regiões com aspecto fosco no corpo de prova. ....	97



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comprimento de amostragem para medição de $R_a$ .....	48
Tabela 2 – Parâmetros de corte utilizados no desbaste .....	55
Tabela 3 – Parâmetros de corte utilizados no pré-acabamento .....	55
Tabela 4 – Parâmetros nominais de corte utilizados .....	56



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANOVA – Análise de Variância  
API – Application Program Interface  
CAD – Computer Aided Design  
CAM – Computer Aided Manufacturing  
CC – Cutter Contact  
CDP – Corpo de Prova  
CL – Cutter Location  
CNC – Controle Numérico Computadorizado  
IGES – Initial Graphics Exchange Specification  
INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial  
STEP – STandard for the Exchange of Product model data  
VBA – Visual Basic for Application



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a_p$  – Profundidade de corte axial [mm]  
 $a_e$  – Profundidade de corte radial [mm]  
 $D_{ef}$  – Diâmetro efetivo [mm]  
 $D_{fer}$  – Diâmetro nominal da ferramenta [mm]  
 $F$  – Velocidade de avanço [mm/min]  
 $f_z$  – Avanço por aresta [mm/aresta/revolução]  
 $\vec{H}$  – Vetor normal ao plano XY  
 $na$  – Número de arestas da ferramenta  
 $n_{cor}$  – Rotação corrigida [rpm]  
 $n_N$  – Rotação nominal [rpm]  
 $R_{ef}$  – Raio efetivo [mm]  
 $R_{fer}$  – Raio da ferramenta [mm]  
 $v_c$  – Velocidade de corte [m/min]  
 $\vec{V}_N$  – Vetor normal à superfície  
 $X_H$  – Componente X do vetor normal ao plano XY  
 $Y_H$  – Componente Y do vetor normal ao plano XY  
 $Z_H$  – Componente Z do vetor normal ao plano XY  
 $X_{V_N}$  – Componente X do vetor normal à superfície  
 $Y_{V_N}$  – Componente Y do vetor normal à superfície  
 $Z_{V_N}$  – Componente Z do vetor normal à superfície  
 $\theta$  – Ângulo entre o vetor normal à superfície e o plano XY



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução e Contextualização .....</b>	<b>27</b>
1.1	Objetivo geral .....	29
1.2	Objetivos específicos.....	29
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica .....</b>	<b>31</b>
2.1	Parâmetros e grandezas no processo de usinagem.....	31
2.2	Influência dos parâmetros de corte .....	33
2.3	Cálculo de trajetória de ferramenta .....	36
2.4	Forças no processo de usinagem .....	40
2.5	Influência do diâmetro efetivo.....	42
2.6	Qualidade da superfície e métodos de avaliação .....	48
<b>3</b>	<b>Procedimento Experimental .....</b>	<b>51</b>
3.1	Desenvolvimento matemático e computacional .....	51
3.2	Validação do programa proposto.....	52
<b>3.2.1</b>	<b>Planejamento dos experimentos.....</b>	<b>52</b>
3.2.1.1	O corpo de prova .....	52
3.2.1.2	Desbaste e pré-acabamento.....	55
3.2.1.3	Experimentos de usinagem .....	55
3.2.1.4	Análise da superfície.....	57
<b>3.2.2</b>	<b>Equipamentos utilizados.....</b>	<b>58</b>
3.2.2.1	Centro de usinagem e ferramentas .....	58
3.2.2.2	Aquisição de dados .....	58
3.2.2.3	Equipamentos de medição de rugosidade .....	59
<b>3.2.3</b>	<b>Processamento dos dados .....</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões .....</b>	<b>61</b>
4.1	Desenvolvimento computacional .....	61
<b>4.1.1</b>	<b>Desenvolvimento matemático.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Rotina para obtenção dos vetores normais à superfície ..</b>	<b>64</b>

4.1.3	Sistema computacional desenvolvido – CAM Speed.....	66
4.2	Validação do programa proposto .....	70
4.2.1	Avaliação do programa gerado.....	71
4.2.2	Tempo de execução dos programas.....	76
4.2.3	Forças atuantes no processo.....	77
4.2.4	Qualidade da superfície.....	88
5	Conclusão .....	99
6	Referências bibliográficas .....	101
APÊNDICE A	– Rotina Grasshopper .....	107
APÊNDICE B	– Componentes da força de usinagem.....	108
APÊNDICE C	– Dados de força média por face .....	110
APÊNDICE D	– Medições com rugosímetro portátil digital .....	114
APÊNDICE E	– Comparativo entre as faces dos programas original e proposto para geometria complexa .....	116
APÊNDICE F	– Comparativo entre as faces dos programas original e proposto para geometria facetada .....	119
ANEXO A	.....	123
ANEXO B	– Certificado de Qualidade Matéria Prima .....	124
ANEXO C	– Rotinas LabView.....	125
ANEXO D	– Rotinas Matlab.....	127
ANEXO E	– Certificado de Registro de Programa de Computador .....	130

## 1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A usinagem de formas complexas é amplamente utilizada na fabricação de moldes e matrizes. Essas geometrias são desejadas pelos projetistas e *designers* de produtos por proporcionar curvas suaves e transições entre superfícies de forma gradual e harmoniosa, agregando valores estéticos, ergonômicos e funcionais (SOUZA; ULBRICH, 2013). No setor de embalagens as geometrias complexas são predominantemente utilizadas para garantir a ergonomia e design do produto, enquanto na indústria aeronáutica seu uso é imperativo devido às exigências aerodinâmicas. A indústria automotiva possui uma vasta utilização que passa tanto pelo design e ergonomia quanto pela funcionalidade.

A região de Joinville – Santa Catarina, está entre os três principais centros do setor de fabricação de moldes e matrizes no Brasil concentrando cerca de 400 ferramentarias e mais de 10.000 empregos diretos (SACHELLI; CARELI, 2014). Segundo Gonçalves (2017), no Brasil 36,43% dos ferramentais produzidos são para atender o setor automotivo. A fabricação de moldes e matrizes para embalagens ocupa o segundo lugar na demanda com 19,96% seguida pela linha de eletrônicos com 9,90% e construção civil com 8,96%. De forma geral o parque fabril é jovem, com 65,82% do maquinário com até 9 anos de uso (GONÇALVES, 2017). Na cadeia produtiva de um produto plástico o custo do molde pode representar cerca de 30% do valor final do produto (BOUJELBENE et al., 2004).

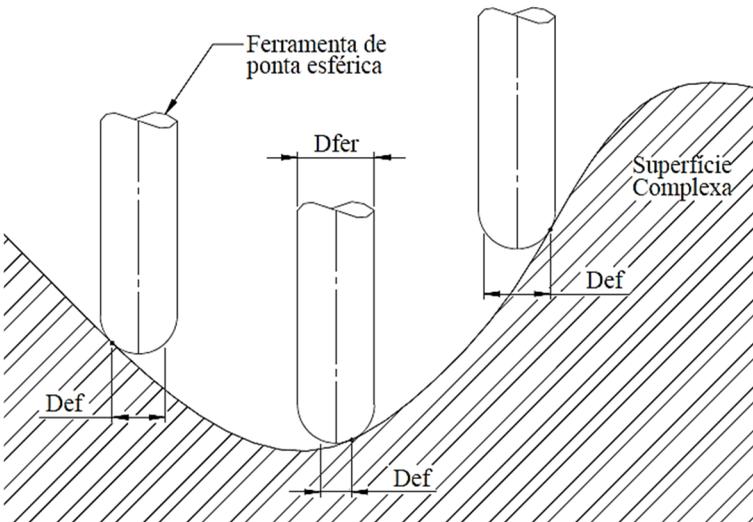
A fabricação de um molde ou matriz requer diversos processos produtivos, desde seu projeto em plataforma CAD (Desenho Auxiliado por Computador, em inglês *Computer Aided Design*), fabricação utilizando a tecnologia CAM (Manufatura Auxiliada por Computador, em inglês *Computer Aided Manufacturing*) até a montagem e teste. Dentre os processos produtivos o fresamento em máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado) representa uma parcela significativa do custo de fabricação. Analisando os dados obtidos no estudo sobre processo orçamentário de moldes realizado por Gama (2009), é possível verificar que os processos envolvendo fresamento em máquinas CNC representam de 31% a 47% do custo do molde. Os processos de ajuste em bancada e polimento também possuem um significativo impacto no custo, o que indica que melhorar o processo de usinagem pode reduzir ainda mais o tempo total e o custo de fabricação do molde (GAMA, 2009). Desta forma, 30% do custo do produto está associado à fabricação do molde e até 47% do custo de fabricação do molde está diretamente

relacionado com processos de fresamento CNC. A partir destes números fica clara a importância do estudo da usinagem de formas complexas.

Os parâmetros de processo afetam a peça usinada em todos os aspectos, como precisão geométrica, qualidade da superfície, tempo de fabricação, etc., conforme já discutido por diversos pesquisadores como Ribeiro, César e Lopes (2017) e Wojciechowski *et al.* (2017). Outros fatores importantes também são afetados pelos parâmetros de corte, como consumo de energia elétrica, consumo de fluido de corte e vida da ferramenta, estudados por Campatelli, Lorenzini e Scippa (2014), Jiang *et al.* (2015) e Scandiffio, Diniz e Souza (2017), respectivamente. A velocidade de corte está principalmente relacionada com a vida útil da ferramenta, mas a rotação da ferramenta define não só a velocidade de corte, como também o avanço por aresta, que impacta diretamente na força de corte e na rugosidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

No fresamento de geometrias complexas as ferramentas de ponta esférica são mais comumente utilizadas (CHEN; SHI, 2008). Nestas geometrias o vetor normal da superfície altera constantemente, e com isso, o diâmetro efetivo ( $D_{ef}$ ) da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 1. Este diâmetro varia de zero (centro da ferramenta em contato) ao diâmetro nominal ( $D_{fer}$ ), alterando também seu quadrante de contato, causando mudanças na direção e magnitude da força de usinagem (SOUZA *et al.*, 2014a).

Figura 1 – Variação do diâmetro efetivo ao longo de uma superfície complexa.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Aumentar a velocidade de corte reduz a região de deformação plástica e a força de usinagem (SOUZA et al., 2015). Alguns autores estudaram a variação do diâmetro efetivo, como Fan (2014); Kim *et al.*(2002); Mikó e Beño (2013) e Souza *et al.* (2014a), mas poucos buscaram uma solução para reduzir os impactos negativos deste fenômeno. Apesar dos avanços na área, muitos desafios ainda precisam ser abordados para melhorar a qualidade e eficiência dos métodos de usinagem de geometrias complexas (LASEMI; XUE; GU, 2010).

Os sistemas CAM comerciais geram programas CNC com rotação constante, e, portanto, a velocidade de corte varia ao longo da usinagem. Desta forma, há a necessidade de desenvolver um sistema capaz de minimizar os efeitos da variação da velocidade de corte. Sendo assim, os objetivos deste trabalho estão elencados a seguir divididos entre objetivo geral e objetivos específicos.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é propor uma rotina computacional para compensação da velocidade de corte a fim de mantê-la constante durante o fresamento de geometrias complexas utilizando ferramenta de ponta esférica.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para desenvolver e avaliar o sistema proposto são traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Entender a dinâmica do contato entre a ferramenta e a peça.
- b) Desenvolver um modelo genérico para o cálculo do diâmetro efetivo de contato.
- c) Desenvolver um modelo de compensação da velocidade de corte em função do diâmetro efetivo de contato.
- d) Analisar um corpo de prova fabricado com e sem a compensação da velocidade de corte.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No processo de fresamento distinguem-se dois tipos básicos: fresamento tangencial e frontal (ABNT NBR 6175:2015). O fresamento de formas complexas se concentra no segundo caso, mas a norma não faz menção à quantidade de eixos simultâneos movimentados no processo.

Operações de acabamento usualmente movimentam três eixos simultaneamente e são caracterizadas por uma baixa taxa de remoção de material e por dar a forma final do produto. Este processo define a precisão dimensional, erro de forma e a qualidade da superfície. É importante ressaltar que nos casos de moldes e matrizes usualmente após o fresamento existem processos de polimento e texturização. (GAMA, 2009; SOUZA *et al.* (2014b). As operações de acabamento e pré-acabamento podem representar até 49% do tempo de fabricação de um molde (BONETTI; BODZIAK; SOUZA, 2010) e têm reflexos sobre as operações posteriores (polimento e ajuste)(GAMA, 2009; SOUZA *et al.*, 2014b).

### 2.1 PARÂMETROS E GRANDEZAS NO PROCESSO DE USINAGEM

Segundo a norma ABNT NBR ISO 3002-1:2013 todos os movimentos, direções e velocidades do processo de usinagem são definidos em relação à peça. Diniz, Marcondes e Coppini (2013) explicam que esse procedimento é adotado para padronização dos sinais algébricos e facilitação do estudo de movimento.

Souza e Ulbrich (2013) classificam os parâmetros de corte em duas dimensões: parâmetros geométricos e parâmetros de velocidade.

#### **Parâmetros geométricos:**

São as grandezas que descrevem geometricamente a relação de penetração, a ferramenta e a peça. A profundidade de corte no sentido axial ( $a_p$ ) é a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Já a profundidade de corte no sentido radial ( $a_e$ ) é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente à direção de avanço. Avanço por aresta ( $f_z$ ) é o percurso de avanço percorrido por aresta e por rotação da ferramenta, medido na direção do avanço.

## Parâmetros de velocidade:

Os parâmetros que se relacionam com a velocidade são a velocidade de corte ( $v_c$ ), que é a velocidade tangencial da ferramenta em relação à peça, e a velocidade de avanço ( $F$ ), que é a velocidade de deslocamento da ferramenta em relação à peça.

A velocidade de corte é calculada utilizando o diâmetro ( $D$ ) e a rotação ( $n$ ) da ferramenta pela Equação 1.

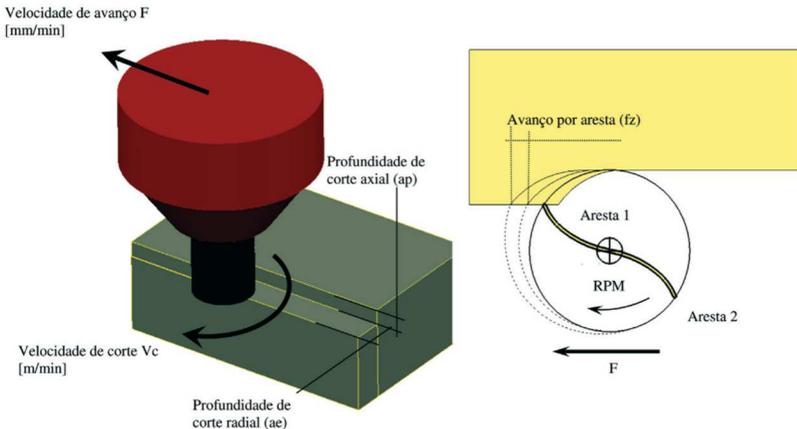
$$v_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \text{ [m/min]} \quad (1)$$

Segundo Souza e Ulbrich (2013), a velocidade de avanço ( $F$ ) está relacionada com o número de arestas da ferramenta ( $na$ ), o avanço por aresta ( $f_z$ ) e a rotação da ferramenta, Equação 2. Na prática este parâmetro é definido de forma a satisfazer o avanço por aresta recomendado pelo fabricante de ferramenta.

$$F = f_z \cdot na \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

A Figura 2 ilustra os parâmetros de corte apresentados anteriormente para uma operação de fresamento frontal.

Figura 2 – Parâmetros de corte.



Fonte: Souza e Ulbrich (2013).

O sentido de movimentação da ferramenta em relação à peça também pode ser utilizado para classificar o processo em sentido de corte concordante ou discordante (SOUZA; ULBRICH, 2013). Segundo Ferraresi (1970) no sentido de corte concordante a maior espessura do cavaco encontra-se no início do corte enquanto que no sentido de corte discordante a maior espessura do cavaco encontra-se no final do corte.

## 2.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte descritos anteriormente afetam o produto e a própria ferramenta de formas distintas. Neste item são abordadas as influências previstas para cada parâmetro, a fim de proporcionar um melhor entendimento do assunto.

### a) Profundidade de corte no sentido axial ( $a_p$ )

Este parâmetro está relacionado ao volume de material removido e possui pouca influência sobre o desgaste da ferramenta. Portanto, do ponto de vista econômico é interessante que se trabalhe com o maior valor possível, sobretudo em operações de desbaste, reduzindo assim o tempo de usinagem. Segundo Santos e Sales (2007) a profundidade de corte aumenta as forças, e portanto a deflexão da ferramenta, prejudicando assim a qualidade da superfície.

### b) Profundidade de corte no sentido radial ( $a_e$ )

O aumento de  $a_e$  faz com que o ângulo de contato entre a fresa e a peça aumente. Com um maior tempo de contato eleva-se a temperatura da ferramenta acarretando uma queda na vida da ferramenta. Este impacto na vida da ferramenta é maior que a influência de  $f_z$  e de  $a_p$ , mas inferior à  $v_c$  (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). A profundidade de corte no sentido radial define a altura de crista, conforme demonstrado por Kayal (2007). Esse parâmetro também tem papel importante na deflexão da ferramenta, impactando assim não só na rugosidade como também na precisão dimensional da peça. Porém é preciso respeitar valores mínimos a fim de evitar o encruamento da superfície.

### c) Avanço por aresta ( $f_z$ )

Um maior avanço por aresta causa um decréscimo na potência consumida pela máquina, uma vez que aumenta a espessura do cavaco e com isso diminui a pressão específica de corte (DINIZ; MARCONDES;

COPPINI, 2013). A rugosidade máxima teórica é função de  $f_z$  e do diâmetro da ferramenta, conforme Equação 3. Desta forma, quando se deseja um bom acabamento, sem alterar os demais parâmetros, fresas com maior número de dentes devem ser utilizadas, mantendo o avanço por aresta baixo sem aumentar o tempo de usinagem.

$$R_{max\text{teor}} = f_z^2 / 4D \text{ [mm]} \quad (3)$$

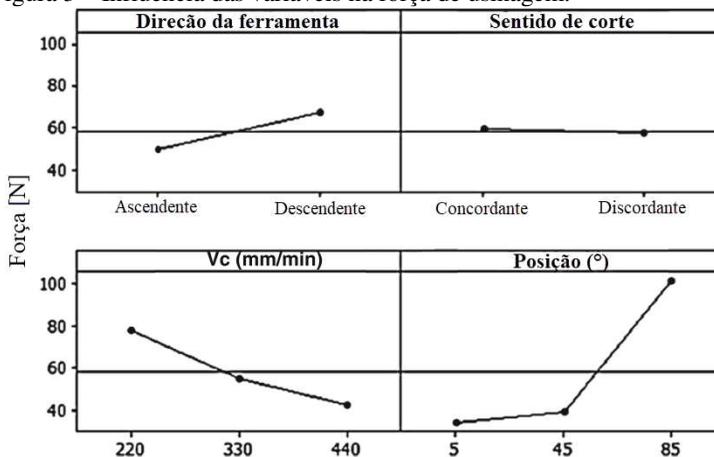
d) Velocidade de corte ( $v_c$ )

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), ao definir  $v_c$ , o principal objetivo deve ser a obtenção de uma vida econômica da ferramenta pois, conforme mencionado anteriormente, a velocidade de corte tem a maior influência sobre a vida da ferramenta. Esse efeito se dá pelo fato de que a velocidade de corte influencia a temperatura de corte, propiciando fenômenos como abrasão, difusão e oxidação. Além de que um aumento de  $v_c$  aumenta a força do impacto da aresta de corte com a peça, o que favorece a ocorrência de lascamento e trincas na aresta de corte. É importante observar, também, que alterar a velocidade de corte sem alterar a velocidade de avanço resulta em uma alteração do avanço por aresta.

Neste contexto, Souza *et al.* (2015) investigaram as forças envolvidas na usinagem do aço AISI P20 com 30 HRc de dureza variando a velocidade de corte em três níveis, estratégia de corte (ascendente e descendente) e corte concordante e discordante. Concluiu-se que a força de usinagem no fresamento de formas complexas é influenciada principalmente por: (a) o diâmetro efetivo, que pode reduzir a  $v_c$  aumentando a força; (b) a ponta da ferramenta participar (ou não) do corte, fazendo material ser removido por uma combinação entre cisalhamento e esmagamento; e (c) corte ascendente ou descendente. Não foi verificada influência do sentido de corte (SOUZA *et al.*, 2015).

A análise de variância (ANOVA) realizada pelos autores mostrou que ao aumentar a velocidade de corte, a região de deformação plástica diminui e com ela, a força de usinagem, Figura 3. Também foi verificado que a usinagem ascendente proporciona uma menor força, porém na prática não é viável economicamente a usinagem apenas em um sentido.

Figura 3 – Influência das variáveis na força de usinagem.



Fonte: Souza, et al. (2015).

Ribeiro, César e Lopes (2017) estudaram a influência dos parâmetros de corte na rugosidade para o aço GMTC 1.2738 com 45HRC, em operação de faceamento. Através de uma análise de variância concluíram que a profundidade de corte radial e a combinação entre as profundidades de corte radial e axial são os parâmetros de maior influência sobre a rugosidade.

Estudos visando a redução dos impactos ambientais do processo de usinagem também foram realizados. Neste sentido, Campatelli, Lorenzini e Scippa (2014) estudaram a otimização dos parâmetros de corte visando a redução do consumo de energia. Neste trabalho foi concluído que a energia gasta pelos sistemas auxiliares da máquina impacta fortemente no consumo, sendo assim, o menor valor para o consumo é obtido quando a taxa de remoção de material é maximizada. Para maximizar a taxa de remoção de material as velocidades de corte e de avanço e as profundidades de corte (radial e axial) são aumentadas. Esta maximização é limitada pelo efeito de desgaste da ferramenta.

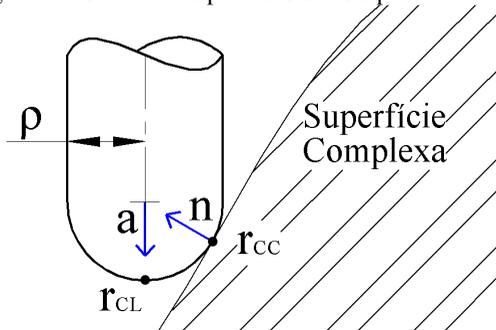
Outros fatores influenciam na qualidade da superfície usinada, por exemplo, os erros geométricos do sistema de fixação da ferramenta, que podem induzir erros de batimento da ferramenta. Estes erros são causados pelo desgaste da ferramenta; assimetria; montagem do inserto; desbalanceamento ou deformações térmicas. Este erro é amplificado com o aumento do comprimento de balanço da ferramenta (WOJCIECHOWSKI; WIACKIEWICZ; KROLCZYK, 2018). Também foi verificado que a relação entre rugosidade e velocidade de corte não é

linear para comprimento de balanço alto, já para comprimento de balanço baixo, não há relação entre  $v_c$  e a rugosidade. Os autores mostram que a formação da superfície (textura/rugosidade) está fortemente ligada à deformação da ferramenta, sendo que maiores deformações causam piores resultados de rugosidade. Desta forma, a obtenção de uma superfície com elevado acabamento da superfície está estritamente ligada às forças de corte que causam deflexão da ferramenta. Segundo Neto (2012) o termo textura refere-se aos picos e vales produzidos em uma superfície, sendo composto pela rugosidade e pela ondulação da superfície.

### 2.3 CÁLCULO DE TRAJETÓRIA DE FERRAMENTA

Na usinagem de formas complexas as movimentações da máquina ferramenta são calculadas por sistemas CAM, que geram os programas CNC com as trajetórias da ferramenta. Os métodos de geração para a trajetória de ferramenta podem ser divididos entre os que se baseiam no ponto de contato da ferramenta com a peça (CC, do inglês *Cutter Contact*) e os que se baseiam na localização da ferramenta (CL, do inglês *Cutter Location*) (CHOI e JERARD, 1998). Estes autores definem uma relação entre os pontos CC e CL, a qual permite, tendo o vetor normal à superfície e o ponto CC, encontrar o ponto CL. A Figura 4 ilustra esta situação e a Equação 4 expressa a relação citada.

Figura 4 – Cálculo dos pontos CC e CL para ferramenta de ponta esférica.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

$$r_{CL} = r_{CC} + \rho(\vec{n} + \vec{a}) \quad (4)$$

Em que  $r_{CC}$  corresponde ao ponto CC e  $r_{CL}$  corresponde ao ponto CL. O vetor  $\vec{n}$  é um vetor unitário normal à superfície e  $\vec{a}$  é o vetor unitário na direção do eixo da ferramenta.

Os erros de usinagem estão intimamente ligados aos parâmetros de geração de trajetória como a profundidade de corte radial e a distância entre dois pontos consecutivos (LASEMI; XUE; GU, 2010). O número de pontos CC está relacionado com o passo lateral e frontal. De forma geral, com um maior número de pontos CC a superfície parecerá ser mais precisa e com menores alturas de crista, mas o custo computacional, o uso de memória e o tempo de fabricação serão maiores, como observado por Arias (2009).

A trajetória da ferramenta pode ser avaliada segundo três critérios: qualidade, eficiência e robustez. A qualidade é definida pela ausência de colisões e erros dentro da tolerância. A eficiência pode ser vista de duas formas: eficiência na simulação, baseada no tempo computacional e uso de memória; eficiência no tempo real de usinagem. A robustez é a capacidade de adaptação do sistema para diferentes situações de máquinas e superfícies (LASEMI; XUE; GU, 2010).

Souza et al. (2014b) apresentam alguns requisitos para uma trajetória de ferramenta eficiente:

- Eficiência de repetibilidade: quão similar são os passes ao longo da peça de trabalho;
- Eficiência no cumprimento das tolerâncias especificadas: este tópico inclui três situações: o sistema deve garantir o cumprimento das tolerâncias geométricas e dimensionais; o software deve utilizar ambos os extremos da tolerância a fim de calcular o menor número possível de pontos; e a distribuição dos pontos deve ser a mais homogênea possível;
- Compatibilidade geométrica: o algoritmo de cálculo de trajetória deve ser capaz de trabalhar com qualquer superfície complexa, côncava ou convexa;
- Eficiência em trabalhar com arquivos externos: O software deve ser capaz de trabalhar com geometrias em formatos padronizados como IGES e STEP, por exemplo;
- Eficiência da trajetória da ferramenta: é medida pela trajetória da ferramenta considerando passes sobrepostos, movimentos não cortantes e movimentações rápidas da ferramenta.

O cálculo da trajetória da ferramenta envolve principalmente o padrão em que a ferramenta irá se movimentar sobre a superfície

(MLADENOVIĆ; TANOVIĆ; EHMANN, 2015). Primeiramente o ponto de contato da ferramenta com a superfície (CC) é calculado, então é convertido para posição da ferramenta (CL) (LO, 2000), e calculada a distância para o próximo ponto, obedecendo a tolerância especificada (CHIOU; LEE, 2002).

Misra, Sundararajan e Wright (2005) mostram que para o cálculo da distância entre um ponto e o próximo as variáveis de entrada são: tolerância desejada, raio da ferramenta e o raio de curvatura da superfície no ponto. Esta distância é calculada pela Equação 5 proposta por Choi e Jerard (1998). O valor do passe radial pode ser fixo ou definido pela altura de crista, caso dos algoritmos mais modernos. Choi e Jerard (1998) propuseram a Equação 6 para o cálculo do passe radial em função da altura de crista desejada.

$$\delta_{CL} = 2\sqrt{2\tau(R + \rho_f) - \tau^2} \text{ [mm]} \quad (5)$$

$$\epsilon_{CL} = \frac{\sqrt{4(R+\rho_s)^2(\rho_s+h)^2 - [\rho_s^2 + 2\rho_s R + (\rho_s+h)^2]^2}}{|\rho_s+h|} \text{ [mm]} \quad (6)$$

Nas equações acima,  $R$  é o raio da ferramenta,  $\rho_f$  é a curvatura da superfície na direção do avanço,  $\rho_s$  é a curvatura na direção do passe radial,  $\tau$  é o erro de corda entre dois pontos CL consecutivos,  $\delta_{CL}$  é a distância entre dois pontos CL consecutivos,  $h$  é a altura de crista e  $\epsilon_{CL}$  é o passe radial ( $a_e$ ).

