

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

NÍCOLAS DE LIMA ROSSINI SEVERINO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO
DO FRESAMENTO EM QUATRO EIXOS DE FORMAS COMPLEXAS ATRAVÉS DA
VELOCIDADE DE CORTE E VELOCIDADE DE AVANÇO

Joinville

2022

NÍCOLAS DE LIMA ROSSINI SEVERINO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO
DO FRESAMENTO EM QUATRO EIXOS DE FORMAS COMPLEXAS ATRAVÉS DA
VELOCIDADE DE CORTE E VELOCIDADE DE AVANÇO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Aeroespacial
do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Adriano Fagali de Souza

Joinville

2022

NÍCOLAS DE LIMA ROSSINI SEVERINO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO
DO FRESAMENTO EM QUATRO EIXOS DE FORMAS COMPLEXAS ATRAVÉS DA
VELOCIDADE DE CORTE E VELOCIDADE DE AVANÇO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 15 de dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

Dr. Adriano Fagali de Souza
Orientador/Presidente

Dr. Cristiano Vasconcellos Ferreira
Membro
UFSC - Joinville

Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro
UFSC - Joinville

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Claudete e ao meu pai Valdir que dedicaram apoio e aconselhamento e à minha namorada Marielly por todo o amor e compreensão, virtudes que se tornaram necessárias neste ano.

Ao professor Dr. Adriano Fagali por todo tempo dedicado a conversas e aconselhamentos ao longo dos anos de iniciação científica e desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros e ex-membros do GPCAM, que dispenderam uma fração do tempo para discussões que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho. Em especial, aos MSc Rodrigo Käsemödel e MSc Rodrigo Voigt pela amizade e participação no meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

Por fim, agradeço à empresa Perfilpolimer Gravaplast pela parceria no estudo e validação deste trabalho.

RESUMO

Na usinagem de formas complexas utilizando máquina CNC 4 eixos, realiza-se o processo de acabamento com uma fresa de ponta esférica. Com isso, o contato ferramenta-peça se altera constantemente ao longo da usinagem, modificando o diâmetro efetivo de corte reduzindo a qualidade da geometria final e do processo. Este trabalho propõe a elevação da maturidade de um sistema para otimizar a velocidade de avanço e rotação da ferramenta, mantendo o avanço por aresta e a velocidade de corte o mais constante possível. Este programa atua na identificação do contato entre a ferramenta-peça alterando a rotação e a velocidade de avanço no programa CNC sempre que necessário. O software proposto foi avaliado em termos de qualidade da superfície, maturidade e tempo de usinagem. Os resultados mostram que o programa modifica corretamente o programa CNC, mantendo a velocidade de corte e o avanço por aresta o mais constante possível. Em algumas superfícies da geometria, foi observado uma melhor qualidade da superfície com a utilização do programa proposto. Além disso, apresentou uma redução de até 17% no tempo de usinagem com relação ao programa convencional. Por fim, o software demonstrou um índice adequado de maturidade para ser inserido em ambiente relevante de baixa escala.

Palavras-chave: Usinagem 4 eixos. Formas complexas. Otimização da velocidade de avanço. Diâmetro efetivo. NXOpen.

ABSTRACT

When machining complex shapes using a 4-axis CNC machine, the finishing process is carried out with a ball nose milling cutter. As a result, the tool-part contact changes constantly throughout the machining process, modifying the effective cutting diameter, reducing the quality of the final geometry and the process. This work proposes the development of the maturity of a system to optimize the feed rate and rotation of the tool, keeping the feed per edge and the cutting speed as constant as possible. This program identifies the contact between the tool and the workpiece, changing the rotation and the feed rate in the CNC program whenever necessary. The proposed software was evaluated in terms of surface quality, maturity and machining time. The results shown that the program correctly modifies the CNC program, keeping the cutting speed and the feed per edge as constant as possible. In some surfaces of the geometry, a better surface quality was observed with the use of the proposed program. Moreover, it showed a reduction of up to 17% in machining time compared to the conventional program. Finally, the software demonstrated an adequate maturity level to be inserted in a relevant low-scale environment.

Keywords: 4 axis milling. Complex geometries. Surface speed optimization. Effective diameter. NXOpen.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis TRL.....	14
Figura 2 - Relação entre os pontos CC e CL.....	17
Figura 3 - Modelo mecânico para o cálculo do diâmetro efetivo.....	18
Figura 4 - Programa NC convencional (a) e otimizado pelo CAMSpeed (b).	20
Figura 5 - Interface do menu do CAMSpeed versão 1.0 e corpo de prova do experimento.....	20
Figura 6 - Cavidade usinada e tempo