Para a fabricação de geometrias complexas os sistemas CAM geram programas CNC que utilizam o comando de interpolação linear (G01) para movimentação de um ponto ao outro. Siller, Rodriguez e Ahuett (2006) mostram que existe uma relação clara entre comprimento do segmento e a curvatura da superfície, onde quanto menor o raio de curvatura, menor o comprimento do segmento.

Ao trabalhar com altas velocidades de avanço a máquina ferramenta apresenta tanto limitações de processamento observadas por Souza e Coelho (2007), quanto limitações dinâmicas e cinemáticas observadas por Monreal e Rodriguez (2003), Moreira (2010) e Pessoles, Landon e Rubio (2010). Estas limitações fazem com que a máquina se movimente de forma inconstante, reduzindo a velocidade de avanço e prejudicando a qualidade da superfície usinada.

Muitos estudos foram realizados visando minimizar estes efeitos, alguns exemplos atuais de pesquisa são: Zhai, Lin e Fu (2018) que

apresentam um método que mescla usinagem em altas velocidades, nas regiões em que a máquina é capaz de se movimentar nestas velocidade, e usinagem convencional nas demais regiões; Sun et al. (2018) e Tajima e Sencer (2017) apresentam um algoritmo que utiliza interpolação em tempo real para evitar a oscilação do avanço.

Kaymakci e Lazoglu (2008) estudaram as forças e erros de forma em diferentes trajetórias de ferramenta. Os autores desenvolveram um programa para o cálculo da força de usinagem em cada ponto CL, e com isso, a deflexão da ferramenta. Dessa forma é estimado o erro de forma da superfície usinada. O programa proposto apenas analisa as diferentes trajetórias, sem realizar nenhum tipo de melhoria no processo.

Alguns autores propuseram formas de otimizar os parâmetros de corte, e outros propuseram formas de otimizar o processo em função da trajetória, conforme segue.

Salami, Sadeghi e Motakef (2007) desenvolveram um programa para otimização da velocidade de avanço em função da força de corte. O programa proposto estima a força utilizando as relações propostas por Kienzle e ajusta o avanço para que seja utilizado o maior avanço desde que as forças não excedam o limite estabelecido. O algoritmo apresentou um erro de 17% na estimativa das forças e reduziu em até 10% o tempo de usinagem. Neste programa o avanço por aresta varia, mas é mantido dentro de um limite estabelecido pelo usuário.

Erkorkmaz et al. (2013) também desenvolveram um método para otimizar a velocidade de avanço mantendo a força de usinagem dentro de um limite estipulado. Neste método são considerados os limites dinâmicos da máquina ferramenta, como aceleração e *jerk*. Com esta otimização os autores obtiveram uma redução de 16% no tempo de usinagem. Neste método o avanço por aresta também varia, mas não é de nenhuma forma controlado.

Park et al. (2018) propuseram um algoritmo para otimização do avanço buscando manter a força de usinagem em um valor pré-determinado. Este algoritmo estima a força com base na taxa de remoção de material e altera o avanço mantendo-o sempre entre um valor mínimo e máximo. Com a simulação do processo previu-se um ganho de 35% no tempo de fabricação, no entanto os resultados experimentais apresentaram um ganho de 26%. Os autores concluem que essa diferença é devida à aceleração e desaceleração da máquina. Este estudo foi realizado para ferramenta de topo reto e não foi abordado sobre a aplicação em ferramentas de ponta esférica.

Em nenhum dos métodos os autores avaliaram a rugosidade e o erro de forma da superfície usinada. Observou-se que em todos os métodos o avanço por aresta varia ao longo da usinagem.

Ma et al. (2018) propuseram um método para o cálculo de trajetória de ferramenta para reduzir a variação da força de usinagem. Segundo os autores quanto menor a flutuação da força de corte, melhor será a qualidade da superfície usinada. Neste estudo o método proposto apresentou redução na oscilação da força e com isso um menor valor de rugosidade foi obtido.

## 2.4 FORÇAS NO PROCESSO DE USINAGEM

A Força de usinagem ( $F_u$ ) pode ser decomposta em Força Ativa ( $F_t$ ) e Força Passiva ( $F_p$ ). A força ativa é a componente da força de usinagem no plano de trabalho, e a força passiva é a componente de  $F_u$  na direção perpendicular ao plano de trabalho (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Desta forma, a força de usinagem pode ser obtida pela Equação 7.

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (7)$$

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a força ativa é composta por: Força de corte ( $F_c$ ) que é a projeção de  $F_u$  sobre a direção de corte; a Força de avanço ( $F_f$ ) que é a projeção de  $F_u$  sobre a direção de avanço; a Força de apoio ( $F_{ap}$ ) que é a projeção de  $F_u$  sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho; e a Força efetiva de corte ( $F_e$ ) que é a projeção de  $F_u$  sobre a direção efetiva de corte.

A Força de usinagem ( $F_u$ ) é, também, o vetor resultante das componentes X, Y e Z medidas em dinamômetro ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , respectivamente) (SOUZA; NETO; DINIZ, 2013). A Equação 8 é utilizada para realizar este cálculo.

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (8)$$

Scandiffio, Diniz e Souza (2016) utilizaram as componentes Força de corte ( $F_c$ ), Força radial ( $F_r$ ) e Força axial (que para máquinas 3 eixos é igual a  $F_z$ ). Nesta abordagem a força de corte é a componente de  $F_u$  no

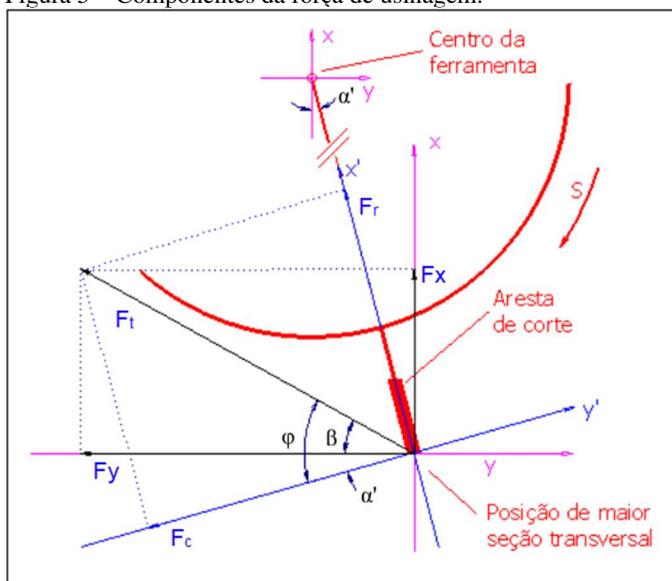
plano tangencial ao corte, na direção do corte e a força radial é perpendicular à  $F_c$ . A Figura 5 ilustra as componentes acima mencionadas.

As componentes  $F_c$  e  $F_r$  podem ser calculadas a partir do ângulo  $\varphi$  e da resultante entre as componentes  $F_x$  e  $F_y$ , equações 9 e 10.

$$F_r = F_t \cdot \text{sen } \varphi \quad (9)$$

$$F_c = F_t \cdot \text{cos } \varphi \quad (10)$$

Figura 5 – Componentes da força de usinagem.



Fonte: Souza, Neto e Diniz (2013).

Para o cálculo da força de corte é preciso conhecer a posição angular da aresta no momento em que o cavaco atinge a maior espessura. Esta posição depende do raio efetivo, que por sua vez depende da geometria.

As forças radial e de corte são as responsáveis pela deflexão da ferramenta (KIM et al., 2002; SCANDIFFIO; DINIZ; SOUZA, 2016; WOJCIECHOWSKI; WIACKIEWICZ; KROLCZYK, 2018). Desta forma, reduzir as forças atuantes no processo de usinagem reduz o erro geométrico causado pela deflexão da ferramenta.

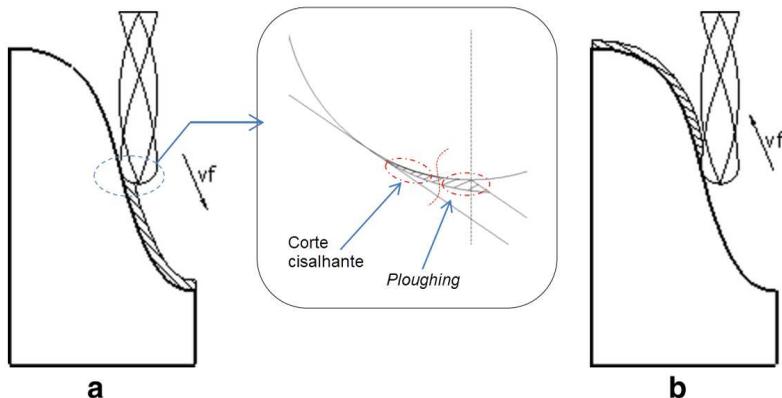
## 2.5 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO EFETIVO

Na usinagem de formas complexas o ponto de contato ferramenta-peça altera constantemente durante a trajetória da ferramenta. Este ponto define o diâmetro efetivo, que varia de zero (centro da ferramenta) até o diâmetro nominal da ferramenta, ilustrado na Figura 1. O quadrante de contato também altera durante o processo, sendo assim, a direção e magnitude da força de usinagem são influenciadas (SOUZA et al., 2014a). Embora existam muitos estudos na área de fabricação de formas complexas, poucos investigam a alteração da velocidade de corte ao longo da superfície.

A velocidade de corte, conforme demonstrado na Equação 1, depende, dentre outros, do diâmetro da ferramenta. A velocidade de corte real é calculada a partir da mesma equação, porém com o uso do diâmetro efetivo. Com a variação do diâmetro efetivo, ocorre uma variação na velocidade de corte real. Sendo assim, uma superfície complexa fabricada por fresamento com ferramenta de ponta esférica apresenta, ao longo de sua superfície, regiões fabricadas com diferentes velocidades de corte. Essa heterogeneidade no processo resulta em propriedades diferentes ao longo da peça usinada.

Neste tipo de processo a variação da velocidade de corte causa uma variação da força de usinagem. Quando o centro da ferramenta está em contato com a peça, devido à baixa velocidade de corte (no centro da ferramenta  $v_c = 0 \text{ m/min}$ ), o material sofre esmagamento em um fenômeno conhecido por *ploughing*, ao invés de corte por cisalhamento (SOUZA et al., 2014a). A Figura 6 ilustra essa situação. Segundo Tuysuz, Altintas e Feng (2013) além do *ploughing* pode ocorrer um efeito de indentação, dependendo do ângulo de inclinação da superfície e da profundidade de corte axial utilizada.

Figura 6 – Contato e corte de uma ferramenta esférica em superfície complexa. (a) corte descendente, (b) corte ascendente.



Fonte: Souza et al. (2014a).

Fontaine et al. (2007) apresentam uma fórmula para o cálculo do raio efetivo da ferramenta (Equação 11) mas esta fórmula é aplicável apenas em situações onde a geometria a ser usinada é plana e horizontal. Nesta fórmula,  $R_{ef}$  é o raio efetivo,  $R_0$  o raio da ferramenta, e  $Z$  a altura do ponto de contato, que para superfícies planas e horizontais é igual ao  $a_p$ .

$$R_{ef} = \sqrt{R_0^2 - (R_0 - Z)^2} \text{ [mm]} \quad (11)$$

Para utilizar esta equação em superfícies inclinadas os autores apresentam uma expressão para  $Z$  em função: do ponto de contato da ferramenta com a superfície; do ângulo de inclinação; e da altura inicial da superfície, Equação 12.

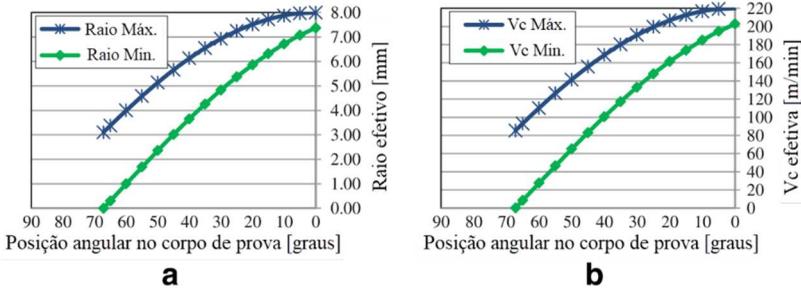
$$Z_c(X_{Pc}) = Z_0 + X_{Pc} \tan \delta + R_0 \cos \delta \text{ [mm]} \quad (12)$$

Em que  $Z_c$  é a altura do ponto,  $\delta$  a inclinação da superfície,  $X_{Pc}$  a coordenada do ponto e  $Z_0$  a altura inicial da superfície. Esta expressão é válida para uma superfície inclinada em que sua altura varia apenas ao longo do eixo  $x$ .

Souza et al (2014a) propuseram uma equação para o cálculo do diâmetro efetivo máximo e mínimo em função da posição da ferramenta para um corpo de prova no formato de  $\frac{1}{4}$  de cilindro. A partir do

equacionamento foram traçados gráficos mostrando o comportamento do diâmetro efetivo e da velocidade de corte em função da posição ( $\theta$ ), Figura 7. Fica evidente que a medida que a ferramenta se aproxima de uma usinagem tangencial ( $\theta = 0^\circ$ ), os diâmetros máximo e mínimo tendem ao valor nominal da ferramenta. Quando a posição da ferramenta é perpendicular à superfície ( $\theta = 90^\circ$ ), o diâmetro efetivo mínimo vale zero e o máximo é aproximadamente igual àquele de uma superfície plana, calculado pela Equação 11.

Figura 7 – Variação do raio efetivo e velocidade de corte em função da posição da ferramenta.



Fonte: Souza et al. (2014a).

Os autores verificaram que a rugosidade ( $R_a$ ) no ponto inicial da trajetória (usinagem de topo) diminuiu com o aumento da velocidade de corte, mas no final da trajetória (usinagem tangencial) os valores mantiveram constantes para todas as velocidades de corte. Isso ocorreu pois, com o aumento da velocidade de corte, mesmo com o centro em contato, a velocidade média também aumentou, diminuindo a influência do esmagamento no processo. Já quando o centro não está em corte, o fenômeno de esmagamento não ocorre, portanto, o aumento da velocidade de corte não impacta na rugosidade.

Os autores observaram que, para todos os pontos avaliados, a  $F_u$  decresce a medida que a velocidade de corte aumenta, sendo que no ponto inicial a força é aproximadamente duas vezes maior que no ponto final. Também concluíram que o centro da ferramenta estar, ou não, em contato no corte é mais expressivo do que a variação do diâmetro efetivo, pois traz instabilidade ao processo, o que prejudica a qualidade da superfície.

Fan (2014) apresenta um modelo matemático para a distribuição da velocidade de corte em uma superfície complexa usinada por uma fresa de ponta esférica. Neste trabalho o autor utiliza o método *z-map* para determinar a posição da ferramenta em cada ponto da superfície. A

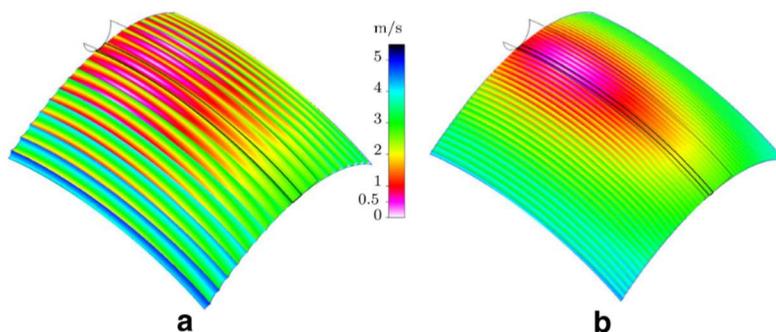
velocidade de corte é calculada considerando tanto o movimento de rotação quanto o movimento de translação (avanço) da ferramenta, Equação 13.

$$|V| = \frac{1}{60} \sqrt{4\pi^2 n^2 R^2 (x_n^2 + y_n^2) + 4\pi n f (x_n y_f - y_n x_f) + f^2} \quad (13)$$

Em que  $n$  é a rotação da ferramenta,  $R$  é o raio da ferramenta,  $x_n$  e  $y_n$  as coordenadas do vetor normal da superfície,  $f$  o avanço e  $x_f$  e  $y_f$  as componentes cartesianas da velocidade de avanço.

A representação gráfica da velocidade de corte possibilita a visualização das regiões em que é próxima de zero e onde é mais favorável à usinagem, Figura 8. Porém, esta representação gráfica é gerada a um alto custo computacional, mesmo neste caso simples em que a trajetória da ferramenta está seguindo a superfície. A representação para o processo de usinagem real, no qual milhares de segmentos lineares são traçados se torna inviável segundo o autor.

Figura 8 – Distribuição da velocidade de corte na superfície usinada com (a) grande e (b) pequena profundidade de corte radial ( $a_e$ ).



Fonte: Fan (2014).

Fan (2014) afirma que a velocidade de corte é um fator chave na usinagem e que seu modelo matemático pode ser utilizado para a correta seleção dos parâmetros de corte. Contudo, como comprovado pelo próprio autor, a velocidade de corte varia constantemente em uma superfície complexa e embora o estudo investigue esta variação, nenhuma ação é proposta para minimização deste problema durante a usinagem.

Kim et al. (2002) propuseram um programa para otimização da velocidade de corte em operações de fresamento com ferramenta de ponta

esférica. O programa proposto realiza o cálculo do diâmetro efetivo, mas este cálculo possui duas importantes limitações: a equação é para superfícies planas e os autores não abordam como é avaliado o sentido de deslocamento da ferramenta, uma vez que este, juntamente com o  $a_p$ , definem os diâmetros efetivos máximo e mínimo. A Equação 14 é utilizada neste cálculo.

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - T_{ox})^2 + (y_i - T_{oy})^2}}{n} \text{ [mm]} \quad (14)$$

Em que  $T_{ox}$  e  $T_{oy}$  são as coordenadas X e Y do centro da ferramenta e  $x_i$  e  $y_i$  são as coordenadas dos pontos avaliados.

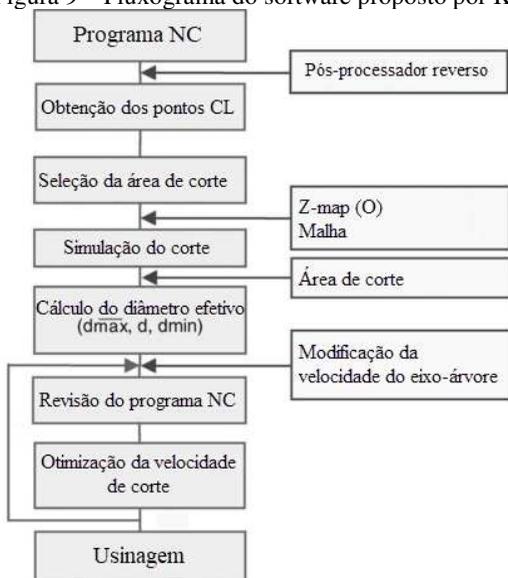
A primeira etapa do programa proposto funciona como um pós-processador inverso, em que o programa CNC é inserido e os pontos CL são identificados. Então, para cada linha do programa CNC é calculada a rotação do eixo-árvore para manter a velocidade de corte dentro de uma faixa pré-estabelecida.

Para validar o programa proposto os autores realizaram a usinagem de um corpo de prova com a velocidade de corte otimizada e outro sem a otimização. Com uso de um dinamômetro, cujo resultado pode ser visualizado no ANEXO A, é verificado que as componentes da força de usinagem são atenuadas. Os autores concluem que esta otimização da velocidade de corte proporcionou pequenas oscilações na força de corte ao longo da peça, o que reduz a deflexão da ferramenta, resultando em um processo mais estável. Porém, a imagem mostra que nos gráficos não há escala nos eixos, o que deixa dúvidas quanto à magnitude das forças medidas.

Neste estudo os autores não comentam que uma alteração da velocidade de corte sem corrigir a velocidade de avanço resulta em alteração no avanço por aresta. Segundo Souza et al. (2014a) é importante ter atenção ao aumentar a rotação da ferramenta, pois isso reduz o avanço por aresta, podendo chegar a um valor crítico no qual não há formação de cavaco, apenas deformação plástica na superfície da peça.

A Figura 9 mostra o fluxograma do programa proposto por Kim et al. (2002), onde é possível verificar as etapas de cálculo e alteração do programa CNC de forma iterativa.

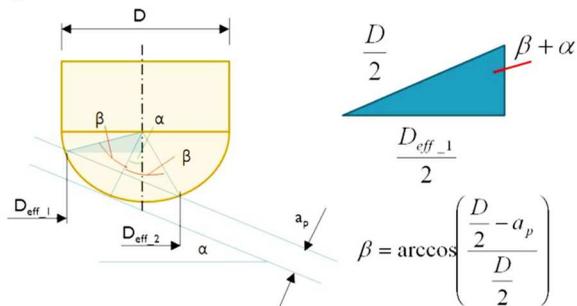
Figura 9 – Fluxograma do software proposto por Kim et al. (2002).



Fonte: Kim et al. (2002).

Mikó e Beño (2013) realizaram testes utilizando um programa CNC com rotação e avanço constantes e outro alterando a rotação e o avanço, com o objetivo de manter  $v_c$  e  $f_z$  constantes durante a usinagem de um semi-cilindro. Para isso os autores utilizaram as fórmulas conforme Figura 10. Observa-se que, embora a geometria seja curva, os autores aproximam para um plano inclinado.

Figura 10 – Cálculo do diâmetro efetivo conforme Mikó e Beño.



$$D_{eff\_1} = D \cdot \sin(\beta + \alpha)$$

$$D_{eff\_2} = D \cdot \sin(\beta - \alpha)$$

Fonte: Mikó e Beño (2013).

Os autores verificaram que a trajetória que manteve a velocidade de corte constante foi a que apresentou melhores resultados de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  nos cinco pontos avaliados. Neste trabalho os autores não apresentam como foi realizada a variação da rotação e do avanço, mas concluem que um modelamento genérico para o diâmetro efetivo possibilita uma modificação contínua dos parâmetros.

## 2.6 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Verificando os trabalhos citados é possível perceber que a avaliação dos métodos propostos em cada estudo é realizada em termos da peça usinada (rugosidade, erro de forma, etc.) e do processo (tempo, consumo de insumos, etc.). A qualidade dos programas propostos é mensurada em termos da diferença entre um valor desejado e o obtido, ou entre um valor de referência e o obtido. Para a verificação da qualidade da superfície usinada a abordagem mais utilizada é por medições de rugosidade.

A medida de rugosidade é amplamente utilizada por ser direta, não destrutiva, de fácil interpretação e comparação de resultados. As medições podem ser por meio de rugosímetros, que fornecem a medida da rugosidade em uma direção específica, ou com o uso de equipamentos mais sofisticados que permitem a medição da rugosidade de uma área.

Segundo a norma ABNT NBR 4288:2008 a rugosidade deve ser medida perpendicularmente à direção de usinagem. Esta norma também define o comprimento de amostragem a ser utilizado, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Comprimento de amostragem para medição de  $R_a$ .

$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Compr. de amostragem [mm]	Compr. de avaliação [mm]
$(0,006) < R_a < 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a < 0,10$	0,25	1,25
$0,10 < R_a < 2,00$	0,8	4,0
$2,00 < R_a < 10,00$	2,5	12,5

Fonte: ABNT NBR 4288:2008.

O parâmetro de rugosidade  $R_a$  é o mais utilizado na indústria, conforme afirma Neto (2012). Riscos e marcas inerentes aos processos de fabricação afetam pouco a medida, por esse motivo é um parâmetro adequado para medições de peças usinadas. Batista (2006) afirma que o

parâmetro  $R_a$  não é suficiente para representar as características da superfície usinada, mas que seu valor pode ser utilizado como indicativo para a escolha correta dos parâmetros de corte.

A análise de perfis de superfície em três dimensões (3D) tem sido muito evidenciada por representar melhor a superfície. Para a medição da rugosidade em 3D os sistemas ópticos são mais adequados, neste sentido o microscópio confocal é um dos mais requisitados (SEKERES, 2015). Existem diversas vantagens ao se trabalhar com perfis 3D em relação à 2D, conforme afirma Oliveira (2004): melhor visualização da superfície; maior estabilidade estatística; melhor detecção e análise; disposição de muitos métodos para representar os dados. Porém o autor também afirma que existem desvantagens como: ciclos de medição mais longos; maior arquivamento de dados; e visualização mais subjetiva.

Outra forma de avaliar a superfície usinada é medir as tensões residuais. Ao usinar um material surgem tensões que podem ser trativas ou compressivas. Tensões trativas são geralmente associadas à altas temperaturas de corte, enquanto as tensões compressivas são indicativas de baixas temperaturas e maior trabalho mecânico (deformação plástica) (ASPINWALL et al., 2007).

Os parâmetros de corte influenciam nos níveis das tensões residuais, conforme comprovado por Caruso *et al.* (2010), que em seu estudo variou a velocidade de corte, avanço por aresta e desgaste da ferramenta. Os três parâmetros mostraram ter influência, de forma a aumentar a magnitude das tensões. Já Axinte e Dewes (2002) afirmam que um aumento da velocidade de corte diminuiu a magnitude das tensões residuais compressivas e que, em seu experimento, o aumento do avanço por aresta reduziu a rugosidade  $R_a$ .

Analisando os trabalhos detalhados nesta revisão, o impacto da variação da velocidade de corte nas peças usinadas fica claro. Embora existam estudos na área, pouco é proposto para endereçar o problema da variação da velocidade de corte. O único programa proposto que modifica a velocidade de corte não corrige a velocidade de avanço, além de utilizar fórmulas para superfícies planas.

Neste contexto, foi desenvolvido um estudo tanto para corroborar com os trabalhos já realizados, como propor uma forma de manter a velocidade de corte e o avanço por aresta constante ao longo de uma geometria qualquer. Ao aumentar a velocidade de corte, faz-se necessário aumentar a velocidade de avanço, de modo a proporcionar uma redução no tempo de fabricação. Para tanto foi desenvolvido um programa computacional e avaliado em termos do tempo de usinagem, da força e qualidade da superfície.



### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo é dividido em duas fases. Na primeira é realizado um desenvolvimento matemático para possibilitar o cálculo do diâmetro efetivo de contato em qualquer ponto de uma superfície. Na sequência, ainda na primeira fase, é proposto um programa de computador que altera os programas CNC gerados por sistemas CAM, de forma a manter constante a velocidade de corte em toda trajetória da ferramenta. Na segunda fase são realizados testes utilizando os programas CNC tratados pelo programa proposto, e comparados com os programas originais (gerados por sistemas CAM, sem qualquer tipo de modificação) em termos de tempo, força de usinagem e qualidade da superfície.

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL

O desenvolvimento matemático é realizado a partir dos conceitos básicos de geometria analítica, tendo como variáveis o diâmetro da ferramenta, as coordenadas e os vetores da superfície a ser usinada. O cálculo é realizado considerando o ponto de contato entre a superfície a ser usinada e a ferramenta. Não foi considerada a faixa de variação do diâmetro efetivo pois esta depende da profundidade de corte axial ( $a_p$ ) e do sentido de movimentação da ferramenta, o que eleva a complexidade do programa. Como resultado desta fase obtém-se uma equação que possibilita o cálculo do diâmetro efetivo em qualquer ponto da superfície usinada.

Posteriormente são desenvolvidas duas rotinas computacionais, a primeira rotina fornece as variáveis necessárias para o cálculo. Na segunda rotina são realizados os cálculos da velocidade de corte e velocidade de avanço e o programa CNC é otimizado através da alteração da rotação e da velocidade de avanço.

A primeira rotina é desenvolvida no ambiente programável do sistema CAD. Isso possibilita uma interação entre a programação e os recursos do CAD. O programa escolhido foi o Rhinoceros® com o uso do pacote Grasshopper como ambiente programável. Este programa foi escolhido devido ao fato que nele é possível fazer a programação por diagramas de blocos, o que facilita o trabalho, e o grupo de pesquisa onde foi desenvolvida o presente trabalho já possui conhecimento prévio no pacote. Neste programa, a partir da geometria 3D, é gerado um arquivo

em formato de texto com uma nuvem de pontos desta geometria e, para cada ponto gerado, é associado um vetor unitário normal à superfície.

O segundo programa é desenvolvido em *Visual Basic for Application* (VBA) em ambiente MS Excel. Essa escolha se deu pela facilidade de trabalhar com os dados na forma de planilha eletrônica e pelo conhecimento prévio do autor nesta linguagem. Neste programa é desenvolvida uma interface para facilitar o entendimento e a utilização por pessoas sem a necessidade de treinamento. Como variáveis de entrada são necessários três itens: o programa CNC pós-processado; o arquivo gerado pela primeira rotina; e os parâmetros do processo ( $v_c$ ,  $f_z$  e rotação máxima desejada). A saída deste programa deve ser o programa CNC corrigido, acrescentando informações de rotação e avanço ao final dos blocos, sempre que necessário. Assim, é garantida uma velocidade de corte e um avanço por aresta constante ao longo da trajetória.

## 3.2 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PROPOSTO

Nesta etapa busca-se avaliar os ganhos obtidos com a utilização do programa proposto, mantendo a velocidade de corte constante. Para isso são usinados corpos de prova e realizadas medições das componentes das forças atuantes no processo, medições de rugosidade e do tempo de processo, conforme detalhado nos tópicos a seguir.

### 3.2.1 Planejamento dos experimentos

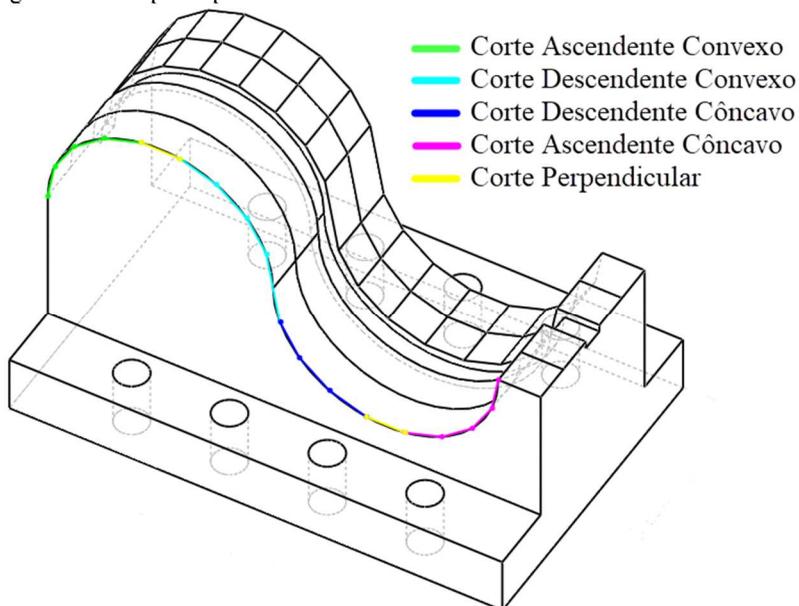
#### 3.2.1.1 O corpo de prova

O corpo de prova apresenta duas geometrias: uma complexa e outra facetada. A geometria complexa proporciona uma avaliação do comportamento da máquina em relação às alterações de rotação e avanço em uma situação real de aplicação. Na geometria facetada é possível verificar com precisão as forças e a rugosidade em diferentes condições de contato ferramenta-peça (faces planas com diferentes inclinações), relacionando com o diâmetro efetivo e velocidade de corte. Foram fabricados dois corpos de prova em aço AISI P20, cujo certificado de qualidade encontra-se no ANEXO B – Certificado de Qualidade Matéria Prima.

As dimensões máximas do corpo de prova são 80 mm de largura, 120 mm de comprimento e 80 mm de altura. Para cada geometria (complexa e facetada) é destinada uma faixa com 10 mm de largura para usinagem utilizando o programa CNC original (sem alterações) e, uma

faixa de igual largura para usinagem utilizando o programa CNC tratado pelo programa proposto. Totalizando, então, quatro operações por corpo de prova. A Figura 11 ilustra o corpo de prova e as quatro faixas a serem avaliadas. A geometria possui regiões com as principais condições de corte: corte ascendente e descendente, côncavo e convexo, além de regiões de corte perpendicular. Desta forma há regiões onde o diâmetro efetivo é igual ao nominal, regiões intermediárias e regiões onde o diâmetro efetivo é igual a zero (centro da ferramenta em contato).

Figura 11 – Corpo de prova.

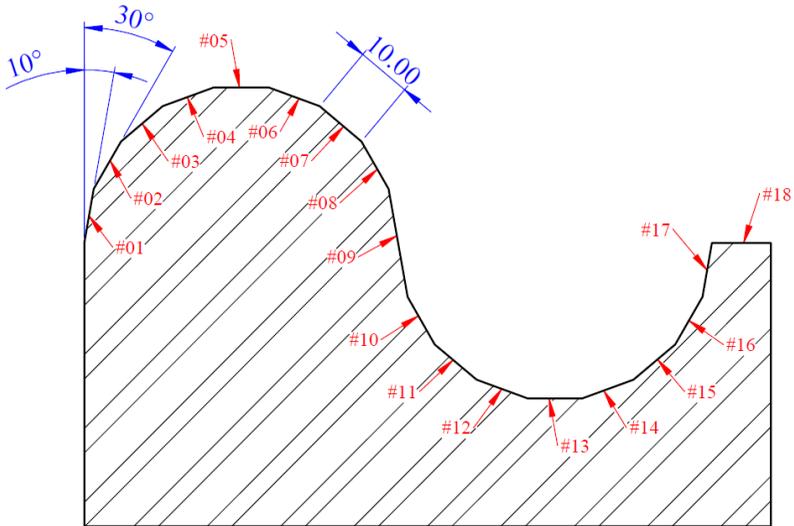


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

A geometria facetada foi projetada de forma que cada face tenha um comprimento de 10 mm e o ângulo entre duas faces adjacentes seja  $20^\circ$ . A primeira face apresenta um ângulo de  $10^\circ$  em relação a vertical, a segunda face  $30^\circ$ , e assim por diante. As faces 5, 13 e 18 apresentam ângulo de  $90^\circ$  em relação a vertical. A Figura 12 apresenta as faces numeradas conforme será tratado no decorrer do estudo.

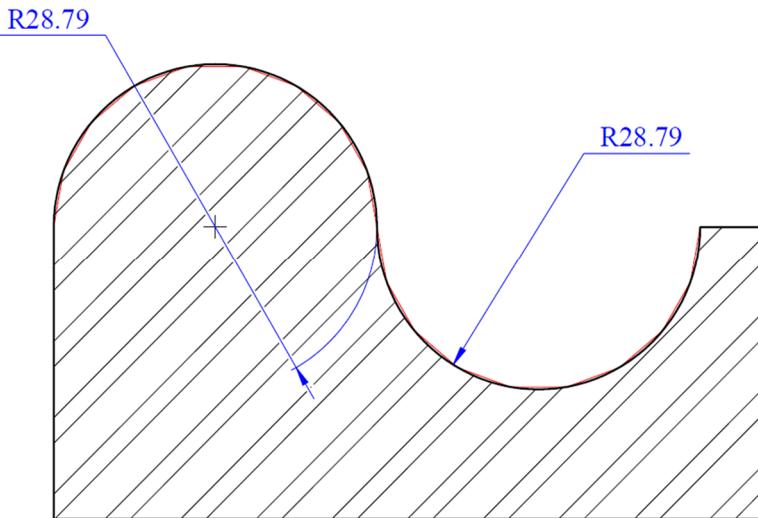
A geometria complexa foi desenhada tendo como referência os vértices da geometria facetada, desta forma são traçados dois círculos com raio de 28,79 mm, conforme ilustrado na Figura 13. O semicírculo convexo tangencia a parede vertical e o semicírculo côncavo.

Figura 12 – Geometria facetada.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Figura 13 – Geometria complexa.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

### 3.2.1.2 Desbaste e pré-acabamento

Os processos de desbaste e pré-acabamento dos corpos de prova foram realizados no centro de usinagem vertical ROMI D600 disponível no laboratório GPCAM do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ). Os parâmetros utilizados neste processo estão disponíveis na Tabela 2 e na Tabela 3. Durante os processos de desbaste e pré-acabamento todas as faces do CDP são usinadas no mesmo programa, sem distinção, garantindo homogeneidade para os experimentos.

No desbaste foram realizados passes paralelos no sentido transversal ao processo de pré-acabamento e acabamento. O processo de pré-acabamento foi realizado utilizando passes paralelos no mesmo sentido do acabamento, para que houvesse a mínima influência da altura de crista no processo final.

Tabela 2 – Parâmetros de corte utilizados no desbaste

	<i>Ferramenta</i>	$a_e$	$a_p$	<i>Estratégia</i>	<i>F</i>	<i>S</i>
<i>Unidade</i>	-	mm	mm	-	mm/min	rpm
<i>Valor</i>	Topo 20 mm	6.0	1.0	Passes transversais	1050	3500

Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor

Tabela 3 – Parâmetros de corte utilizados no pré-acabamento

	<i>Ferramenta</i>	$a_e$	$a_p$	<i>Estratégia</i>	<i>F</i>	<i>S</i>
<i>Unidade</i>	-	mm	mm	-	mm/min	rpm
<i>Valor</i>	Esférica 16 mm	0.8	0.4	Passes longitudinais	1600	4000

Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor

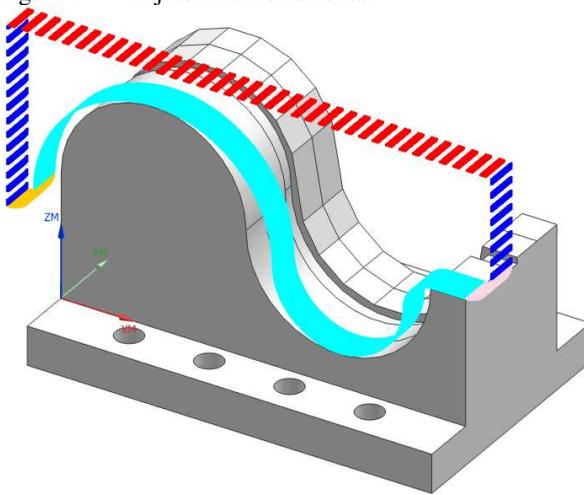
Devido ao fato de a usinagem de acabamento não ser realizada utilizando os mesmos dispositivos de fixação das etapas anteriores, optou-se por manter um sobremetal de forma a permitir um novo pré-acabamento antes do experimento. Desta forma são eliminados eventuais desalinhamentos inerentes à fixação e referenciamento do corpo de prova.

### 3.2.1.3 Experimentos de usinagem

Nos experimentos foram utilizadas trajetórias do tipo passes paralelos unidirecionais (zigue) no sentido longitudinal do corpo de prova. Esta trajetória foi escolhida por possibilitar a análise dos resultados

de forma independente para cada região, pois a ferramenta passa sempre no mesmo sentido, Figura 14. Segundo Lasemi, Xue e Gu (2010) esta estratégia é a mais comumente utilizada neste tipo de pesquisa devido à sua simplicidade e adaptabilidade às aplicações de engenharia.

Figura 14 – Trajetória da ferramenta.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

A Tabela 4 apresenta os valores nominais para os parâmetros de processo que foram utilizados nos experimentos. Importante ressaltar que a velocidade de avanço ( $F$ ) e rotação ( $S$ ) são constantemente alteradas pelo programa proposto, de forma a manter constante a velocidade de corte e o avanço por aresta. Neste experimento o comprimento em balanço utilizado foi de 56,00 mm.

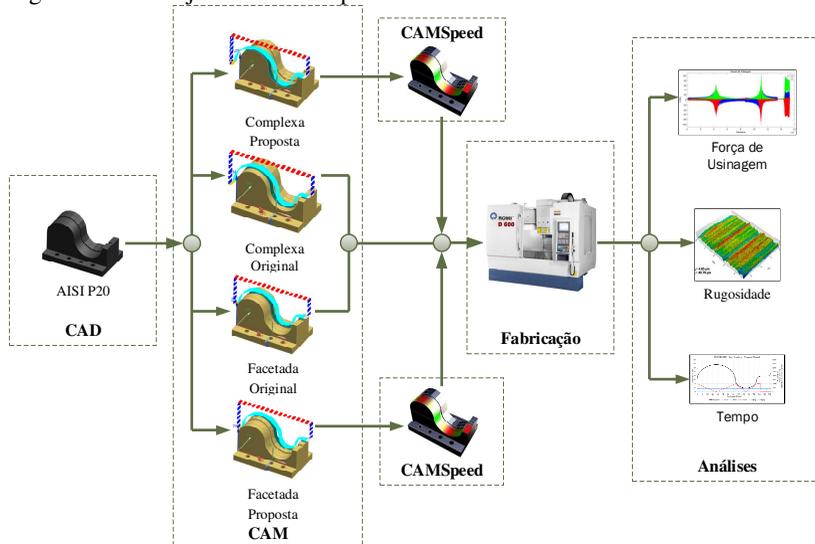
Tabela 4 – Parâmetros nominais de corte utilizados

	$a_e$	$a_p$	$F$	$S$	$v_c$	$f_z$
<b>Unidade</b>	mm	mm	mm/min	rpm	m/min	mm/aresta/rot.
<b>Valor</b>	0.2	0.2	796	3980	200	0.10

Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor

O fluxograma exibido na Figura 15 ilustra o procedimento experimental adotado neste trabalho. Os corpos de prova foram modelados e os programas CNC foram gerados utilizando o sistema CAD/CAM Siemens NX 9.0.

Figura 15 – Planejamento dos experimentos



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

### 3.2.1.4 Análise da superfície

Para a análise da rugosidade e da superfície foi utilizado um microscópio confocal disponível no laboratório NUMA na EESC-USP. Neste trabalho a rugosidade é analisada nas nove faces da região convexa da geometria facetada e em áreas equivalentes da geometria complexa. A região côncava não foi analisada devido às limitações do equipamento utilizado.

Adicionalmente são realizadas medições de rugosidade na região côncava com o uso de um rugosímetro portátil. Este procedimento é realizado apenas para validar as medições do microscópio com um instrumento de domínio dos pesquisadores.

Todas as medições de rugosidade foram realizadas no sentido perpendicular ao avanço e com comprimento de amostragem de 0,8 mm, conforme estipulado pela ABNT NBR 4288:2008.

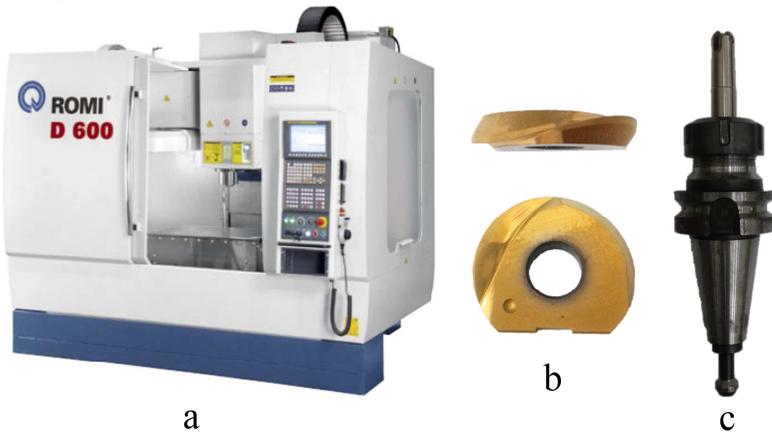
### 3.2.2 Equipamentos utilizados

#### 3.2.2.1 Centro de usinagem e ferramentas

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem vertical ROMI D600, três eixos, com comando numérico FANUC Oi-MC. Esta máquina possui capacidade de deslocamento máximo de 600x530x580mm nas direções X, Y e Z, respectivamente. O eixo árvore têm potência máxima de 15kW e rotação de 8.000 rpm, Figura 16a.

As ferramentas utilizadas na usinagem são fresas intercambiáveis de 16,0 mm de diâmetro com insertos WRHS016, Figura 16b. A haste da ferramenta é do modelo WGR16-S16-150, Figura 16c, ambas da fabricante Speed Tiger. A ferramenta foi fixada utilizando pinça ER32.

Figura 16 – (a) Centro de usinagem Romi D600; (b) insertos intercambiáveis; (c) Montagem da haste da ferramenta e sistema de fixação.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

#### 3.2.2.2 Aquisição de dados

Durante o processo de usinagem, a aquisição das componentes cartesianas da força de usinagem é realizada com o uso de um dinamômetro Kistler modelo 9257BA, Figura 17a, com um amplificador de carga Kistler 5233A de até 10 KN, Figura 17b, em conjunto com o programa LabView. As rotinas utilizadas estão disponíveis no ANEXO C – Rotinas LabView. A aquisição do sinal de força se dá a uma taxa de 10K Hz.

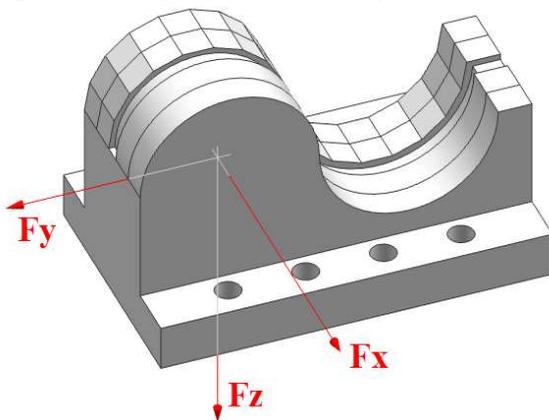
Figura 17 – Equipamentos utilizados para aquisição das componentes da força de usinagem: (a) Dinamômetro e (b) amplificador



Fonte: Adaptado de Kistler (2018).

A Figura 18 indica a direção e sentido das componentes cartesianas da força de usinagem, no corpo de prova, medidas pelo dinamômetro.

Figura 18 – Direção e sentido das componentes cartesianas da força de usinagem.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

### 3.2.2.3 Equipamentos de medição de rugosidade

As medições de qualidade da superfície foram realizadas em um microscópio confocal de varredura a laser Olympus LEXT OLS4100, disponível no laboratório NUMA na EESC-USP. Este equipamento possibilita medições de perfil de rugosidade como  $R_a$  e  $R_z$  e medições tridimensionais como  $S_a$  e  $S_z$ . A Figura 19 apresenta o microscópio utilizado.

Figura 19 – Microscópio confocal de varredura a laser Olympus LEXT OLS4100.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor

O rugosímetro portátil digital utilizado é da fabricante Mitutoyo modelo Surftest SJ-210. Este equipamento permite medições de  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ , entre outras. Os dados são exportados em planilhas eletrônicas possibilitando o tratamento estatístico e gráfico dos resultados das medições.

### 3.2.3 Processamento dos dados

As rotinas utilizadas para aquisição das forças fornecem os dados em arquivo de texto (formato .txt). Para tratar os dados gerados nos experimentos utilizou-se primeiramente uma rotina no programa Matlab R2016a, disponível no Anexo D – Rotinas Matlab. Essa rotina elimina as colunas não utilizadas, restringe os dados à região de interesse (definida pelo usuário) e minimiza os efeitos da deriva (inerentes ao dinamômetro). Utilizou-se o programa MS Excel para a compilação dos resultados e tratamento estatístico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em desenvolvimento computacional e validação do programa proposto. Na primeira parte são demonstrados o desenvolvimento matemático e o desenvolvimento do sistema computacional. Na segunda parte é apresentada uma validação do sistema desenvolvido e os resultados de sua aplicação, comparando com o processo convencional de usinagem.

### 4.1 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

#### 4.1.1 Desenvolvimento matemático

Inicialmente é preciso identificar o diâmetro efetivo da ferramenta em função da superfície da peça a ser usinada. Neste trabalho será considerado como diâmetro efetivo o diâmetro medido no ponto CC. Sabe-se que existe uma região de contato onde o diâmetro efetivo varia de um valor mínimo até um máximo, conforme constatado por Souza *et al.* (2014a). Esse fato não será considerado pois com ele entra a dependência da direção da ferramenta. Em um corte ascendente o diâmetro efetivo no ponto CC será o mínimo, já para um corte descendente será o valor máximo. Então, para considerar esta situação seria preciso que o programa identificasse a direção do avanço, o que demandaria um maior custo computacional.

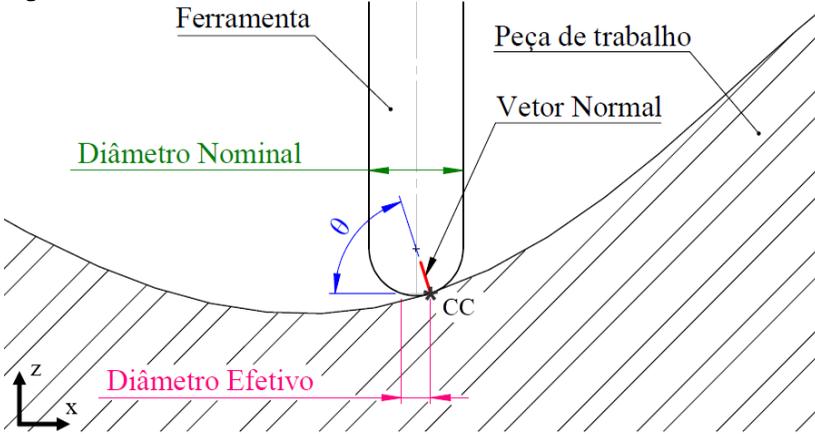
Definindo  $\vec{V}_N$  como o vetor unitário normal à superfície no ponto CC e  $\theta$  o ângulo agudo entre  $\vec{V}_N$  e o plano XY (Figura 20) tem-se:

$$R_{ef} = R_{fer} \cos \theta \quad (15)$$

Ou

$$D_{ef} = D_{fer} \cos \theta \quad (16)$$

Figura 20 – Variáveis envolvidas no cálculo do diâmetro efetivo.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Sendo  $\vec{H}$  o vetor unitário normal ao plano XY, e a partir das equações de cálculo vetorial, tem-se que o ângulo formado entre o plano e o vetor é dado por:

$$\sin \theta = \frac{|\vec{v}_N \cdot \vec{H}|}{|\vec{v}_N| \cdot |\vec{H}|} \quad (17)$$

Como ambos os vetores são unitários a equação é simplificada para:

$$\sin \theta = |\vec{v}_N \cdot \vec{H}| \quad (18)$$

Em que o produto escalar é dado por:

$$|\vec{v}_N \cdot \vec{H}| = X_{v_N} X_H + Y_{v_N} Y_H + Z_{v_N} Z_H \quad (19)$$

Como as componentes X e Y do vetor  $\vec{H}$  são zero, e a componente Z vale um, a Equação 18 é simplificada:

$$\sin \theta = |\vec{v}_N \cdot \vec{H}| = Z_{v_N} \quad (20)$$

Desta forma, utilizando a igualdade  $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$  e a Equação 16, tem-se que:

$$D_{ef} = D_{fer} \sqrt{1 - Z_{V_N}^2} \quad (21)$$

O vetor  $\vec{V}_N$  é unitário, portanto a Equação 21 pode ser reescrita utilizando o módulo de  $\vec{V}_N$ :

$$X_{V_N}^2 + Y_{V_N}^2 + Z_{V_N}^2 = 1 \quad (22)$$

Então,

$$D_{ef} = D_{fer} \sqrt{1 - (1 - X_{V_N}^2 - Y_{V_N}^2)} \quad (23)$$

Que pode ser reescrita,

$$D_{ef} = D_{fer} \sqrt{X_{V_N}^2 + Y_{V_N}^2} \quad (24)$$

Tendo definido cálculo do diâmetro efetivo, busca-se então, a equação para correção da velocidade de corte. Esta é uma relação de proporcionalidade entre o diâmetro efetivo e o diâmetro nominal da ferramenta, conforme segue.

A partir da Equação 1 espera-se manter a velocidade de corte constante entre o diâmetro nominal ( $D_{fer}$ ) e o diâmetro efetivo ( $D_{ef}$ ), alterando a rotação do valor nominal ( $n_N$ ) para o valor corrigido ( $n_{cor}$ ),

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{fer} \cdot n_N}{1000} = \frac{\pi \cdot D_{ef} \cdot n_{cor}}{1000} \quad (25)$$

Neste ponto é possível verificar que ao substituir a Equação 24 na Equação 25 obtém-se o primeiro termo da Equação 13, proposta por Fan (2014). Os demais termos daquela equação são relativos à velocidade de avanço, que o próprio autor desconsidera no decorrer do trabalho. Reescrevendo a Equação 25 isolando a rotação corrigida ( $n_{cor}$ ):

$$n_{cor} = \frac{D_{fer} \cdot n_N}{D_{ef}} \quad (26)$$

Que ainda pode ser reescrita em função da velocidade de corte:

$$n_{cor} = v_c \cdot 1000 / \pi \cdot D_{ef} \quad (27)$$

Substituindo a Equação 24 na Equação 27,

$$n_{cor} = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \times D_{fer} \sqrt{X_{V_N}^2 + Y_{V_N}^2}} \quad (28)$$

A Equação 28 fornece a rotação necessária para manter no valor especificado a velocidade de corte em um dado ponto CC. Com isso é preciso definir a velocidade de avanço para esta rotação, a fim de manter o avanço por aresta também no valor especificado. Para isso basta aplicar a rotação corrigida na Equação 2, substituindo  $n$  por  $n_{cor}$ .

$$F_{cor} = f_z \cdot na \cdot n_{cor} \quad (29)$$

#### 4.1.2 Rotina para obtenção dos vetores normais à superfície

Os cálculos descritos foram deduzidos com o objetivo de obter as Equações 28 e 29 que serão utilizadas para o cálculo da compensação da velocidade de corte. Conforme foi mostrado, todos os cálculos dependem do vetor normal à superfície, desta forma foi criada uma rotina, em um sistema CAD, para a obtenção destes vetores.

O primeiro processo dessa rotina é gerar uma malha sobre a superfície a ser usinada, onde o usuário define a quantidade de pontos que deseja. Deste processo saem as coordenadas (X, Y e Z) e o vetor normal de cada nó desta malha. O recurso utilizado para realizar este processo é o *SDivide*, um recurso próprio do aplicativo Grasshopper. Os dados obtidos com o recurso *SDivide* são agrupados, formatados e salvos em formato de texto (.txt).

Adicionalmente, utilizando as saídas do primeiro processo, calcula-se o diâmetro efetivo e, a partir dele, é aplicado um gradiente de cor na superfície avaliada. O gradiente foi aplicado para que o usuário tenha, já nesta etapa, uma visão das regiões críticas para a velocidade de corte. O gradiente utiliza o padrão RGB (do inglês *Red, Green, Blue*), um sistema de cores aditivas, onde todas as cores são definidas pela combinação das cores Vermelho, Verde e Azul. A intensidade de cada cor pode variar de zero a 255.

Utilizou-se este sistema por ser numérico, possibilitando associar a intensidade de cada uma das três cores a uma equação. Definiu-se que

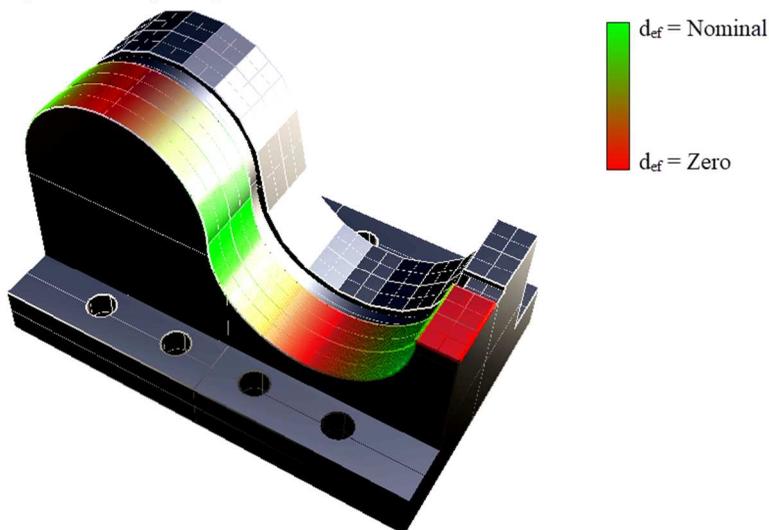
quando  $D_{ef} = D_N$  então deve ser utilizada a cor Verde ( $R = 0, G = 255, B = 0$ ) e quando  $D_{ef} = 0$  a cor Vermelha ( $R = 255, G = 0, B = 0$ ) deve ser utilizada. Para os casos intermediários ( $0 < D_{ef} < D_N$ ), uma relação linear foi aplicada para as cores vermelha e verde, conforme Equações 30 e 31, respectivamente. Dessa forma a cor da superfície em cada ponto está relacionada ao diâmetro efetivo, e consequentemente à velocidade de corte.

$$R = 255 - 255 \cdot \sqrt{X_{V_N}^2 + Y_{V_N}^2} \quad (30)$$

$$G = 255 \cdot \sqrt{X_{V_N}^2 + Y_{V_N}^2} \quad (31)$$

O termo  $\sqrt{X_{V_N}^2 + Y_{V_N}^2}$  varia de zero a um, sendo zero quando o vetor normal à superfície é um vetor na direção Z ( $D_{ef} = 0$ ) e um quando a componente Z deste vetor vale zero ( $D_{ef} = D_N$ ). A Figura 21 mostra o gradiente de cor aplicado à superfície complexa do corpo de prova.

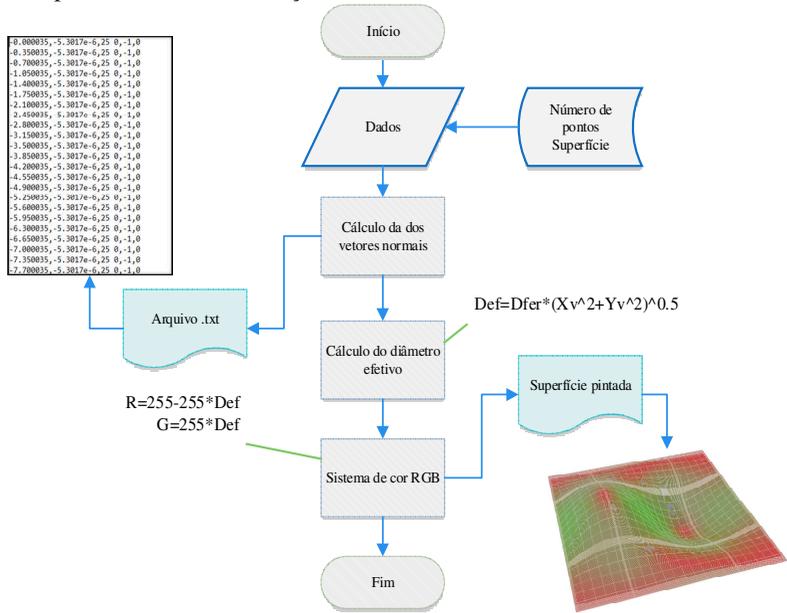
Figura 21 – Gradiente de cor do sistema desenvolvido aplicado à superfície complexa do corpo de prova.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

A Figura 22 mostra o fluxograma desta rotina e uma superfície complexa avaliada. O diagrama de blocos desta rotina pode ser visualizado no APÊNDICE A – Rotina Grasshopper.

Figura 22 – Fluxograma da rotina para obtenção dos vetores normais e superfície com padrão de cores em função da velocidade de corte efetiva.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

### 4.1.3 Sistema computacional desenvolvido – CAM Speed

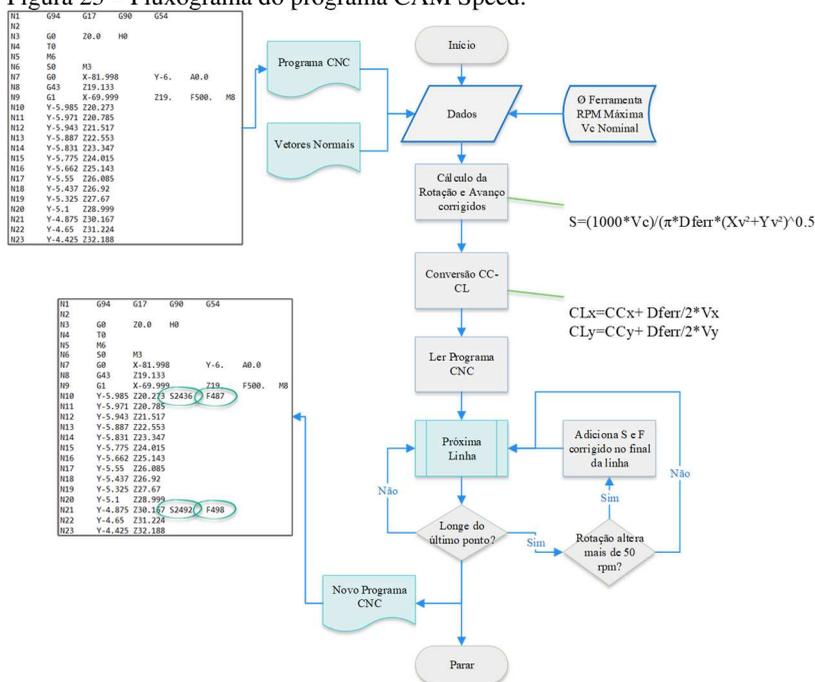
O programa desenvolvido para esta etapa do trabalho obteve seu registro junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial) e o certificado deste registro encontra-se no ANEXO E – Certificado de Registro de Programa de Computador.

O programa CAM Speed foi desenvolvido em linguagem VBA para realizar uma otimização off-line da velocidade de corte, alterando o código do programa CNC (código G). O uso de algoritmos off-line de otimização leva a melhores resultados de qualidade da superfície e precisão geométrica, principalmente quando a máquina ferramenta utilizada não é de alto desempenho. Este tipo de programa é, de forma geral, de fácil utilização e de custo inexpressivo se comparado à um comando numérico de alto desempenho (KRAJNIK; KOPAČ, 2004).

O programa proposto funciona de forma semelhante a dois programas encontrados na literatura. O apresentado por Krajnik e Kopač (2004), que altera o programa CNC adicionando ao final do bloco a velocidade de avanço, e o programa proposto Kim et al. (2002) que adiciona ao final do bloco um comando para alterar a rotação. Desta forma o programa proposto acrescenta ao final das linhas do programa CNC um comando para alterar a rotação e a velocidade de avanço.

O programa CAM Speed foi desenvolvido para calcular o diâmetro efetivo de contato de uma fresa de ponta esférica e, a partir deste valor, calcular a rotação necessária da ferramenta a fim de manter a velocidade de corte constante. O programa também corrige a velocidade de avanço para manter o avanço por aresta constante, devido às alterações de rotação. A Figura 23 apresenta o fluxograma simplificado do programa CAM Speed.

Figura 23 – Fluxograma do programa CAM Speed.

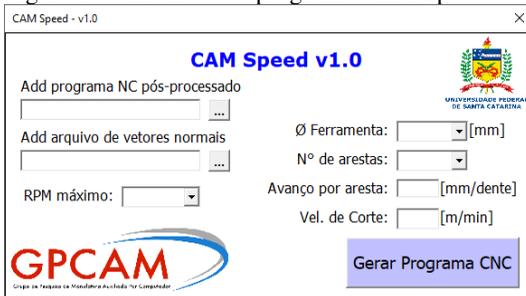


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor

Para isso são entradas do programa o arquivo do programa CNC pós-processado em formato de texto (.txt), um arquivo com a nuvem de

pontos da superfície e seus vetores normais em formato de texto (.txt), o diâmetro da ferramenta em milímetros, número de arestas da ferramenta, rotação máxima pretendida em rpm, o avanço por aresta em milímetros por aresta por revolução, e a velocidade de corte desejada, em metros por minuto. A Figura 24 ilustra a interface do programa onde são fornecidas estas informações.

Figura 24 – Interface do programa CAM Speed.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor

Ao iniciar o processo o programa realiza a importação do arquivo de vetores normais na forma de planilha eletrônica, a partir deste ponto chamada de Planilha de Vetores. Na importação do arquivo dos vetores normais, enquanto o programa lê o arquivo linha-a-linha, já realiza três cálculos. Primeiro calcula a rotação que a ferramenta deve ter neste ponto, utilizando a Equação 28. O cálculo da rotação necessária é realizado utilizando um condicional, onde será salvo o valor da equação desde que este seja inferior à rotação máxima definida inicialmente, caso contrário é utilizado o valor da rotação máxima. Na sequência a velocidade de avanço necessária para manter o avanço por aresta constante é calculada, com o uso da Equação 29. Em seguida, define o ponto CL correspondente ao ponto lido (CC), utilizando a Equação 4, proposta por Choi e Jerard (1998). Estes valores são salvos na planilha nas colunas G, H, I e J, sendo na coluna G a rotação corrigida, na coluna H e I as coordenadas x e y do ponto CL, respectivamente. A coluna J recebe os valores do avanço corrigido. A Figura 25 ilustra a planilha após os cálculos descritos acima.

Figura 25 – Planilha de Vetores com os cálculos já realizados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	X	Y	Z	V <sub>X</sub>	V <sub>Y</sub>	V <sub>Z</sub>	n <sub>teor</sub>	CL <sub>X</sub>	CL <sub>Y</sub>	f <sub>teor</sub>
2	0	0.199904	36.64359	-1	0	0	3978.87	-8	0.199904	795.77
3	0	9.200084	36.64359	-1	0	0	3978.87	-8	9.200084	795.77
4	0	9.800096	36.64359	-1	0	0	3978.87	-8	9.800096	795.77
5	9.415229	6.200024	57.94042	-0.67301	0	0.739631	5912.03	4.031125	6.200024	1182.41
6	9.415229	6.800036	57.94042	-0.67301	0	0.739631	5912.03	4.031125	6.800036	1182.41
7	9.415229	7.400048	57.94042	-0.67301	0	0.739631	5912.03	4.031125	7.400048	1182.41
8	20.76062	0.199904	64.29415	-0.27899	0	0.960294	7500.00	18.5287	0.199904	1500.00
9	20.76062	0.799916	64.29415	-0.27899	0	0.960294	7500.00	18.5287	0.799916	1500.00
10	20.76062	1.399928	64.29415	-0.27899	0	0.960294	7500.00	18.5287	1.399928	1500.00
11	40.64294	0.199904	62.8864	0.411514	0	0.911403	7500.00	43.93505	0.199904	1500.00
12	40.64294	0.799916	62.8864	0.411514	0	0.911403	7500.00	43.93505	0.799916	1500.00
13	40.64294	1.399928	62.8864	0.411514	0	0.911403	7500.00	43.93505	1.399928	1500.00
14	49.15418	8.00006	57.00392	0.707107	0	0.707107	5626.98	54.81104	8.00006	1125.40
15	49.15418	8.600072	57.00392	0.707107	0	0.707107	5626.98	54.81104	8.600072	1125.40

Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Ao finalizar os cálculos inicia-se a importação do programa CNC, que também é convertido para planilha eletrônica, a partir deste ponto chamada de Planilha CNC. Para facilitar a análise, cada comando CNC é salvo em uma célula separada, Figura 26.

Figura 26 – Exemplo de programa CNC importado

	A	B	C	D	E
1	N0010	G17	G64	G54	
2	N0020	G00	Z100.000		
3	N0040	X-016.282	Y000.000	S3979	M03
4	N0060	Z023.246			
5	N0070	G01	X-015.890	F796	
6	N0080	X-015.497	Z023.265		
7	N0090	X-015.107	Z023.304		
8	N0100	X-014.718	Z023.361		
9	N0110	X-014.333	Z023.438		
10	N0120	X-013.952	Z023.533		

Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Tendo ambas planilhas montadas, o programa CAM Speed passa a buscar em cada bloco do programa CNC (linha da Planilha CNC) as coordenadas x e y (ponto CL). De posse destas coordenadas inicia-se a busca por pontos equivalentes na Planilha de Vetores. A equivalência é considerada como aceitável quando as coordenadas do programa CNC estão a uma distância menor ou igual a 0,5 mm do ponto avaliado. Nesta etapa a comparação é realizada utilizando as colunas H e I da Planilha de Vetores. O programa considera, também, a distância entre pontos no programa CNC, onde ignora as linhas em que a distância entre o último ponto avaliado e o ponto atual é menor do que um milímetro.

Ao encontrar na Planilha de Vetores os pontos CL equivalentes ao ponto avaliado no programa CNC, é avaliada a diferença entre a última rotação definida e a que está sendo avaliada. Caso a diferença entre estas

seja menor que 50 rpm este valor não será atribuído e o programa passa a avaliar a próxima linha do programa CNC. Caso contrário o programa adiciona o valor da rotação, precedido pela letra S, na primeira célula vazia da linha da Planilha CNC que está sendo avaliada e, na célula seguinte, adiciona o valor do avanço precedido pela letra F. A Figura 27 apresenta a Planilha CNC após este processo.

As condições acima foram impostas a fim de não sobrecarregar com informações a máquina CNC, com alterações de rotação e avanço desnecessárias. Dessa forma, pontos do programa CNC próximos, e pontos suficientemente distantes, mas com diâmetro efetivo próximo, são considerados iguais, isto é, sem alterações no programa CNC.

Figura 27 – Planilha CNC

	A	B	C	D	E
33	N0560	X-006.288	Z042.030	S4063	F812
34	N0570	X-005.989	Z042.915		
35	N0580	X-005.689	Z043.732	S4143	F828
36	N0590	X-005.539	Z044.117		
37	N0600	X-005.389	Z044.493		
38	N0610	X-005.239	Z044.861		
39	N0620	X-004.939	Z045.559	S4228	F845

Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

O valor de 50 RPM como critério para alterar a rotação do eixo foi definido em testes onde a máquina mostrou um melhor comportamento com alterações pequenas em comparação com alterações de 100 e 200 RPM.

Este procedimento é repetido até a última linha não vazia da Planilha CNC. Ao identificar o final deste ciclo a Planilha CNC é exportada para o formato de texto separado por tabulação (.txt). Este arquivo é salvo no mesmo diretório onde está o programa CNC. Todo este procedimento é realizado após o operador pressionar o botão “Gerar programa CNC”, ilustrado na Figura 24.

## 4.2 AVALIAÇÃO DO PROGRAMA PROPOSTO

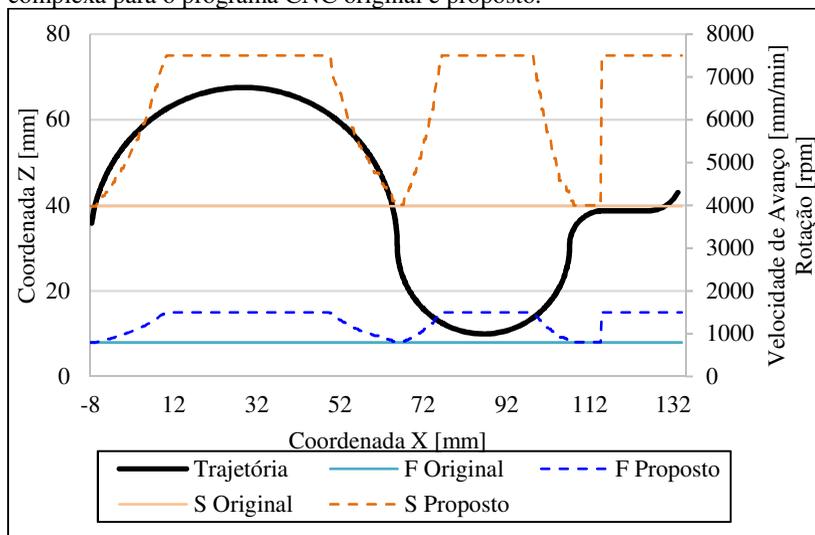
Primeiramente é preciso garantir que o método proposto não danifique a máquina ferramenta. Seguy et al. (2010) afirma que segundo os fabricantes de eixos-árvore e controladores de potência, não deve haver redução da vida dos componentes devido à variação da rotação. Essa informação foi confirmada em conversa com representante técnico do comando numérico.

O programa proposto é validado em quatro perspectivas: funcionamento do programa, tempo de usinagem, forças atuantes no processo e qualidade da superfície usinada. A partir deste ponto os programas CNC tratados pelo programa CAM Speed serão chamados apenas de “programa proposto”.

#### 4.2.1 Avaliação do programa gerado

Para verificar as modificações realizadas é preciso observar o avanço programado em cada um dos casos. O programa original mantém a velocidade de avanço e rotação constantes, calculadas com base no diâmetro nominal da ferramenta. Para o programa proposto a rotação é calculada com base no diâmetro efetivo e a velocidade de avanço com base nesta rotação, desta forma a velocidade de avanço será sempre maior ou igual à velocidade de avanço nominal. Isso se dá pelo fato de o diâmetro efetivo ser sempre menor ou igual ao diâmetro nominal. A Figura 28 apresenta a velocidade de avanço (F) para o programa original e proposto ao longo da trajetória complexa do corpo de prova. Nesta mesma figura é apresentada a rotação da ferramenta (S), que varia do valor nominal (3979 rpm) ao valor máximo definido (7500 rpm).

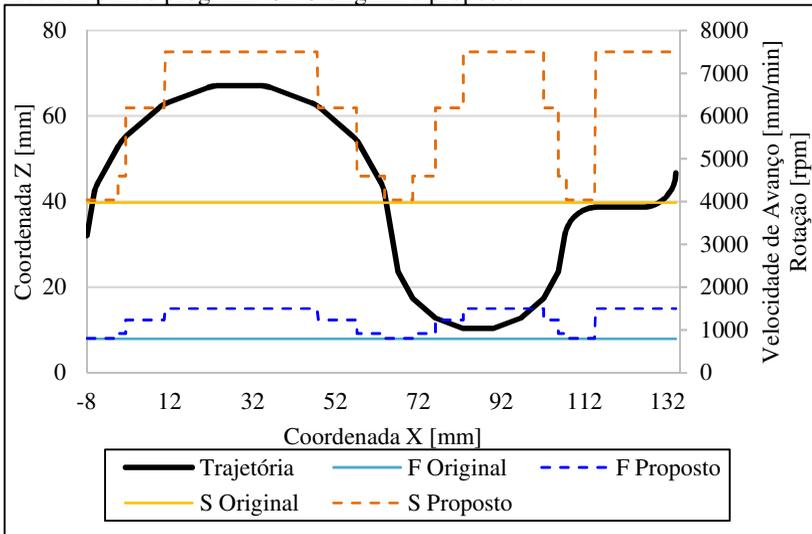
Figura 28 – Perfil da rotação e velocidade de avanço ao longo da trajetória complexa para o programa CNC original e proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Analisando o gráfico da Figura 28 observa-se que a velocidade de avanço do programa proposto se iguala ao programa original em apenas três regiões, sendo superior no restante da trajetória. A Figura 29 apresenta as mesmas variáveis para a geometria facetada dos programas original e proposto. Nesta figura também é possível verificar que durante toda a trajetória o programa proposto mantém o avanço maior ou igual ao programa original. Nesta geometria os valores de rotação e velocidade de avanço apresentam valores bem definidos para cada face (degraus).

Figura 29 – Perfil da rotação e velocidade de avanço ao longo da trajetória facetada para o programa CNC original e proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

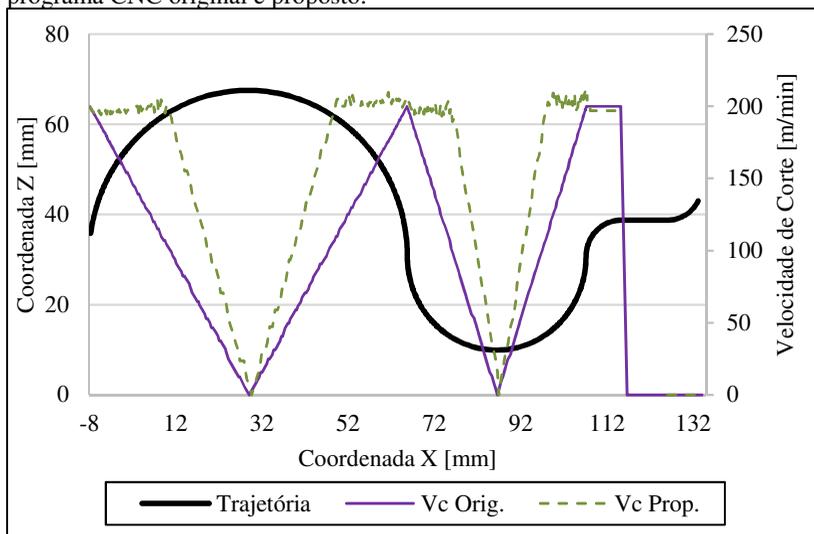
Nos pontos de maior velocidade, o programa proposto atinge uma velocidade de avanço 1,88 vezes superior ao programa original. A velocidade de avanço variou de 795 mm/min a 1500 mm/min. Desta forma é esperado que os programas CNC modificados pelo programa CAMSpeed apresentem um menor tempo de execução se comparados com os programas originais.

As Figuras 30 e 31 mostram o comportamento da velocidade de corte para a geometria complexa e facetada, respectivamente. É possível verificar no programa proposto (linha tracejada) que, enquanto há alteração da rotação, a velocidade de corte se mantém constante. A partir do momento em que a rotação máxima é atingida a velocidade de corte

varia. Já os programas originais apresentam variação da velocidade de corte em todo o percurso da ferramenta.

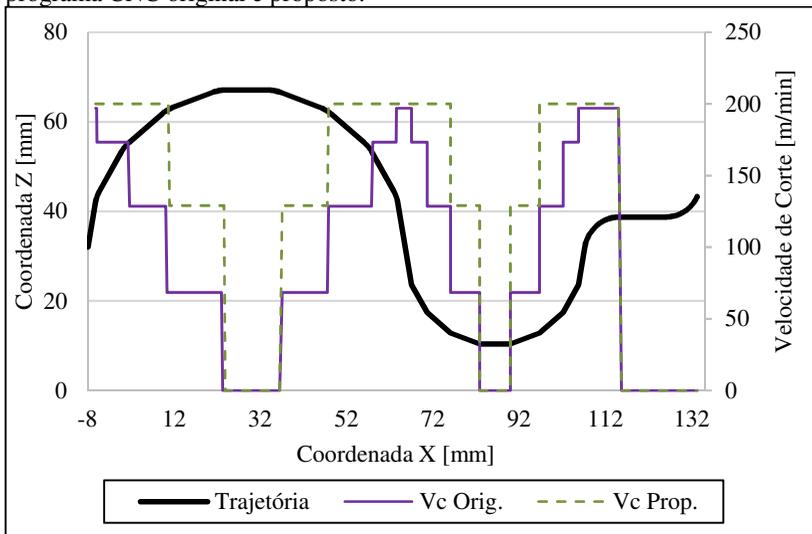
As oscilações da velocidade de corte em torno do valor de 200 m/min são consequência do critério utilizado pelo programa CAM Speed, onde só é alterada a rotação quando a diferença for maior de 50 rpm. Esta oscilação não chega a ser um problema, uma vez que os valores variam aproximadamente 10 m/min, o que corresponde a 5% do valor nominal.

Figura 30 – Perfil da velocidade de corte ao longo da trajetória complexa para o programa CNC original e proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Figura 31 – Perfil da velocidade de corte ao longo da trajetória facetada para o programa CNC original e proposto.

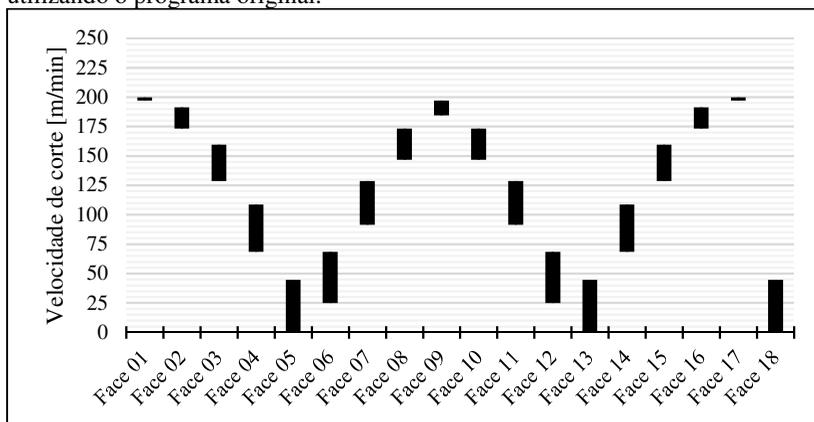


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Ao observar os gráficos anteriores deve se ter em mente que os valores das velocidades de corte representados são referentes ao ponto de contato (CC). Desta forma, para cada ponto de contato a velocidade de corte varia entre um valor máximo e mínimo, conforme apresentado na revisão de literatura. Para as regiões de corte ascendente o valor mostrado nos gráficos acima representa o valor mínimo, enquanto que nas regiões de corte descendente é apresentado o valor máximo da velocidade de corte.

Para facilitar o entendimento foram traçados gráficos com a faixa de variação da velocidade de corte para cada face da geometria facetada. A Figura 32 apresenta a faixa de variação da velocidade de corte ao utilizar o programa original e a Figura 33 apresenta a faixa da velocidade de corte quando é utilizado o programa proposto.

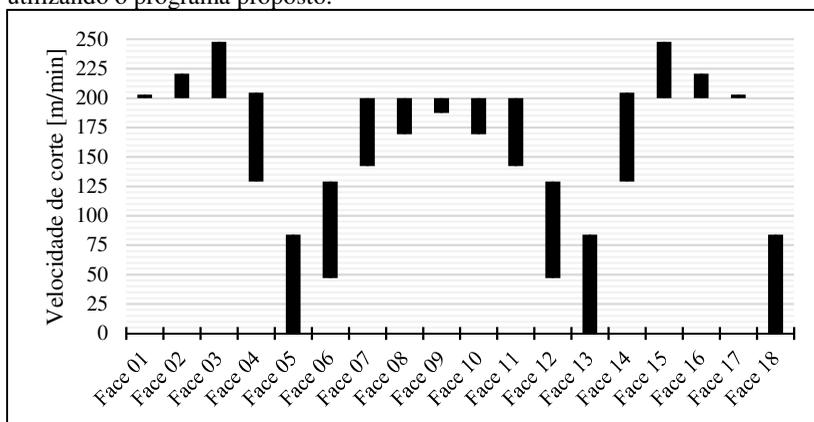
Figura 32 – Faixa de variação da velocidade de corte na geometria facetada utilizando o programa original.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

A partir da Figura 32 é possível verificar que a velocidade de corte nas faces descendentes é sempre inferior às faces ascendentes correspondentes.

Figura 33 – Faixa de variação da velocidade de corte na geometria facetada utilizando o programa proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Ao analisar o gráfico da Figura 33 fica evidente o efeito do uso do ponto CC para o cálculo da velocidade de corte. Em regiões de corte ascendente a velocidade de corte varia a partir do valor definido (200

m/min), e em regiões de corte descendente a variação tem como limite o valor definido.

Nas regiões onde a velocidade real de corte supera o valor programado, é preciso tomar cuidado, pois velocidades excessivas aumentam a temperatura e reduzem a vida da ferramenta, conforme explica Diniz, Marcondes e Coppini (2013). Contudo, percebe-se também, que com o uso do programa proposto a velocidade de corte manteve-se por mais tempo no valor definido.

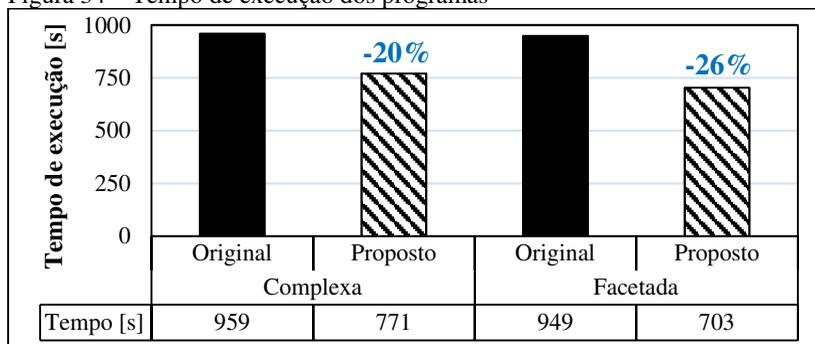
Para o programa proposto, nas regiões onde o centro está em contato com a peça a velocidade de corte varia de zero à 84 m/min, o que equivale à um aumento de 88%. Na Face 06 no programa original, a  $v_c$  varia de 25 a 68 m/min, enquanto que no programa proposto varia de 47 a 129 m/min, o que também equivale a um ganho de 88%. Este mesmo ganho foi obtido nas Faces 04, 05, 06, 12, 13, 14 e 18, que são as faces de menor diâmetro efetivo. As Faces 03, 07, 11 e 15 apresentam ganhos de 56% na velocidade de corte, mas os valores atingiram o valor definido. As Faces 02, 08, 10 e 16 apresentaram ganhos de 15%, com a velocidade de corte permanecendo no valor definido. Já as Faces 01, 09 e 17 apresentam ganhos de apenas 2%, já que seu diâmetro efetivo é muito próximo do diâmetro nominal.

Desta forma têm-se que em sete faces a velocidade de corte apresentou ganhos elevados, mesmo não alcançando o valor definido. Em quatro faces os ganhos foram altos e a velocidade de corte se manteve constante. Em oito faces os ganhos foram moderados e em três faces os ganhos foram pequenos, mas a velocidade de corte permaneceu no valor definido.

#### **4.2.2 Tempo de execução dos programas**

O tempo de execução de cada programa foi aferido na tela do comando numérico da máquina ferramenta e anotado. A Figura 34 apresenta os tempos obtidos e a diferença percentual entre o programa proposto e o original.

Figura 34 – Tempo de execução dos programas



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Os programas originais, conforme esperado, apresentaram tempos de execução superiores aos programas propostos. Na geometria complexa o programa proposto apresentou uma redução de 20% no tempo, enquanto na geometria facetada a redução foi de 26%.

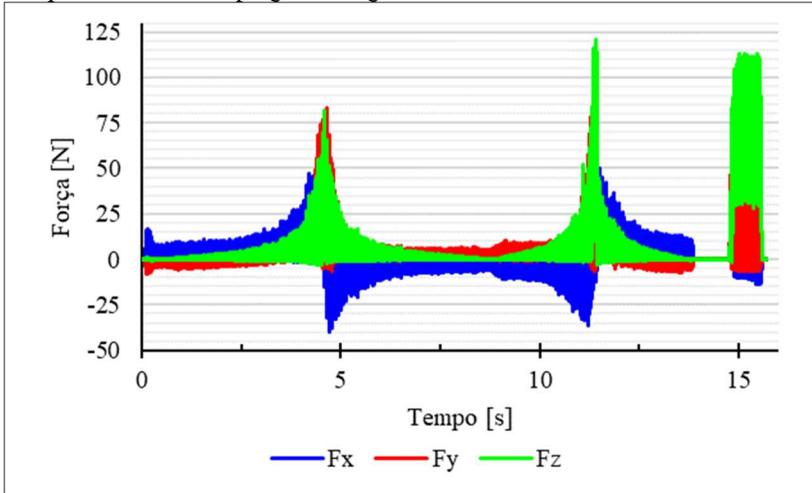
A redução do tempo é resultado do aumento da velocidade de avanço, conforme demonstrado na seção anterior. Este resultado mostra que o programa proposto, para as condições aplicadas, reduz o tempo de fabricação de forma significativa, mesmo para máquinas de rotação máxima relativamente baixa (7.500 rpm). Máquinas mais sofisticadas usualmente atingem valores superiores à 12.000 rpm, o que pode acarretar em ganhos ainda mais significativos.

### 4.2.3 Forças atuantes no processo

A rotina utilizada fornece as componentes cartesianas da força de usinagem,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  em função do tempo. Nesta análise, primeiramente é discutido o comportamento das forças de uma forma generalizada (geometria complexa), com um enfoque maior nos picos de força e inversões de sinais. Para a análise detalhada e estatística das componentes da força utilizou-se a geometria facetada, pois possibilita comparações com o diâmetro efetivo e a velocidade real de corte em cada face. No APÊNDICE B podem ser visualizados gráficos de cada uma das componentes de forma isolada para a geometria complexa.

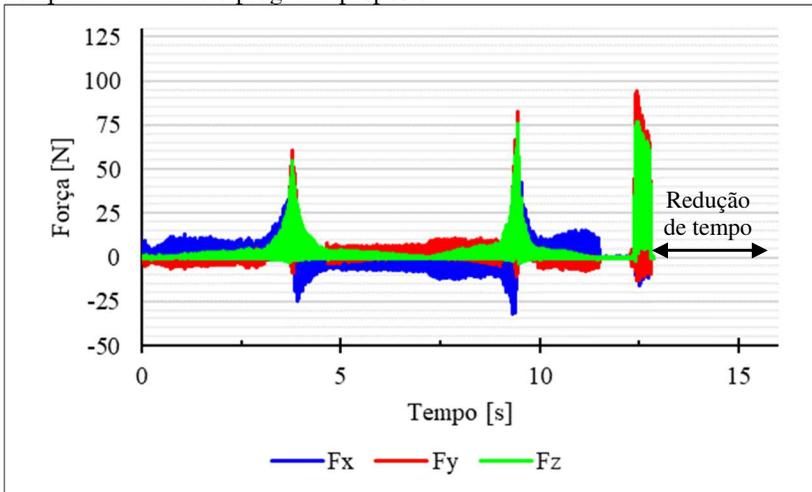
A Figura 35 e a Figura 36 apresentam as componentes da força de usinagem em função do tempo para os programas original e proposto, respectivamente, para a geometria complexa. Nestes gráficos é possível verificar a diferença na magnitude da força entre os programas avaliados.

Figura 35 – Componentes cartesianas da força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa original.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Figura 36 – Componentes cartesianas da força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Nos gráficos é possível notar que os três picos de força são referentes aos momentos em que a ferramenta está perpendicular à superfície, com o centro da ferramenta sendo o ponto CC. Estes pontos são respectivamente o ponto mais alto da região convexa, o ponto mais

baixo da região côncava e a face horizontal no final do corpo de prova. A diferença de altura entre os dois primeiros picos se dá pelo fato de que na geometria côncava (segundo pico) o sobre-metal envolve uma área maior da ferramenta, ou seja, mais material é removido neste ponto, portanto demanda uma maior força.

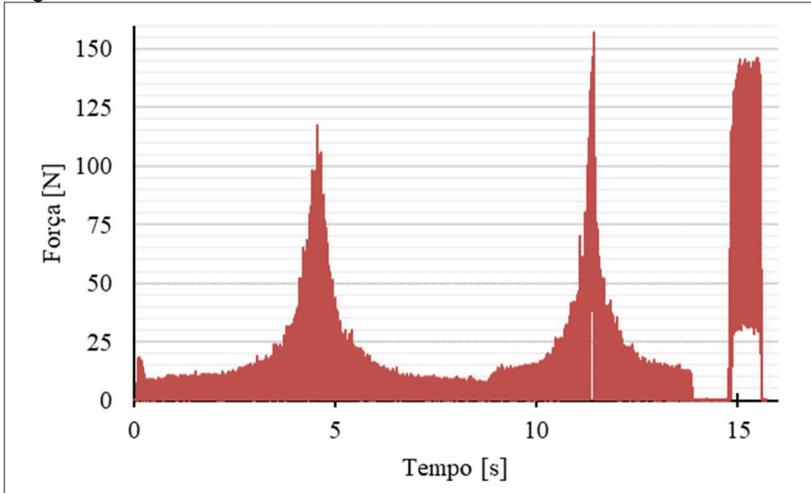
Nestes gráficos nota-se também a inversão do sentido das componentes  $F_x$  e  $F_y$  quando o corte passa de ascendente para descendente. A componente  $F_x$  é positiva durante o corte ascendente e negativa na região de corte descendente. Já a componente  $F_y$  é negativa na região de corte ascendente e positiva na região descendente. A componente  $F_z$  é sempre positiva e apresenta um aumento gradual na magnitude a medida que o ponto de contato (CC) se aproxima do centro da ferramenta.

Analisando os picos de força do programa original observa-se que os valores são de aproximadamente 80N, 120N e 110N para o primeiro, segundo e terceiro pico, respectivamente. Já para a usinagem utilizando o programa proposto os mesmos picos apresentam valores aproximados de 54N, 82N e 93N. Uma análise detalhada será realizada na geometria facetada para melhor entender este fenômeno, mas já é possível notar uma redução significativa nas forças envolvidas. A redução da magnitude das componentes está relacionada com o aumento da velocidade de corte, fenômeno também observado por Souza et al. (2015).

Observando os gráficos quanto ao comportamento descrito acima, conclui-se que o programa proposto não alterou o comportamento das componentes da força de usinagem. Contudo, ao comparar a magnitude das forças nos dois experimentos fica evidente a atenuação destas pelo programa proposto.

A Figura 37 e a Figura 38 apresentam a Força de usinagem ( $F_u$ ) para a geometria complexa usinada com os programas original e proposto, respectivamente.

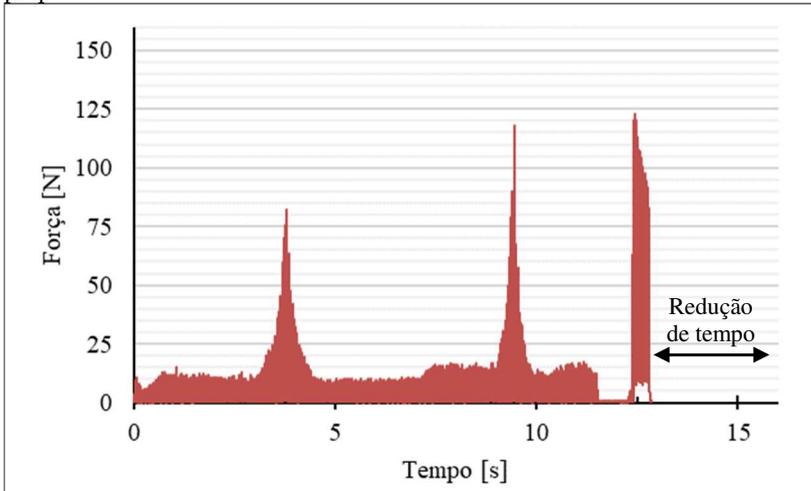
Figura 37 – Força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa original.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Neste gráfico observa-se que a força de usinagem, para o programa original, se altera constantemente durante toda a usinagem. Esta alteração da força é causada pela alteração do diâmetro efetivo, e consequentemente da velocidade de corte real.

Figura 38 – Força de usinagem na geometria complexa utilizando o programa proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

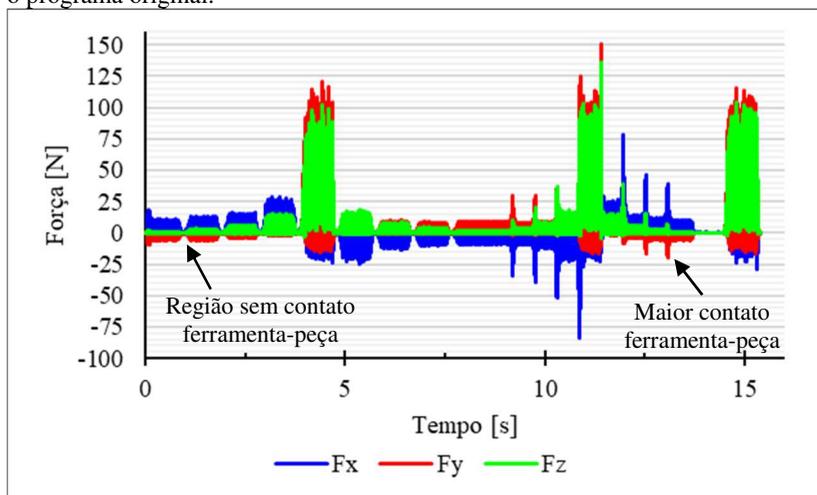
Para a usinagem com o programa proposto é possível observar o surgimento de quatro patamares de força, sendo: o primeiro referente ao corte ascendente convexo; após o primeiro pico tem-se o patamar para o corte descendente convexo; observa-se um degrau onde se inicia o corte descendente côncavo; e após o segundo pico o patamar referente ao corte ascendente côncavo.

É observado que a região de corte convexo possui basicamente o mesmo nível de força entre as condições ascendente e descendente, e o mesmo pode se afirmar sobre a região côncava. Nota-se que o patamar para os cortes côncavos é superior ao convexo. Isso se dá pelo fato de o volume de material removido na condição côncava ser maior do que na convexa.

O surgimento dos patamares ao trabalhar com a velocidade de corte constante reforça a hipótese de que a variação da força de usinagem é devida à variação da velocidade de corte. Este resultado ainda sugere que é possível manter as forças aproximadamente constantes, desde que o centro da ferramenta não entre em contato com a peça.

A Figura 39 e a Figura 40 mostram as componentes da força de usinagem para a geometria facetada usinada utilizando o programa original e o programa proposto, respectivamente.

Figura 39 – Componentes da força de usinagem na geometria facetada utilizando o programa original.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

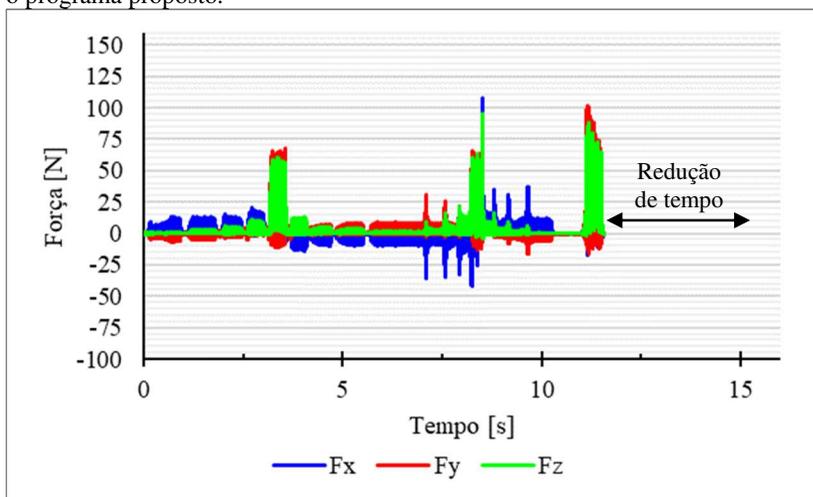
Nesta geometria é possível verificar com precisão o comportamento de cada componente da força de usinagem com a alteração do diâmetro efetivo.

Conforme observado na geometria complexa, as componentes  $F_x$  e  $F_y$  têm seu sentido invertido ao passar de corte ascendente para descendente e novamente ao passar de descendente para ascendente. Nesta geometria não há diferenciação entre côncavo e convexo, uma vez que as faces são planas. Porém, no gráfico dois fenômenos estão associados à geometria côncava e convexa.

Na primeira região (convexa) é percebido um período entre duas faces adjacentes em que a ferramenta não está em contato com a peça. Isso ocorre pois, quando é terminada a usinagem de uma face é preciso movimentar a ferramenta de modo a posicionar o ponto de contato CC com a próxima face. Nesse movimento a ferramenta não entra em contato com a peça. Fato igual, e em maior escala, ocorre entre as duas últimas faces (face 17 e 18), onde a ferramenta passa um tempo ainda maior sem contato com a peça usinada.

O outro fenômeno ocorre na segunda região, onde ao contrário da primeira, existem picos entre as faces. A presença destes picos é explicada pelo fato de que na região de transição entre as faces a ferramenta toca a superfície das duas faces simultaneamente. Desta forma se torna fácil distinguir onde inicia e termina a usinagem em cada face, sendo a primeira parte do corpo de prova marcada por ausência de sinal de força entre as faces, e a segunda parte marcada por picos de força entre as faces.

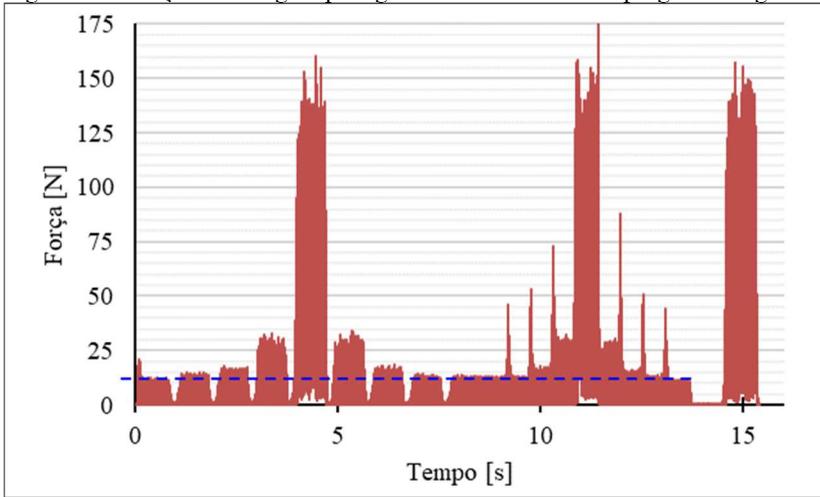
Figura 40 – Componentes da força de usinagem na geometria facetada utilizando o programa proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

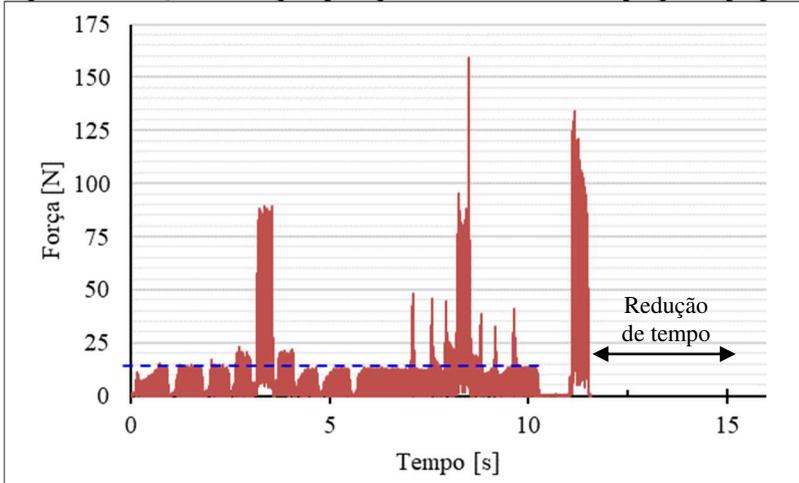
Ao analisar a Força de usinagem para a geometria facetada (Figura 41 e Figura 42) também é observado o surgimento de um patamar ao utilizar o programa proposto. Para a geometria facetada existe apenas um patamar (em aproximadamente 12N), pois nesta geometria não há distinção entre côncavo e convexo.

Figura 41 – Força de usinagem para geometria facetada com programa original.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Figura 42 – Força de usinagem para geometria facetada com programa proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Ao verificar o resultado face-a-face do programa proposto fica evidente a homogeneização da força durante todo o percurso no qual foi possível manter a velocidade de corte constante. A Figura 31 mostra que as Faces 04, 06, 12 e 14 apresentam velocidade de corte de aproximadamente 125 m/min e as Faces 05, 13 e 18 são as que o centro

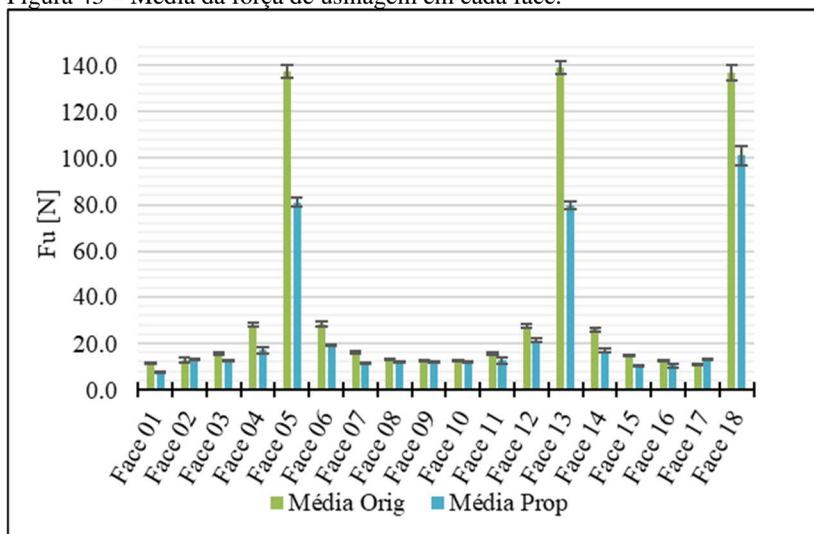
da ferramenta está em contato. Sendo que apenas estas faces estão acima do patamar. Enquanto que para o programa original a força de usinagem varia ao longo de toda a usinagem.

Os resultados em termos de força de usinagem comprovam que o programa proposto é capaz de homogeneizar a força de usinagem em patamares em função das condições de corte, desde que a máquina tenha capacidade suficiente de rotação e avanço. Com isso espera-se que máquinas modernas, de rotação e velocidade de avanço mais altos, possam executar uma usinagem mantendo a força constante por um período ainda maior.

Uma vez que as forças estão mais homogêneas ao longo da trajetória, é esperado que haja menos variação na qualidade da superfície usinada, bem como menor variação da deflexão da ferramenta ao longo da superfície. Também pelo fato de as forças terem sido reduzidas significativamente, é esperado que a amplitude da deflexão da ferramenta seja menor, resultando em um menor desvio dimensional.

Para verificar a real redução na magnitude da força de usinagem foi traçado um gráfico com a média de trinta picos de força em cada face e calculou-se o intervalo de confiança para 95%. O gráfico é apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Média da força de usinagem em cada face.

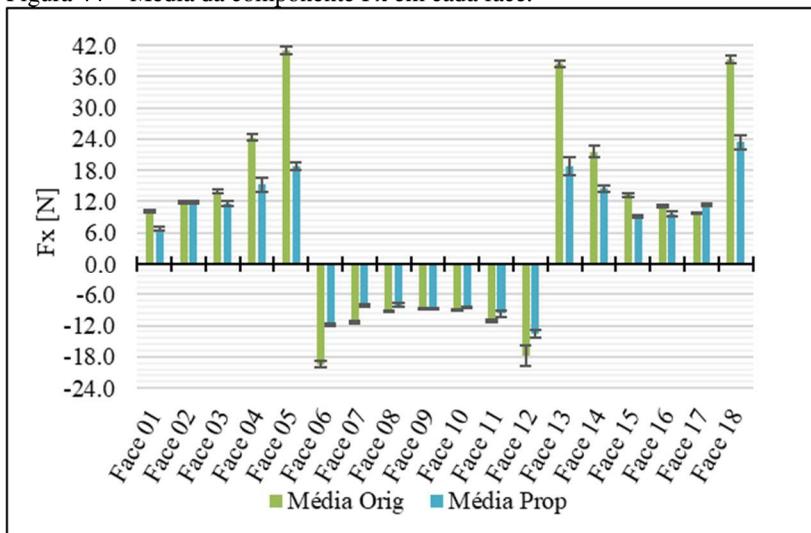


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

No gráfico anterior nota-se o patamar estabelecido pelo programa proposto em 12N, onde apenas sete faces estão acima. O programa original apresenta onze faces acima deste patamar. Nas faces onde a ferramenta está perpendicular à superfície a redução da força de usinagem foi mais significativa, sendo em média 37% (média das três faces) de redução, mas com faces apresentando redução de 43%. Nas faces anteriores e posteriores à usinagem perpendicular houve uma redução média de 32% da força. De uma forma geral, houve uma redução média de 21% na força de usinagem, considerando todas as faces do corpo de prova.

A Figura 44 apresenta o valor médio para a componente Fx da força de usinagem.

Figura 44 – Média da componente Fx em cada face.

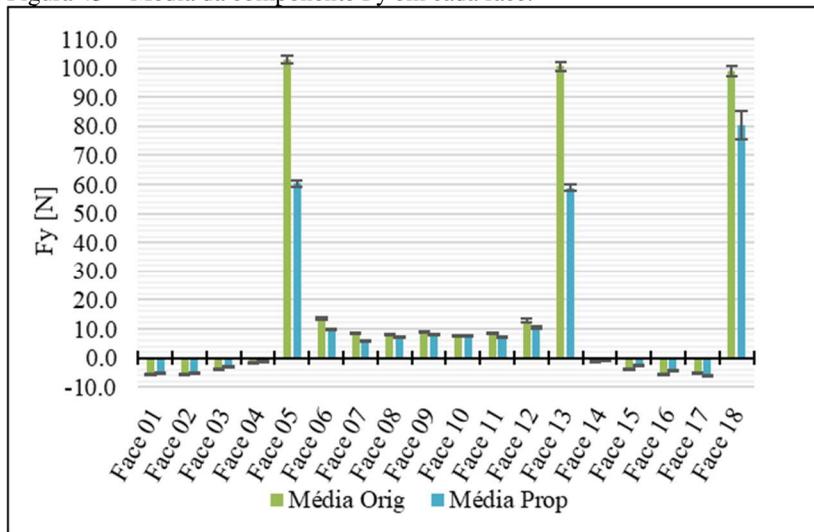


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Neste gráfico percebe-se que a redução da força foi mais significativa para as Faces 05, 13 e 18 com 54%, 51% e 40%, respectivamente. A redução média de Fx nestas três faces foi de 48,3%. Considerando a média da redução, para todas as faces, tem-se que o programa proposto apresentou forças na direção X em média 23% inferiores ao programa original.

A força média na direção Y é mostrada na Figura 45, onde as maiores diferenças são observadas nas mesmas faces que na componente Fx.

Figura 45 – Média da componente Fy em cada face.



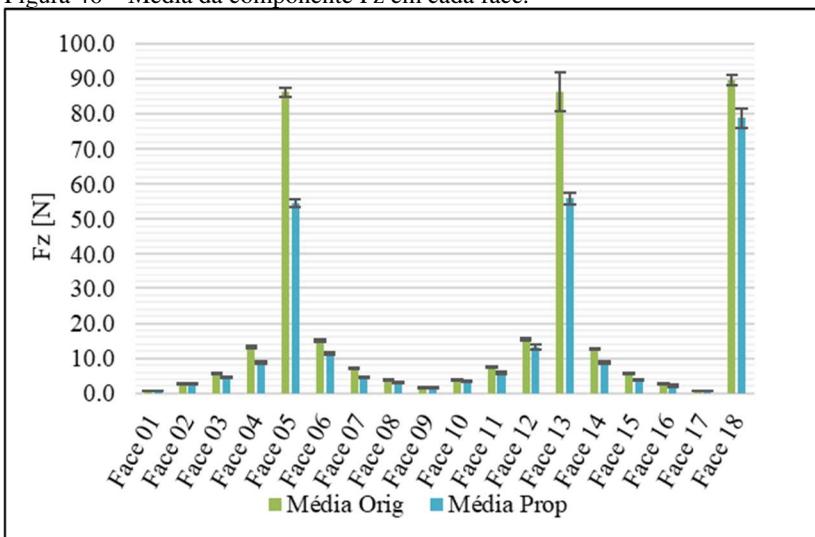
Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Para a componente Fy, o valor médio da redução da força foi de 20%. É importante notar que as componentes Fx e Fy são as responsáveis pela deflexão da ferramenta, conforme afirmado por Kim et al. (2002) e Wojciechowski, Wiackiewicz e Krolczyk (2018), entre outros. Desta forma, a redução destas componentes favorece a precisão dimensional e qualidade da superfície usinada.

A Figura 46 apresenta os valores para a componente Fz. Neste caso as faces com usinagem perpendicular não foram as que apresentaram os maiores ganhos. Os melhores resultados ficaram distribuídos entre as Faces: 04, 05, 07, 12, 13 e 14, todos entre 30 e 40% de redução. A componente Fz apresentou uma redução média de 23% na força.

O APÊNDICE C apresenta os dados utilizados para gerar os gráficos apresentados anteriormente, bem como a diferença percentual entre o programa proposto e o programa original, para cada face avaliada.

Figura 46 – Média da componente Fz em cada face.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

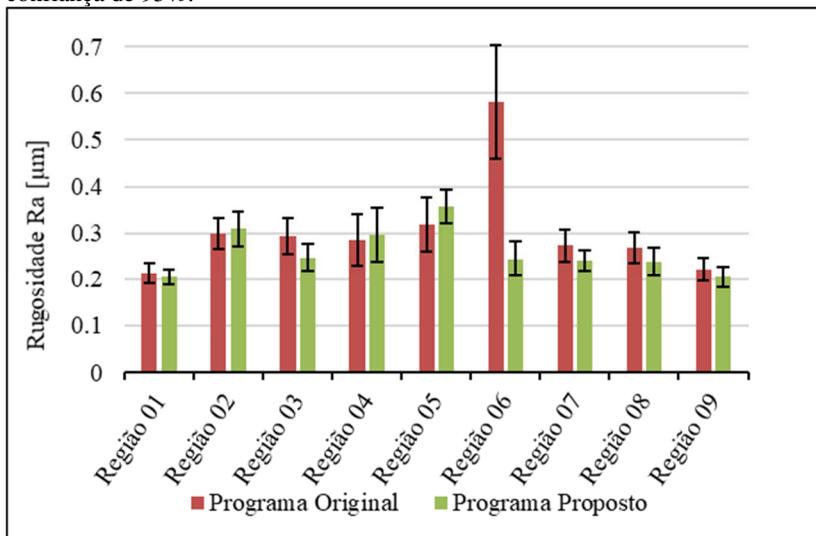
#### 4.2.4 Qualidade da superfície

Neste tópico serão discutidos os resultados de rugosidade e qualidade nas geometrias complexa e facetada.

Os resultados de rugosidade foram obtidos utilizando um microscópio confocal. Também foram realizadas medições com rugosímetro portátil digital, apenas nas faces onde não foi possível a medição com o microscópio confocal. Estas medições foram utilizadas para fins de conferência, pois as faces da região côncava possuem as mesmas condições de corte da região convexa, para a geometria facetada. Estes resultados estão disponíveis no APÊNDICE D – Medições com rugosímetro portátil digital.

A geometria complexa foi avaliada em posições equivalentes às facetadas. Na Figura 47 o perfil de rugosidade para o parâmetro  $R_a$  é apresentado para um intervalo de confiança de 95%, com base em nove medições em cada região.

Figura 47 – Rugosidade  $R_a$  na geometria complexa para um intervalo de confiança de 95%.

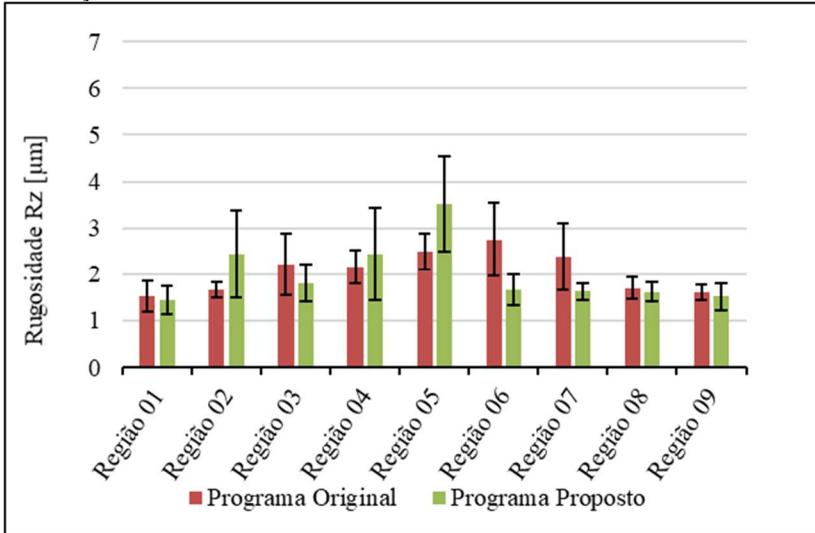


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

A partir da figura é possível perceber que houve redução significativa da rugosidade apenas na Região 06, onde se inicia o movimento descendente da ferramenta. Nas regiões de corte descendente onde o diâmetro efetivo é pequeno a remoção de material é dada por uma combinação entre corte cisalhante e deformação plástica. Analisando o parâmetro  $R_z$  para a geometria complexa no mesmo intervalo de confiança, Figura 48, observa-se, também, que apenas na Região 06 houve redução significativa.

Com o aumento da velocidade de corte não houve melhorias na rugosidade, fato também observado por Wojciechowski, Wiackiewicz e Krolczyk (2018). Souza et al. (2014a) explica que quando o centro da ferramenta não está participando do corte não há melhoria na rugosidade ao aumentar a velocidade de corte, pois o fenômeno de esmagamento já não ocorre.

Figura 48 – Rugosidade  $R_z$  na geometria complexa para um intervalo de confiança de 95%.

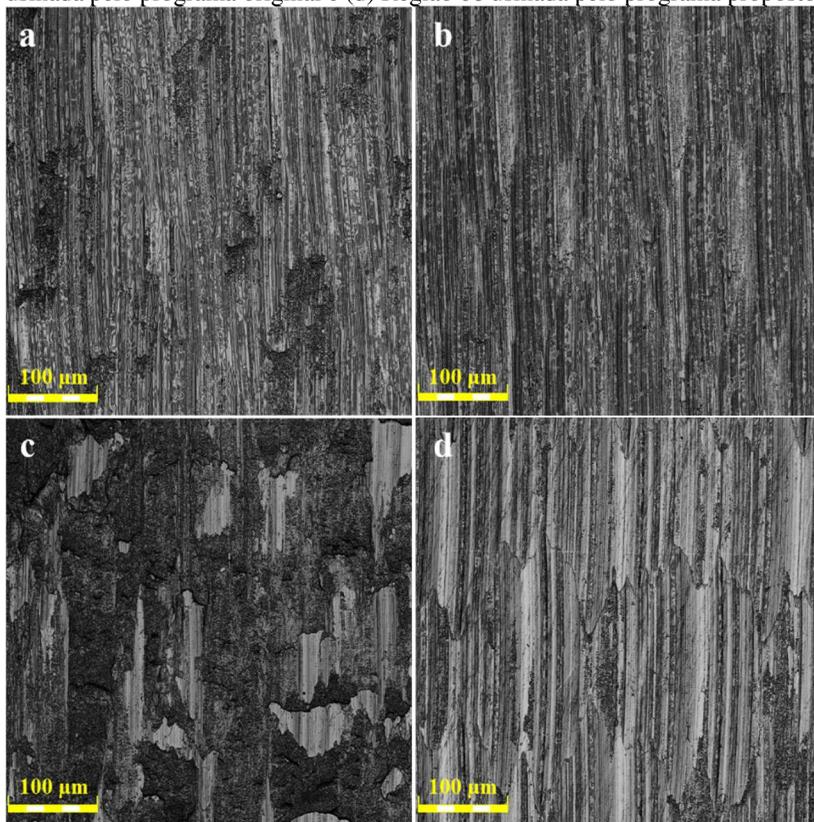


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Embora haja uma sutil tendência de redução da rugosidade com o uso do programa proposto, estatisticamente esse fato não é comprovado. Porém, cinco das nove medições apresentam valores inferiores para o desvio padrão ao utilizar o programa proposto, indicando assim uma maior estabilidade durante o processo de usinagem.

A Figura 49 mostra as regiões 04 e 06 para o programa original e proposto em uma ampliação de 430 vezes. Nesta figura é possível observar que antes do centro da ferramenta participar do corte (Região 04) as superfícies geradas pelos programas original (Figura 49a) e proposto (Figura 49b) são semelhantes. Nesta região prevalece o corte cisalhante. Entretanto, na região após o centro da ferramenta entrar em contato (Região 06) a diferença entre os programas é perceptível. A superfície originada pelo programa proposto (Figura 49d) apresenta corte predominantemente cisalhante, embora haja regiões de deformação plástica. Em contrapartida, a imagem da superfície gerada pelo programa original (Figura 49c) indica que o fenômeno de deformação plástica foi o principal mecanismo de formação da superfície.

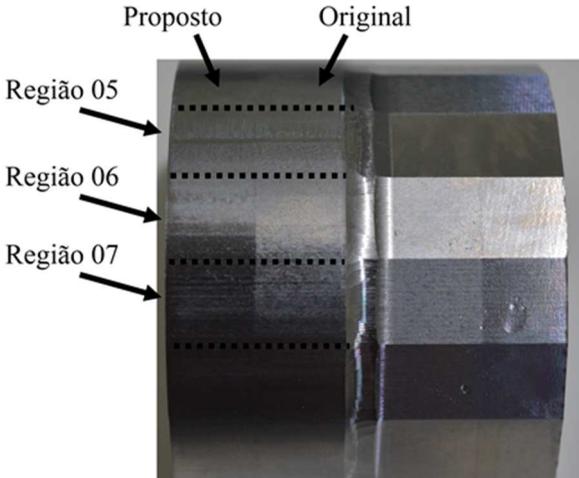
Figura 49 – Imagens com ampliação de 430x de: (a) Região 04 usinada pelo programa original, (b) Região 04 usinada pelo programa proposto, (c) Região 06 usinada pelo programa original e (d) Região 06 usinada pelo programa proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Ao fazer uma análise visual do corpo de prova, observa-se que as Regiões 05, 06 e 07 do programa original apresentam um aspecto fosco, sugerindo que tenha ocorrido maior deformação plástica. No caso da usinagem otimizada com o programa proposto esse aspecto também é observado, mas em menor escala, para as regiões 05 e 06. A Região 07 apresenta uma superfície brilhante, conforme pode ser verificado na Figura 50.

Figura 50 – Superfícies usinadas apresentam aspecto fosco.

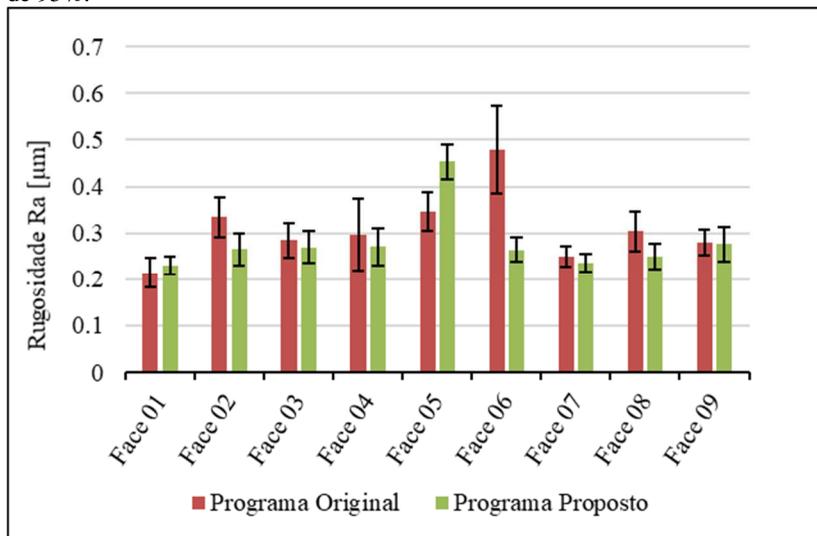


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Tendo em vista que os parâmetros geométricos de corte ( $a_e$ ,  $a_p$ , e  $f_z$ ) são os mesmos nos dois programas, fica evidente que a redução da deformação plástica está associada ao aumento da velocidade de corte. Embora a diferença em termos de  $R_a$  e  $R_z$  seja significativa apenas na Região 06, as Regiões 05 e 07 também apresentam diferenças na superfície que podem ser verificadas no APÊNDICE E – Comparativo entre as faces dos programas original e proposto para geometria complexa.

O perfil da rugosidade  $R_a$  para a geometria facetada em um intervalo de confiança de 95% pode ser visualizado na Figura 51. Nesta geometria é possível perceber que para ambos os programas a dispersão da rugosidade foi menor (menor desvio padrão) se comparada à geometria complexa. Este fato é consequência de não haver alteração da rotação nem do diâmetro efetivo ao longo de cada face, permanecendo exatamente as mesmas condições do início ao final da usinagem de cada face.

Figura 51 – Rugosidade  $R_a$  na geometria facetada para um intervalo de confiança de 95%.



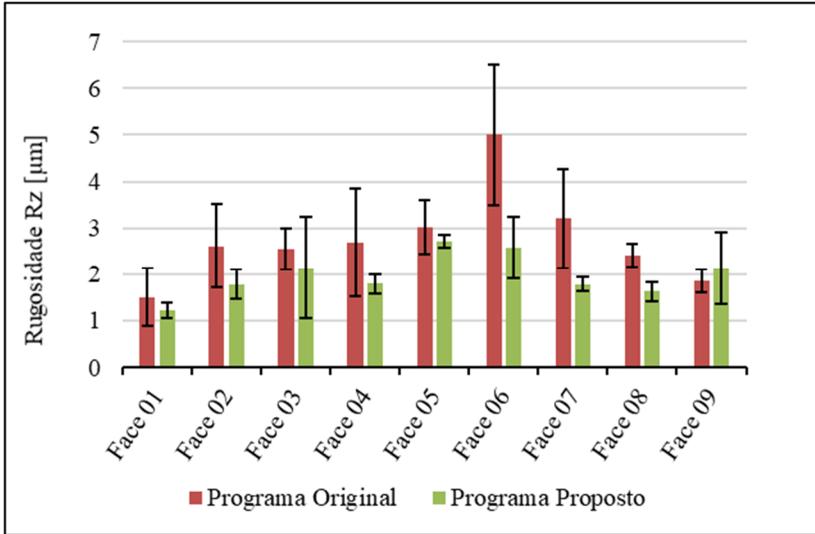
Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Nesta geometria a Face 05 do programa proposto apresentou valores de rugosidade 31% superiores ao programa original. Sabe-se que com o aumento da velocidade de corte é esperada uma melhor rugosidade, mas também é sabido que, em algumas situações, a deformação plástica pode resultar em um “alisamento” da superfície, conforme observado por Aspinwall et al. (2007). Entretanto, essa deformação resulta em maiores tensões residuais na peça fabricada.

Por outro lado, a Face 06 usinada com o uso do programa proposto apresentou uma redução do valor médio de 45% em relação ao programa original, e uma redução de 72% no desvio padrão. A redução no valor médio está associada ao aumento da velocidade de corte e consequente aumento da parcela de corte cisalhante, conforme afirmado por Souza et al. (2014a). A redução do desvio padrão mostra que com o uso do programa proposto o processo apresentou-se mais estável.

A Figura 52 apresenta o perfil de rugosidade  $R_z$  para a geometria facetada, com intervalo de confiança de 95%.

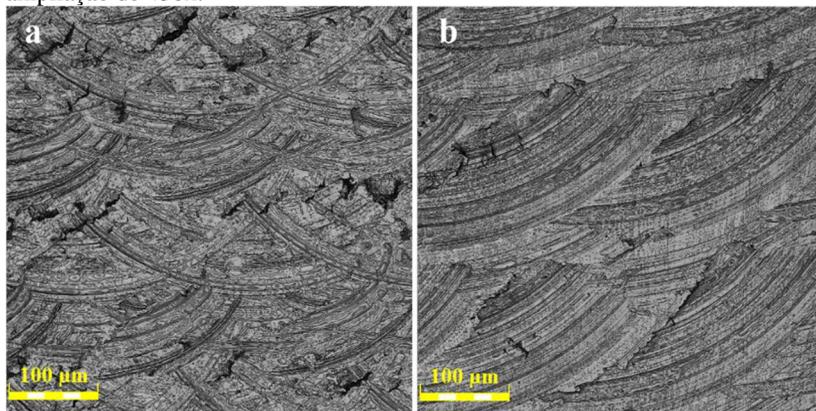
Figura 52 – Rugosidade  $R_z$  na geometria facetada para um intervalo de confiança de 95%.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Ao analisar os resultados para o parâmetro  $R_z$  na Face 05 observa-se, no entanto, que o programa original apresenta maior dispersão que o programa proposto. Isso indica um processo mais instável, embora não haja diferença na média. A instabilidade do processo se dá devido às elevadas forças atuantes, decorrentes do processo de deformação plástica. Com isso, embora a superfície apresente um menor  $R_a$ , existem marcas não-uniformes. Por outro lado, a superfície fabricada com o programa proposto apresenta marcas regularmente espaçadas, o que indica um processo estável de usinagem. A Figura 53 apresenta a superfície da Face 05 do programa original (a) e do programa proposto (b) com ampliação de 430 vezes.

Figura 53 – Face 05 (a) Programa original e (b) Programa proposto. Imagens com ampliação de 430x.

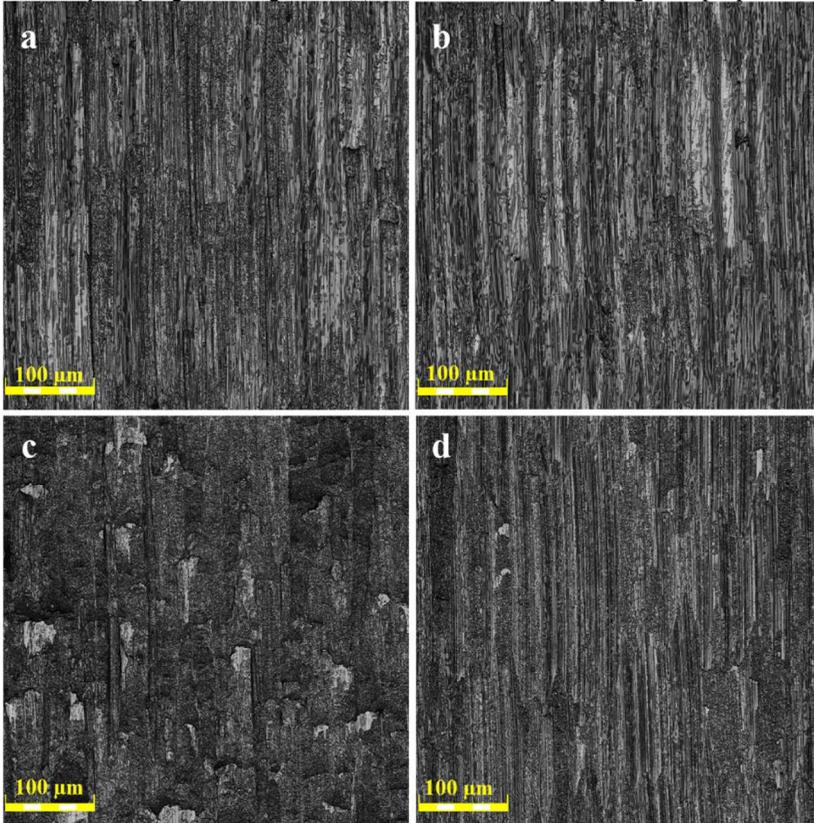


Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

As Faces 06, 07 e 08 apresentam menores valores de  $R_z$  com reduções de 49%, 44% e 33%, respectivamente. A dispersão dos resultados também foi menor, com ganhos de 57%, 86% e 18%, para as Faces 06, 07 e 08 respectivamente. Estes resultados também são um indicativo de um processo mais estável quando utilizado o programa proposto.

A Figura 54 apresenta as Faces 04 e 06 sob uma ampliação de 430 vezes, para o programa original e proposto. Nesta figura é possível observar que, na Face 04, (face anterior ao centro da ferramenta participar do corte) as superfícies são bastantes semelhantes. Isso ocorre pois nesta região prevalece o corte cisalhante, devido a maior velocidade de corte. Na Face 06 (face após o centro da ferramenta entrar em contato) é notória a diferença entre o mecanismo de formação da superfície. Na face usinada utilizando o programa original (Figura 54c) o fenômeno predominante é a deformação plástica, onde o material é extrusado devido às baixas velocidades de corte. Na Face 06 usinada com o uso do programa proposto (Figura 54d), nota-se que existe uma parcela de deformação plástica, mas o principal mecanismo de formação da superfície é o corte cisalhante.

Figura 54 – Imagens com ampliação de 430x de: (a) Face 04 usinada pelo programa original, (b) Face 04 usinada pelo programa proposto, (c) Face 06 usinada pelo programa original e (d) Face 06 usinada pelo programa proposto.



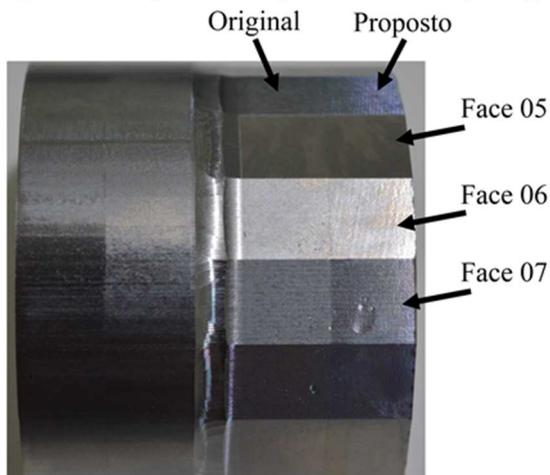
Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

O APÊNDICE F – Comparativo entre as faces dos programas original e proposto para geometria facetada – apresenta um comparativo face-a-face entre o programa original e proposto. Ao comparar todas as faces do corpo de prova é observado que a partir da Face 03 até a Face 08 existem marcas de deformação plástica para o programa original. Todavia, para o programa proposto são observadas marcas de deformação plástica nas Faces 05 e 06, porém em menor escala. As Faces 03, 04, 07 e 08 do programa proposto não apresentam marcas visíveis de deformação plástica, mas uma análise de tensões residuais seria

necessária para quantificar essa afirmativa. As Faces 01, 02 e 09 de ambos os programas não apresentam marcas de deformação plástica.

Para a geometria facetada também foi observado o aspecto fosco nas Faces 05, 06 e 07 do programa original. No programa proposto este efeito foi verificado em menor escala nas Faces 05 e 06. A Face 07 não apresentou tal aspecto, Figura 55.

Figura 55 – Regiões com aspecto fosco no corpo de prova.



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Supõe-se que essa característica esteja relacionada a deformação plástica ocorrida nestas faces. Observando as imagens no APÊNDICE F verifica-se que nas faces citadas para o programa original o corte cisalhante é menos presente. Já ao utilizar o programa proposto, as marcas de deformação plástica são menos visíveis e a superfície possui maior homogeneidade, o que sugere um processo mais estável.



## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema computacional capaz de identificar o diâmetro efetivo no ponto de contato (CC) de uma fresa de ponta esférica ao longo de uma trajetória qualquer. O sistema proposto calcula a rotação da ferramenta e a velocidade de forma a manter a velocidade de corte e avanço por aresta o mais constante possível. O sistema foi validado com sucesso e as principais conclusões são:

- O programa proposto é capaz de identificar e corrigir a rotação e velocidade de avanço, mantendo assim a velocidade de corte e o avanço por aresta o mais constante possível, para qualquer tipo de superfície a ser usinada (complexa ou não).
- No programa proposto a faixa de velocidade de corte em cada ponto se manteve superior ao programa original, porém em regiões de movimento ascendente a velocidade de corte supera os valores programados, o que pode vir a ser um problema para a vida da ferramenta.
- Com a otimização da velocidade de corte, o avanço também foi otimizado resultando em ganhos de 20% no tempo de fabricação da geometria complexa e 26% no tempo de fabricação da geometria facetada;
- O uso do programa proposto reduziu todas as componentes da força de usinagem, sendo em média  $F_x$  reduzida em 23%,  $F_y$  em 20% e  $F_z$  em 23%, para a geometria facetada. A força de usinagem também foi reduzida em média 21%. A redução de  $F_x$  e  $F_y$  induz à redução da deflexão da ferramenta, e assim do erro de forma.
- As imagens da superfície usinada comprovam a redução da deformação plástica durante o corte, principalmente nas regiões de corte descendente.
- Embora a rugosidade não apresente ganhos significativos, é observada uma maior estabilidade do processo de usinagem ao utilizar o programa proposto.

Com base nas experiências e resultados obtidos com neste trabalho de pesquisa, são sugestões para trabalhos e estudos futuros os seguintes itens:

- Investigar a aplicação do programa proposto para estratégias de ferramenta mais complexas, como offset 3D e espiral;
- Investigar o impacto do programa proposto na vida da ferramenta;
- Investigar o impacto do programa proposto na vida da máquina ferramenta;
- Desenvolver e incluir no programa o cálculo para o diâmetro efetivo máximo e mínimo, para calcular a velocidade de corte com base na média entre os dois valores.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIAS, M. L. **Análise do comportamento de diferentes sistemas CAM na usinagem de superfícies complexas utilizando altas velocidades.** 2009. Dissertação(Mestrado) - Instituto Superior Tupy, Joinville, 2009.

ASPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; NG, E. G.; SAGE, C.; SOO, S. L. The influence of cutter orientation and workpiece angle on machinability when high-speed milling Inconel 718 under finishing conditions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 12–13, p. 1839–1846, 2007.

AXINTE, D. A.; DEWES, R. C. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling: experimental data and empirical models. **Journal of Material Processing Technology** **127**, v. 127, p. 325–335, 2002.

BATISTA, M. F. **Estudo da rugosidade de superfícies planas usinadas por fresas de topo esférico.** 2006. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BONETTI, I.; BODZIAK, S.; SOUZA, A. F. de. Contribuições para desenvolver o conhecimento das operações de desbaste de moldes e matrizes. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: ABCM, 2010.

BOUJELBENE, M.; MOISAN, A.; TOUNSI, N.; BRENIER, B. Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 1, p. 101–107, 2004.

CAMPATELLI, G.; LORENZINI, L.; SCIPPA, A. Optimization of process parameters using a Response Surface Method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 309–316, 2014.

CARUSO, S.; OUTEIRO, J. C.; UMBRELLO, D.; M'SAOUBI, R. Modeling and Experimental Validation of the Surface Residual Stresses Induced By Hard Machining of Aisi H13 Tool Steel. **The International Journal on the Biology of Stress**, v. 3, p. 3–6, 2010.

CHEN, T.; SHI, Z. A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 208, p. 259–263, 2008.

CHIOU, C.-J.; LEE, Y.-S. A machining potencial field approach to tool path generation for multi-axis sculptured surface machining. **CAD Computer Aided Design**, v. 34, p. 357–371, 2002.

CHOI, B. K.; JERARD, R. B. **Sculptured surface machining: theory and applications.** First ed. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 8ª ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2013.

ERKORKMAZ, K.; LAYEGH, S. E.; LAZOGLU, I.; ERDIM, H. Feedrate optimization for freeform milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1, p. 395–398, 2013.

FAN, J. Cutting speed modelling in ball nose milling applications. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 1–4, p. 161–171, 2014.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1970.

FONTAINE, M.; MOUFKI, A.; DEVILLEZ, A.; DUDZINSKI, D. Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination. Part I: Predictive force model and experimental validation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 189, n. 1–3, p. 73–84, 2007.

GAMA, C. A. de S. **Contribuições ao processo orçamentário de moldes: Estudo de caso em uma ferramentaria com a implantação de uma ferramenta computacional**. 2009. Dissertação(Mestrado) - Instituto Superior Tupy, Joinville, 2009.

GONÇALVES, J. R. Os fabricantes de moldes e matrizes para a indústria do plástico. **Revista Plástico Industrial**, n. 221, p. 10, 2017.

JIANG, Z.; ZHOU, F.; ZHANG, H.; WANG, Y.; SUTHERLAND, J. W. Optimization of machining parameters considering minimum cutting fluid consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 183–191, 2015.

KAYAL, P. Inverse offset method for adaptive cutter path generation from point-based surface. **International Journal of CAD/CAM**, v. 7, n. 1, 2007.

KAYMAKCI, M.; LAZOGLU, I. Tool path selection strategies for complex sculptured surface machining. **Machining Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 119–132, 2008.

KIM, K. K.; KANG, M. C.; KIM, J. S.; JUNG, Y. H.; KIM, N. K. A study on the precision machinability of ball end milling by cutting speed optimization. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 130–131, p. 357–362, 2002.

KISTLER. **3-Component Dynamometer with integrated electronics** | **Kistler**. Disponível em: <<https://www.kistler.com/en/product/type-9257ba/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

KRAJNIK, P.; KOPAČ, J. Modern machining of die and mold tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 157–158, n. SPEC. ISS., p. 543–552, 2004.

LASEMI, A.; XUE, D.; GU, P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. **CAD Computer Aided Design**, v. 42, n. 7, p. 641–654, 2010.

LO, C. CNC machine tool surface interpolator for ball-end milling of free-form surfaces. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v. 40, p. 307–326, 2000.

MA, J. W.; SONG, D. N.; JIA, Z. Y.; HU, G. Q.; SU, W. W.; SI, L. K. Tool-path planning with constraint of cutting force fluctuation for curved surface machining. **Precision Engineering**, v. 51, n. November 2017, p. 614–624, 2018.

MIKÓ, B.; BEŇO, J. Effect of the Working Diameter to the Surface Quality in Free-Form Surface Milling. **Key Engineering Materials**, v. 581, p. 372–377, 2013.

MISRA, D.; SUNDARARAJAN, V.; WRIGHT, P. K. Zig-Zag Tool Path Generation for Sculptured Surface. **Geometric and Algorithmic Aspects of Computer-aided Design and Manufacturing**, n. Cl, p. 265, 2005.

MLADENOVIC, G. M.; TANOVIC, L. M.; EHMANN, K. F. Tool path generation for milling of free form surfaces with feed rate scheduling. **FME Transactions**, v. 43, n. 1, p. 9–15, 2015.

MONREAL, M.; RODRIGUEZ, C. A. Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. **CAD Computer Aided Design**, v. 35, n. 4, p. 395–401, 2003.

MOREIRA, F. C. **Influência do ângulo entre trajetórias lineares no tempo de execução de blocos em usinagem CNC de superfícies**. 2010. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

NETO, J. C. da S. **Metrologia e controle dimensional: Conceitos, Normas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Elsevier Ltd, 2012.

OLIVEIRA, C. J. de. **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens**. 2004. Dissertação (mestrado), Pontifícia universidade católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PARK, H. S.; QI, B.; DANG, D. V.; PARK, D. Y. Development of smart machining system for optimizing feedrates to minimize machining time. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 5, n. 3, p. 299–304, 2018.

PESSOLES, X.; LANDON, Y.; RUBIO, W. Kinematic modelling of a 3-axis NC machine tool in linear and circular interpolation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 5–8, p. 639–655, 2010.

RIBEIRO, J. E.; CÉSAR, M. B.; LOPES, H. Optimization of machining parameters to improve the surface quality. **Procedia Structural Integrity**, v. 5, p. 355–362, 2017.

SACHELLI, C. M.; CARELI, M. N. **Da prancheta às redes: as ferramentarias em Joinville**. Joinville: Editora Univille, 2014.

SALAMI, R.; SADEGHI, M. H.; MOTAKEF, B. Feed rate optimization for 3-axis ball-end milling of sculptured surfaces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 760–767, 2007.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2007.

SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A. E.; SOUZA, A. F. de. Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 82, n. 9–12, p. 2075–2086, 2016.

SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A. E.; SOUZA, A. F. de. The influence of tool-surface contact on tool life and surface roughness when milling free-form geometries in hardened steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 1–4, p. 615–626, 2017.

SEGUY, S.; INSPERGER, T.; ARNAUD, L.; DESSEIN, G.; PEIGNÉ, G. On the stability of high-speed milling with spindle speed variation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 48, n. 9–12, p. 883–895, 2010.

SEKERES, T. de S. **Inter-relação entre parâmetros de rugosidade 2D/3D e a estampabilidade de chapas de aço de baixo carbono laminadas a frio para a indústria automotiva**. 2015. Dissertação (mestrado), Escola de Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SILLER, H.; RODRIGUEZ, C. A.; AHUETT, H. Cycle time prediction in high-speed milling operations for sculptured surface finishing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 174, n. 1–3, p. 355–362, 2006.

SOUZA, A. F. de; BERKENBROCK, E.; DINIZ, A. E.; RODRIGUES, A. R. Influences of the tool path strategy on the machining force when milling free form geometries with a ball-end cutting tool. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 2, p. 675–687, 2015.

SOUZA, A. F. de; COELHO, R. T. Experimental investigation of feed rate limitations on high speed milling aimed at industrial applications. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 32, n. 11–12, p. 1104–1114, 2007.

SOUZA, A. F. de; DINIZ, A. E.; RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T. Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 71, n. 9–12, p. 1565–1577, 2014a.

SOUZA, A. F. de; MACHADO, A.; BECKERT, S. F.; DINIZ, A. E. Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 188–193, 2014b.

SOUZA, A. F. de; NETO, H. K.; DINIZ, A. E. Estudo das componentes radial e tangencial da força de usinagem no fresamento de formas complexas, empregando fresas de ponta esférica. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, Itatiaia - RJ. **Anais...** Itatiaia - RJ: ABCM, 2013.

SOUZA, A. F. de; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: Princípios e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2013.

SUN, S.; YU, D.; WANG, C.; XIE, C. A smooth tool path generation and real-time interpolation algorithm based on B-spline curves. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2018.

TAJIMA, S.; SENCER, B. Global tool-path smoothing for CNC machine tools with uninterrupted acceleration. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 121, n. March, p. 81–95, 2017.

TUYSUZ, O.; ALTINTAS, Y.; FENG, H. Y. Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 66, p. 66–81, 2013.

WOJCIECHOWSKI, S.; MARUDA, R. W.; BARRANS, S.; NIESLONY, P.; KROLCZYK, G. M. Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 111, p. 18–28, 2017.

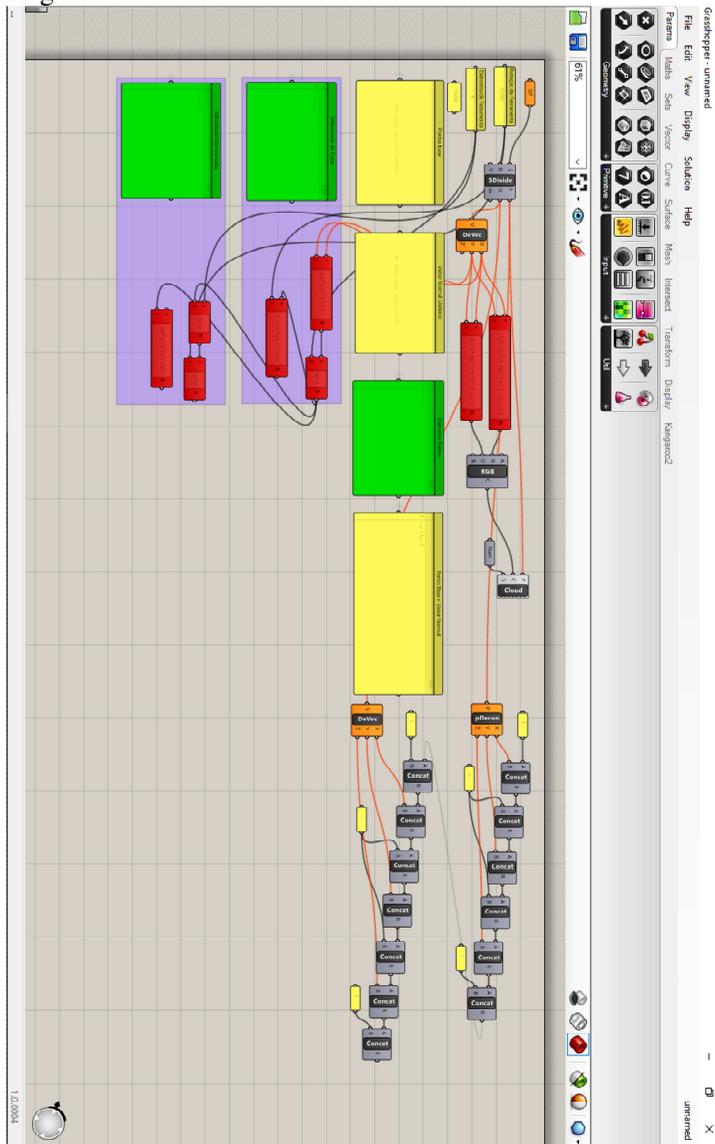
WOJCIECHOWSKI, S.; WIACKIEWICZ, M.; KROLCZYK, G. M. Study on metrological relations between instant tool displacements and surface roughness during precise ball end milling. **Measurement**, v. 129, p. 686–694, 2018.

ZHAI, Z.; LIN, Z.; FU, J. HSM toolpath generation with capsule-based region subdivision. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 1–4, p. 1407–1419, 2018.



## APÊNDICE A – Rotina Grasshopper

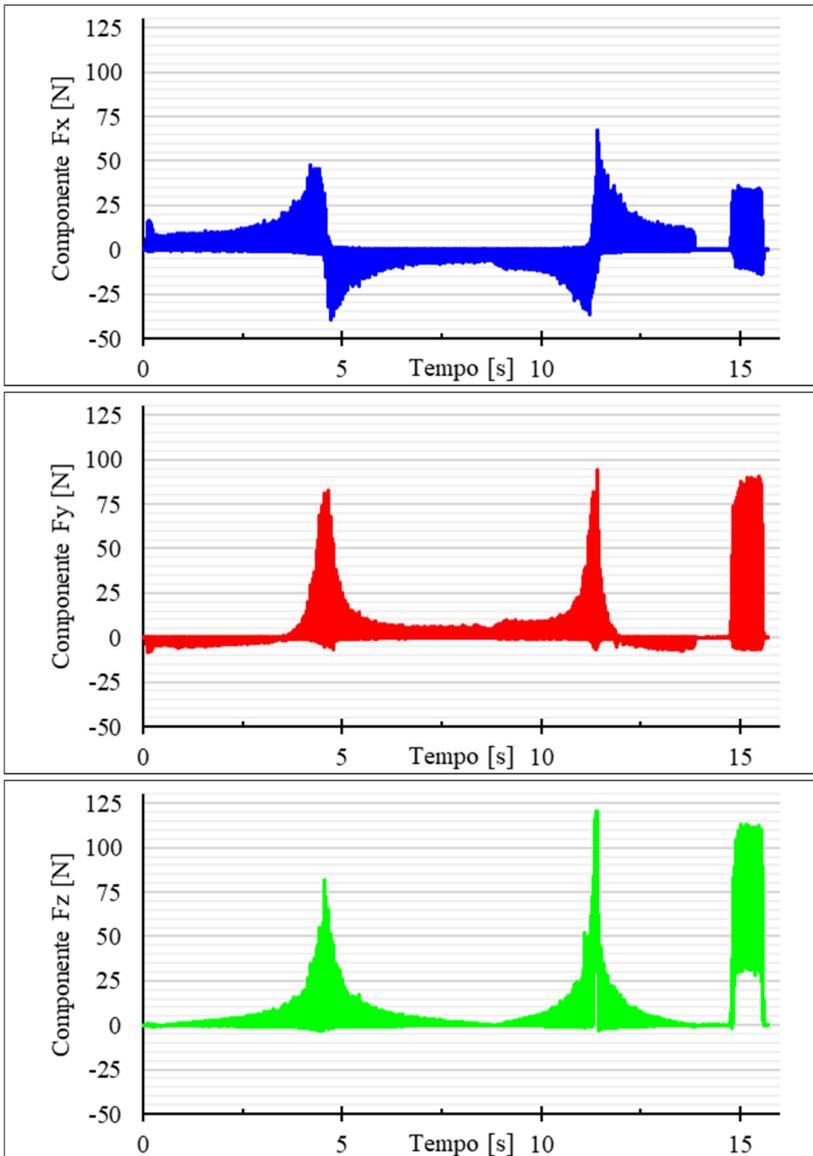
Rotina para obtenção dos vetores normais à superfície e aplicação do gradiente de cor.



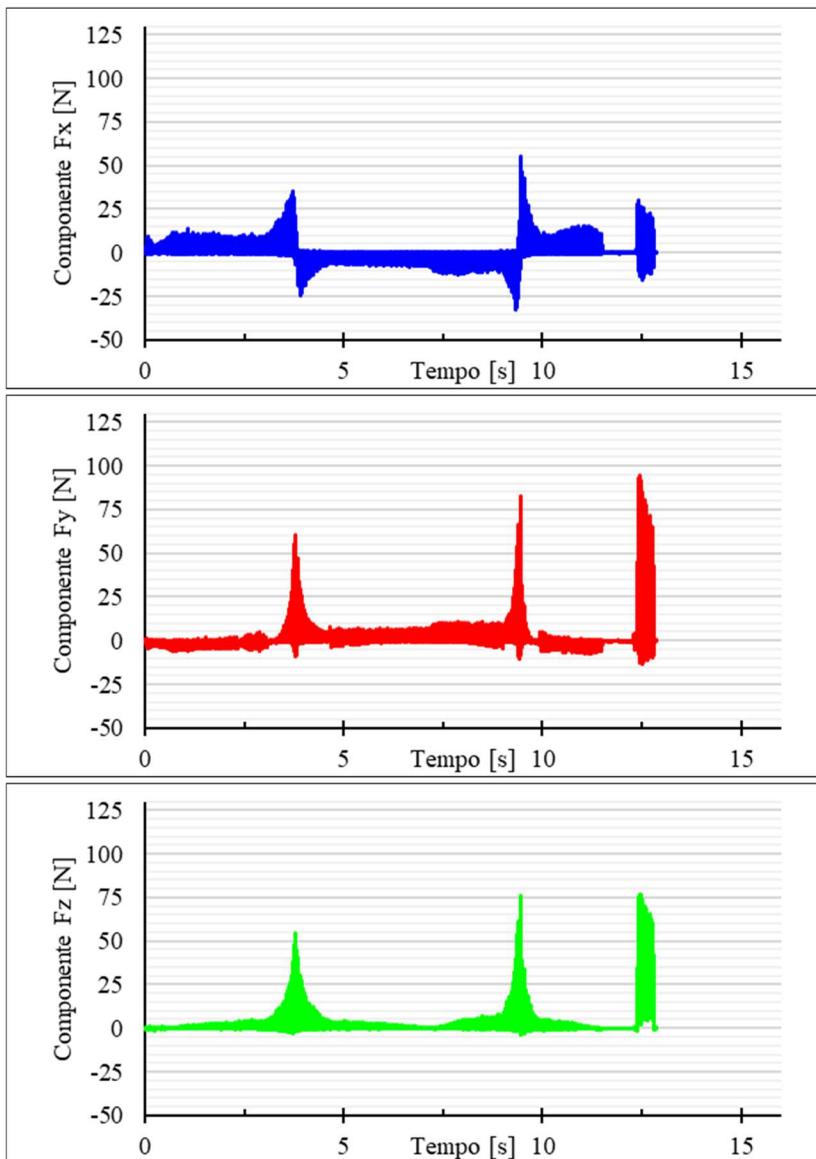
## APÊNDICE B – Componentes da força de usinagem

Componentes cartesianas da  $F_u$  na geometria complexa:

Programa Original:



Programa Proposto:



### APÊNDICE C – Dados de força média por face

Os valores foram obtidos a partir da média de 30 picos, ou o máximo possível, de atuação da aresta em cada face.

Valores para a componente Fx:

	Programa Proposto	Programa Original	Diferença
Face 01	6.8	10.1	-33%
Face 02	12.0	11.8	2%
Face 03	11.6	13.9	-17%
Face 04	15.2	24.3	-37%
Face 05	18.8	40.9	-54%
Face 06	-11.9	-19.4	-39%
Face 07	-8.2	-11.3	-27%
Face 08	-8.1	-9.3	-13%
Face 09	-8.8	-8.7	1%
Face 10	-8.6	-9.1	-5%
Face 11	-9.7	-11.1	-13%
Face 12	-13.6	-17.7	-23%
Face 13	18.7	38.4	-51%
Face 14	14.6	21.6	-33%
Face 15	9.2	13.3	-31%
Face 16	9.7	11.0	-12%
Face 17	11.4	9.7	18%
Face 18	23.4	39.3	-40%

Valores para a componente Fy:

	Programa Proposto	Programa Original	Diferença
Face 01	-5.3	-5.7	-7%
Face 02	-5.0	-5.5	-9%
Face 03	-2.8	-3.7	-22%
Face 04	-1.2	-1.8	-34%
Face 05	60.3	102.9	-41%
Face 06	10.0	13.5	-26%
Face 07	5.9	8.5	-30%
Face 08	7.0	8.0	-12%
Face 09	8.1	8.9	-9%
Face 10	7.7	7.8	-2%
Face 11	7.2	8.3	-14%
Face 12	10.5	12.7	-17%
Face 13	58.9	100.5	-41%
Face 14	-0.6	-1.3	-53%
Face 15	-2.7	-3.8	-30%
Face 16	-4.6	-5.5	-17%
Face 17	-6.2	-5.4	15%
Face 18	80.4	99.1	-19%

Valores para a componente Fz:

	Programa Proposto	Programa Original	Diferença
Face 01	0.6	0.7	-16%
Face 02	2.8	3.0	-7%
Face 03	4.6	5.7	-20%
Face 04	8.7	13.2	-34%
Face 05	54.5	86.1	-37%
Face 06	11.4	15.0	-24%
Face 07	4.4	7.3	-40%
Face 08	3.2	4.0	-19%
Face 09	1.6	1.9	-15%
Face 10	3.6	4.0	-11%
Face 11	6.0	7.5	-20%
Face 12	13.2	15.4	-15%
Face 13	55.9	86.3	-35%
Face 14	8.8	12.7	-30%
Face 15	3.7	5.7	-35%
Face 16	2.2	2.9	-25%
Face 17	0.5	0.6	-24%
Face 18	78.8	89.5	-12%

Valores para a Força de usinagem ( $F_u$ ):

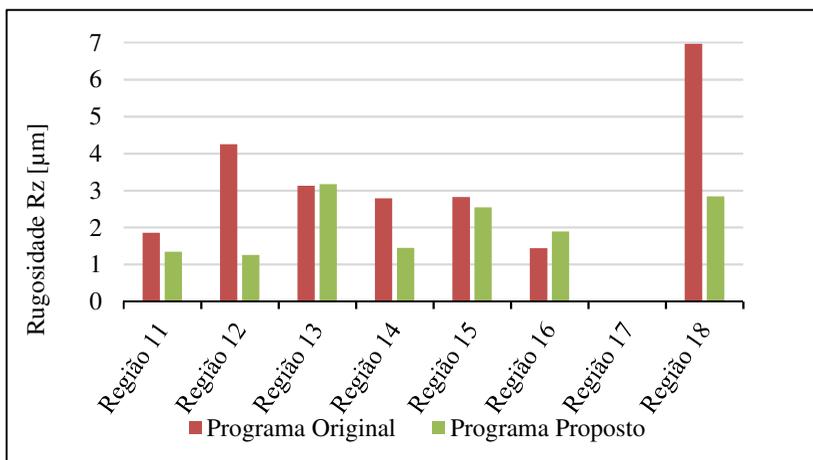
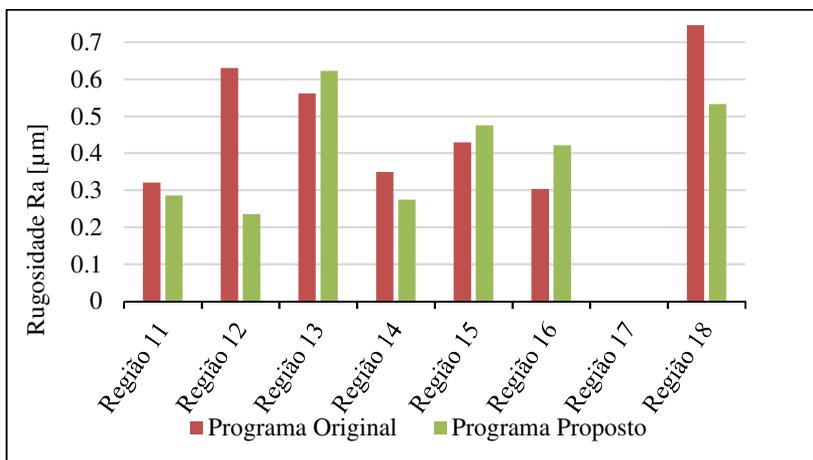
	Programa Proposto	Programa Original	Diferença
Face 01	7.5	11.6	-35%
Face 02	13.1	12.8	3%
Face 03	12.6	15.4	-18%
Face 04	17.0	27.9	-39%
Face 05	81.1	137.2	-41%
Face 06	19.3	28.3	-32%
Face 07	11.3	16.0	-30%
Face 08	11.9	12.9	-8%
Face 09	12.1	12.6	-4%
Face 10	12.0	12.5	-4%
Face 11	12.6	15.7	-20%
Face 12	21.3	27.4	-23%
Face 13	79.8	138.9	-43%
Face 14	16.9	25.8	-35%
Face 15	10.3	14.8	-31%
Face 16	10.6	12.6	-16%
Face 17	13.0	11.2	16%
Face 18	101.2	137.0	-26%

## APÊNDICE D – Medições com rugosímetro portátil digital

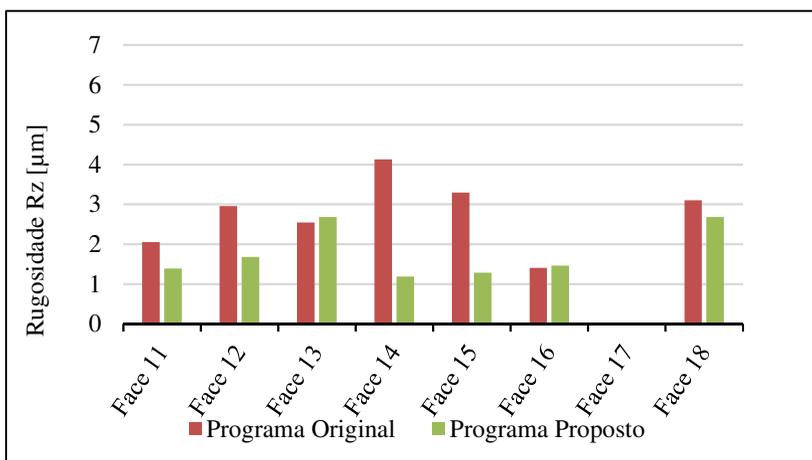
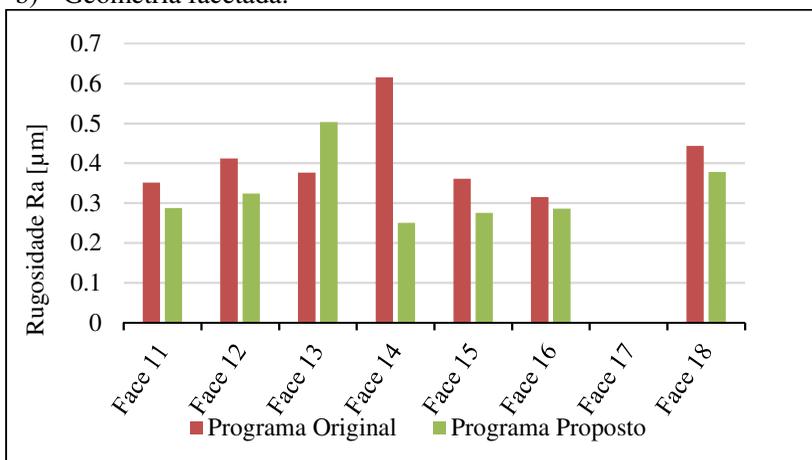
Para verificar a coerência dos valores obtidos pelo microscópio confocal, foram realizadas medições com um rugosímetro portátil digital. Optou-se pelo uso deste equipamento pois seu funcionamento é mais simples e conhecido pelos pesquisadores.

A Face 17 e a Região 17 não foram medidas pois o dispositivo para inclinação do corpo de prova não comporta tal inclinação. Foi realizada apenas uma medição, seguindo a norma NBR 4288:2008, onde o valor apresentado é a média de cinco medições.

a) Geometria complexa:

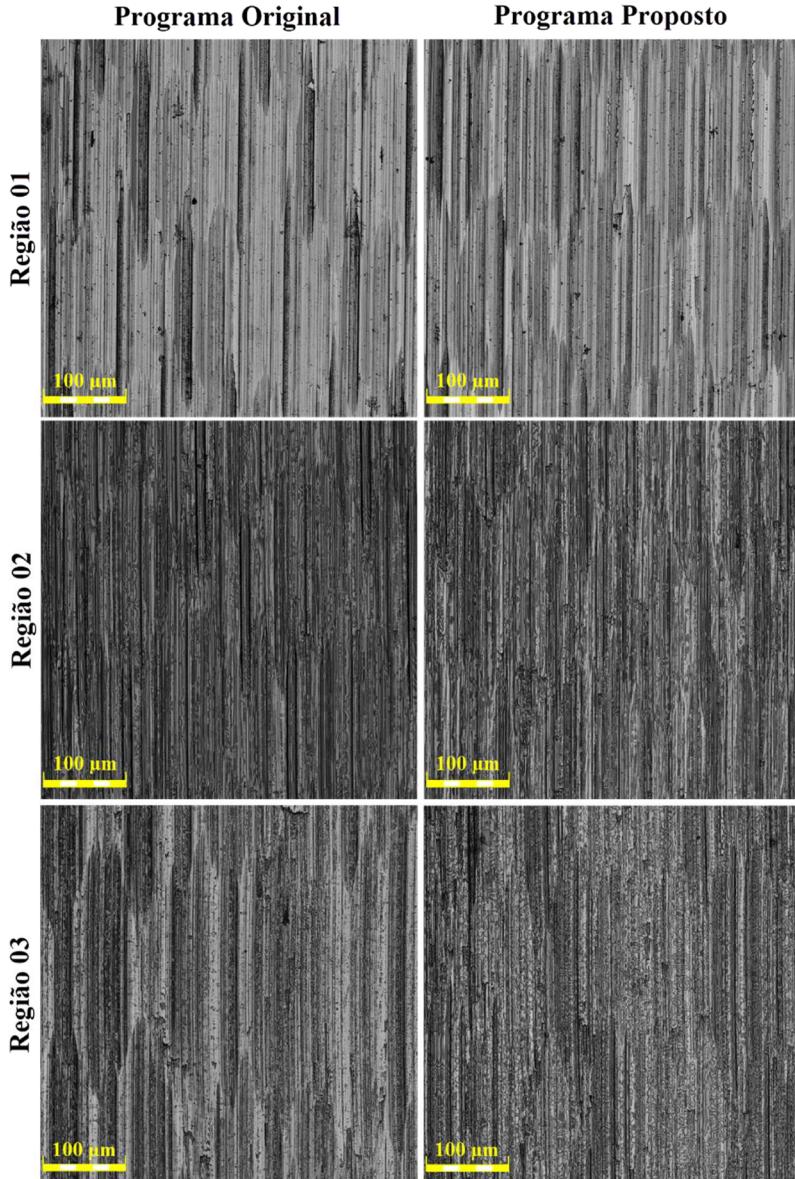


## b) Geometria facetada:



## APÊNDICE E – Comparativo entre as faces dos programas original e proposto para geometria complexa

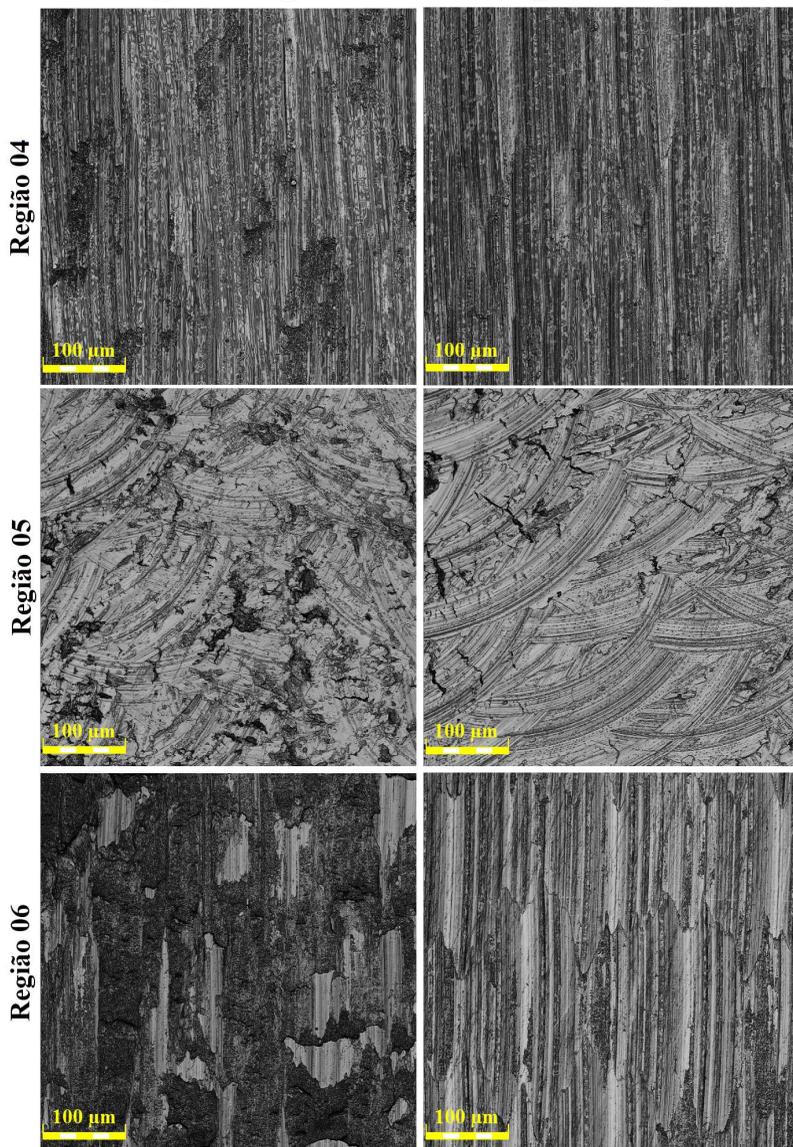
Imagens obtidas utilizando microscópio confocal e ampliação 430x



Imagens obtidas utilizando microscópio confocal e ampliação 430x

**Programa Original**

**Programa Proposto**

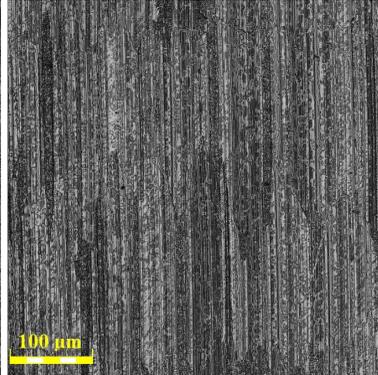
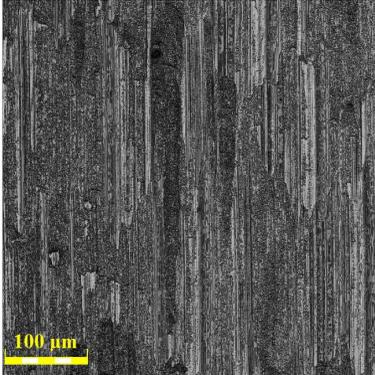


Imagens obtidas utilizando microscópio confocal e ampliação 430x

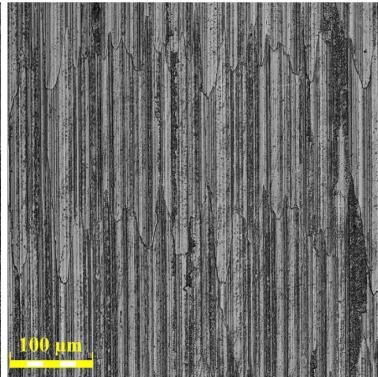
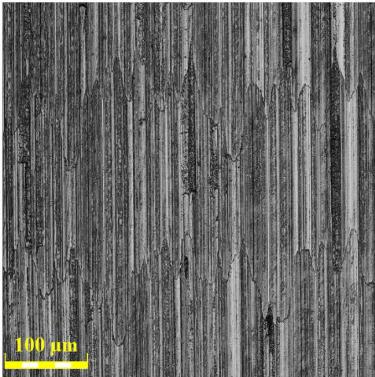
**Programa Original**

**Programa Proposto**

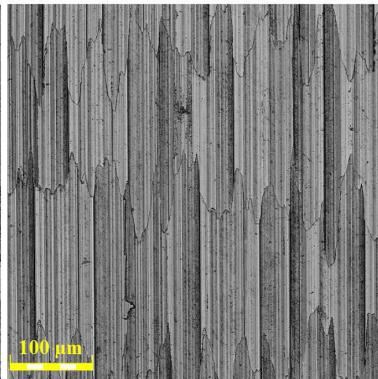
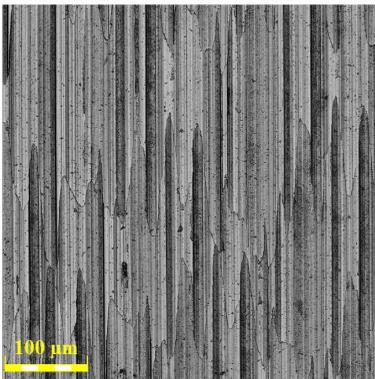
**Região 07**



**Região 08**

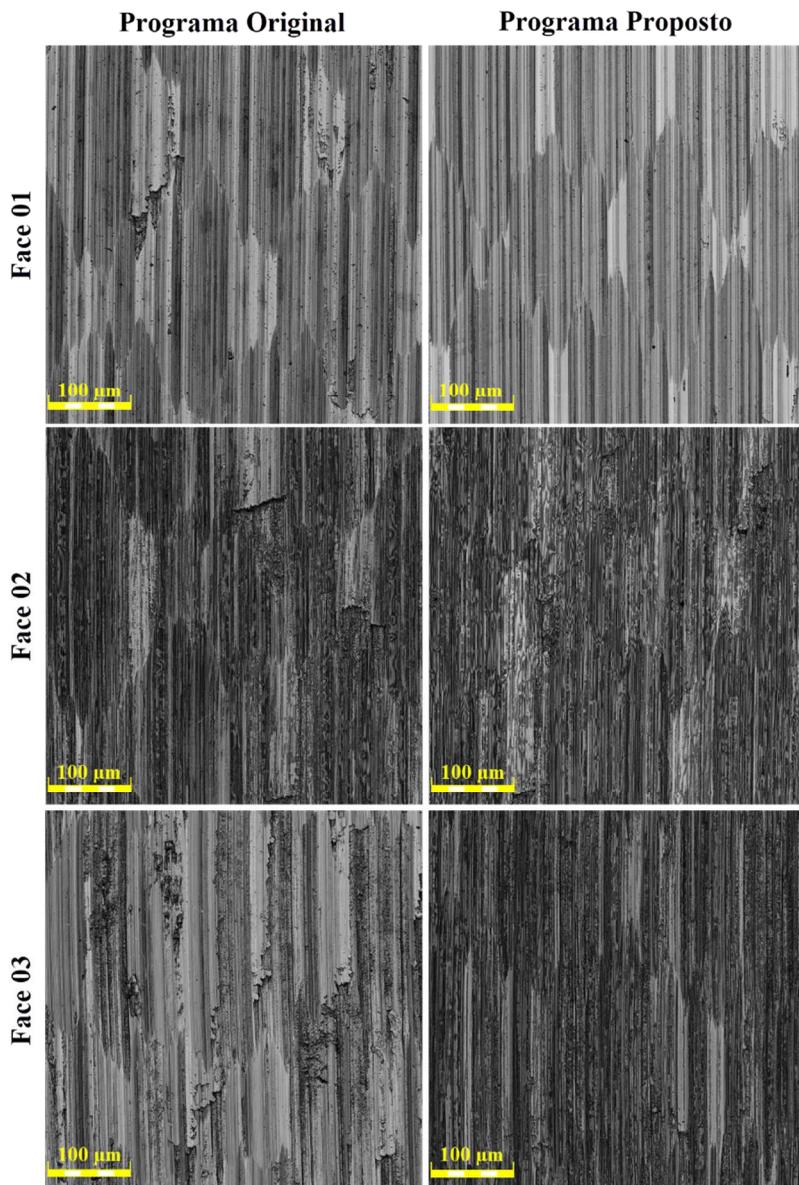


**Região 09**



## APÊNDICE F – Comparativo entre as faces dos programas original e proposto para geometria facetada

Imagens obtidas utilizando microscópio confocal e ampliação 430x

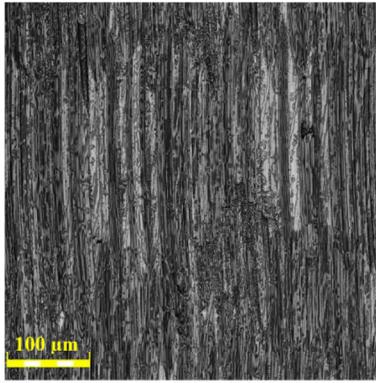
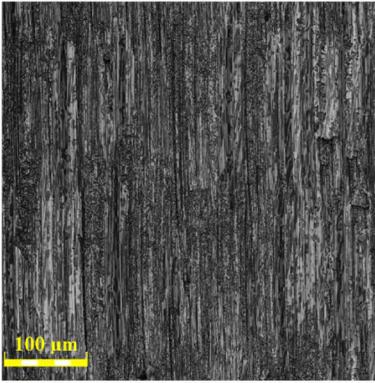


Imagens obtidas utilizando microscópio confocal e ampliação 430x

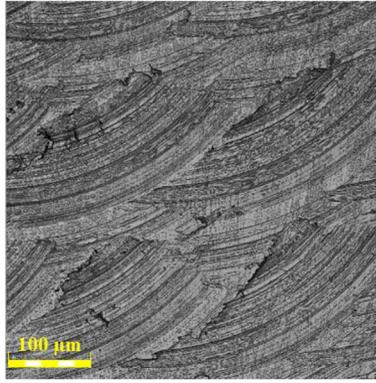
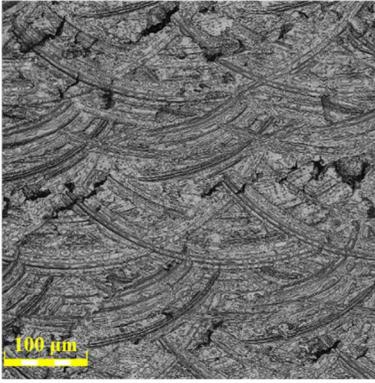
**Programa Original**

**Programa Proposto**

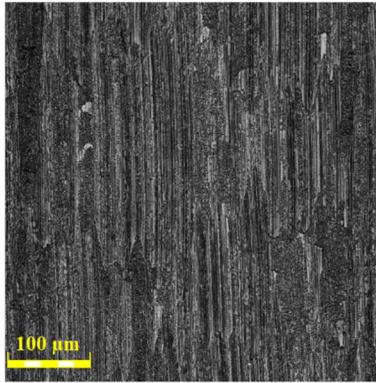
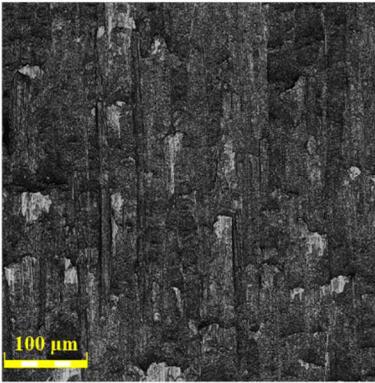
**Face 04**



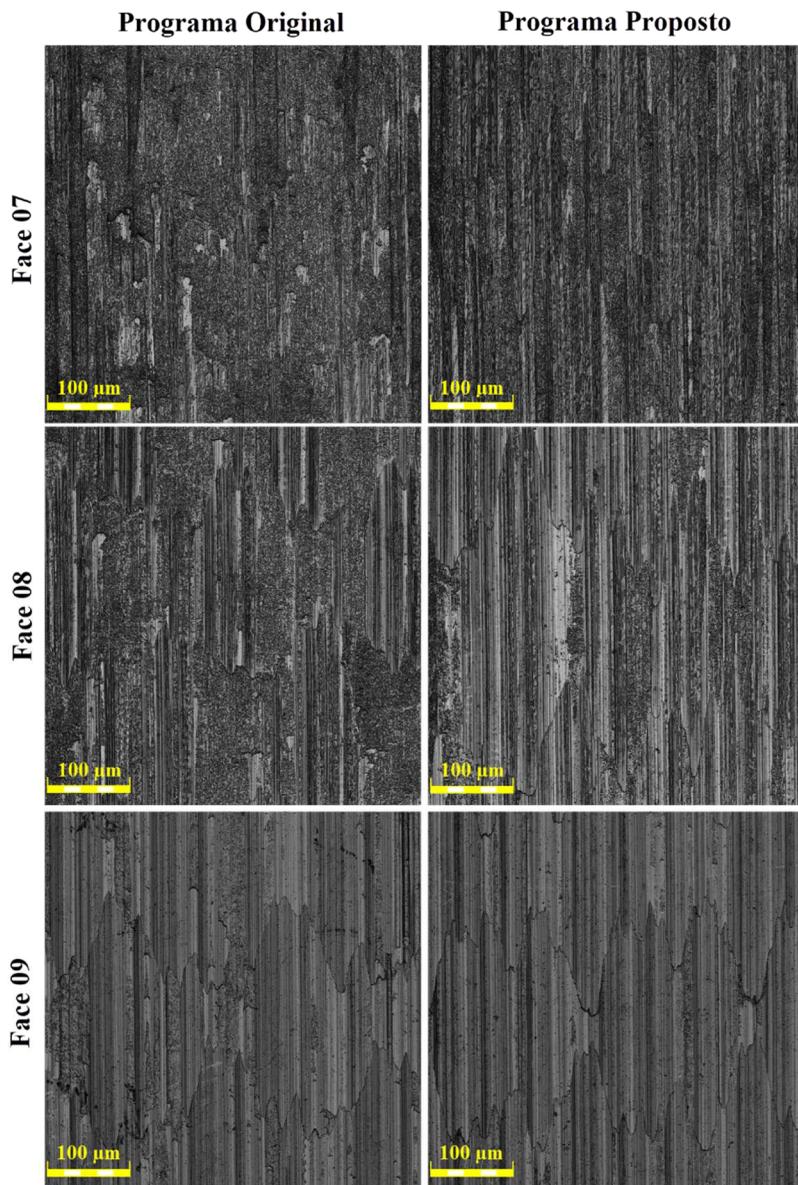
**Face 05**



**Face 06**



Imagens obtidas utilizando microscópio confocal e ampliação 430x

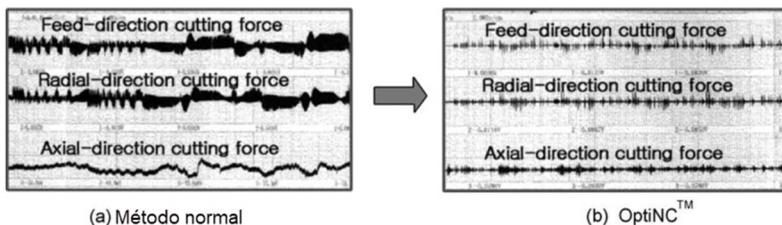




## ANEXO A

Gráfico das componentes da força de usinagem obtidos no estudo de Kim et al. (2002).

Neste estudo os autores não fornecem informações sobre qual região foi avaliada nem sobre qual a escala de força utilizada nos gráficos. Desta forma a interpretação dos resultados fica comprometida.



Fonte: Kim et al. (2002).

## ANEXO B – Certificado de Qualidade Matéria Prima



Nosso sistema de qualidade é certificado de acordo com a ISO 9001.

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO - JOINVILLE - SC

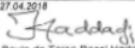
### CERTIFICADO DE QUALIDADE

CONFORME EN 10204 3.1

NÚMERO: 000001207781 Pág.: 1/ 1 NOTA FISCAL No.: 000033823 ITEM DA NF: 000004 DATA: 27.04.2018

CLIENTE: 200631 - ADRIANO FAGALI DE SOUZA

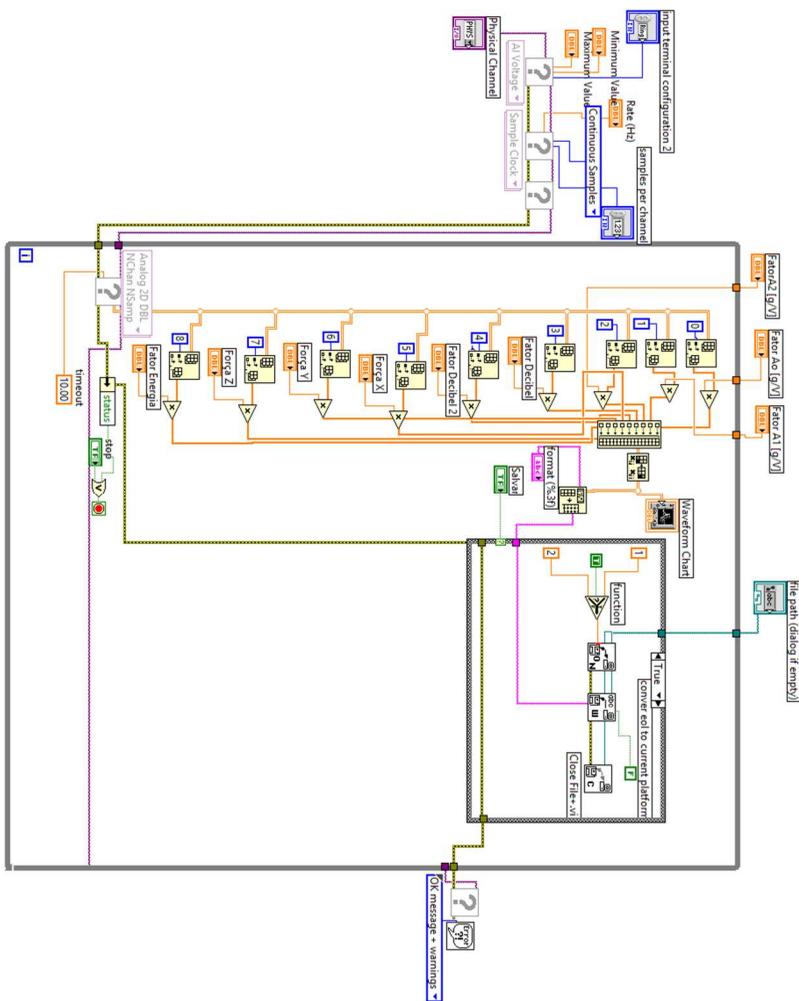
PEDIDO DO CLIENTE / SEQUÊNCIA / ITEM: Verbal Adriano- /

OP CD	LOTE	PEDIDO INTERNO	LIGA VILLARES	LIGA CLIENTE/SIMILAR	
8454647	8435287001	10234765/40	VP20/ISO	WNR 1.2738 MOD	
<b>NORMAS ATENDIDAS</b>					
<b>DESCRIÇÃO DO MATERIAL - VILLARES</b>				<b>COMPRIMENTO</b>	
Barras Chato Canto Vivo Forjados FESQ TRV VP20/ISO 89,00 x 352,00 x 371,00				mm	
PESO/kg	QUANT.	UNIDADE	PRODUTO	TRATAMENTO TÉRMICO	ACABAMENTO
92,500 KG	1	KG	BARRA	Temperado e Revenido	Fresado (Esquerdejado)
PROCESSO DE FUSÃO			LINHA DE PRODUTO	CORRIDA	
FORNO ELÉTRICO A ARCO + VD			Forjados	4854837	
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)					
Análise química na liga					
C 0.36	Si 0.31	Mn 1.66	P 0.011	S <0.0010	Cr 1.84 Mo 0.33 Ni 0.72
Al <0.005	N 0.0050				
<b>Dureza</b>					
Resultado: 32 HRC					
<b>Ultra-som</b>					
Situação: Aprovado					
MATERIAL INSPECIONADO POR ULTRA-SOM E APROVADO CONFORME NORMA EN 10228-3:1998-CLASSE 4					
<b>Inspeção visual e dimensional</b>					
Situação: Aprovado					
<b>Teste anti-mistura</b>					
Situação: Aprovado					
<b>A VILLARES METALS DECLARA QUE ESTE PRODUTO ESTÁ EM CONFORMIDADE COM AS ESPECIFICAÇÕES DO PEDIDO DE COMPRA</b>					
CNPJ 42.566.753/0008-30 - CD JOINVILLE-SC R. Dona Francisca, 8300 - BLOCO C7 89219-400 - Joinville - SC - BRAZIL Fone: 0800 707 0577 / 0800 19 0577 E-mail: cac@villaresmetals.com			<b>PRESTAMOS SERVIÇOS DE TRATAMENTO TÉRMICO. CONSULTE-NOS.</b>		27.04.2018  Paulo de Tarso Rossi Hestland

## ANEXO C – Rotinas LabView

Rotina para a aquisição das componentes da força de usinagem.

Diagrama de blocos



# Interface

File Edit View Project Operate Tools Window Help

Channel Parameters Chart

Physical Channel  
% cDAQ1Mod2/ai0

Minimum Value  
-5.00

Maximum Value  
5.00

Input terminal configurator  
Differential

STOP

Timing Parameters  
Rate (Hz)  
10000.00

samples per channel  
1000

File Properties  
file path (dialog if empty)  
G:\Users\javaras\Desktop\Ignor\PC20\FAC\_2\_MOD\_3.txt

format (%.3f)

Shaver OFF

Aceleração g

40689006

Time

Fator Ao [g/V]  
Fator A1 [g/V]  
Fator A2 [g/V]  
Fator Decibel  
Fator Decibel 2  
Fator Energia

Força X  
Força Y  
Força Z

0.00  
-0.00  
-0.00  
-0.00  
3.51  
2.52  
0.58  
-0.00

A0  
A1  
A2  
Decibel 1  
Decibel 2  
Força X  
Força Y  
Força Z  
Potencia

## ANEXO D – Rotinas Matlab

Rotina para tratamento dos dados de força provenientes da rotina ilustrada no Anexo C.

```

clc, clear all, close all

Faq = 10000; % [Hz] Frequência de Aquisição
Cx = 6;      %Coluna do Eixo X
Cy = 7;      %Coluna do Eixo Y
Cz = 8;      %Coluna do Eixo Z

%{


---


LEITURA DOS DADOS DO TXT


---


%}
tic;
[FileName,PathName]=uigetfile('*.txt','Selecione o
Arquivo de Dados'); %Busca o arquivo .txt de força
(gerado pelo LabVIEW)
if isequal(FileName,0) || isequal(PathName,0)
    disp('Operação cancelada')
    return
else
    disp(['Arquivo selecionado: ',FileName]) %Retorna
mensagem na Janela de Comando
end

F=load([PathName FileName]); %Le os dados do arquivo
.txt e salva na matriz F
N = length(F(:,1)); % [Numero de amostras] Comprimento
Amostral
nname = length(FileName);
%%
%{


---


SELECIONANDO REGIÃO DE ANÁLISE


---


%}
%Plotar o Gráfico Completo Corrigido
figure(1)
plot(F)
title('Gráfico Total')
xlabel('Amostras coletadas')

```

```

ylabel('Respostas')
grid on

%Escolhendo o intervalo de análise

uiwait(msgbox({'Selecione a Região de Análise'}));
%Ponto 1
    zoom on
    pause()
    [P(1),y] = ginput(1); % ginput aquisita o ponto

    %Ponto 2
    zoom on
    pause()
    [P(2),y] = ginput(1);

P = round(P); % arredonda para o número inteiro mais próximo

if P(1) > P(2)
    uiwait(msgbox({'Os pontos selecionados devem ser subsequentes' 'Inicie novamente o botão Start'}, 'Error', 'error'));
    clc
    close(figure)
    return
end

%Plotando Gráfico da Região Desejada
figure(2)
plot(1:(P(2)-P(1)+1), F(P(1):P(2),Cx), '-b', 1:(P(2)-P(1)+1), F(P(1):P(2),Cy), ...
    '-r', 1:(P(2)-P(1)+1), F(P(1):P(2),Cz), '-g')
title('Forças de Usinagem', 'FontSize', 12, ...
    'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'Bold')
xlabel('Amostras', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontWeight', 'Bold')
ylabel('F(N)', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontWeight', 'Bold')
%grid on
legend('Fx','Fy','Fz', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman',...
    'FontWeight', 'Bold')

%{

```

## SALVANDO REGIÃO DE ANÁLISE

```
%}
%Exportando as componentes de força desejada

uiwait(msgbox({'Salvar a Região de Análise'}));

[sai, path] = uiputfile([FileName(1:nname-4)
'_Regiao_1.txt'],'Exportar intervalo selecionado do
sinal');
if isequal(sai,0) || isequal(path,0)
    disp('Operação cancelada')
    return
else
    %disp(['User selected ', fullfile(path, sai)])
end

part = fopen([path sai],'wt');

for i = P(1):1:P(2)
    fprintf(part,'%4.4f   %4.4f   %4.4f\n',F(i,Cx),
F(i,Cy), F(i,Cz));
end
fclose(part);

uiwait(msgbox({'Fim de Programa'}));
```

## ANEXO E – Certificado de Registro de Programa de Computador



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL  
Ministério Da Indústria, Comércio Exterior e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

Diretoria de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

### Certificado de Registro de Programas de Computador

**Processo nº: BR 51 2018 000766-0**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de Registro de Programas de Computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de Publicação: 25 de abril de 2018, em conformidade com o parágrafo 2º, artigo 2º da Lei Nº 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: **CAM SPEED**

Data de Criação: 25 de abril de 2018

Data de publicação: 25 de abril de 2018

Titular(es): UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Autor(es): ADRIANO FAGALI DE SOUZA  
/ ALESSANDRO ROGER RODRIGUES  
/ NICOLAS DE LIMA ROSSINI SEVERINO  
/ RODRIGO BERRETTA KASEMODEL

Linguagem: OUTROS

Campo de Aplicação: IN-02, IN-03, IN-05

Tipo Programa: AT-07, DS-03, SM-04

Algoritmo Hash: SHA-256

Resumo Digital: E41ECFF972C4E3D808CAE3BDE3A1E0379D76AE22EA2E3B413ABE96AA4E405EC

Expedido em: 29 de maio de 2018

Aprovado por Julio Cesar Castelo Branco Reis Moreira

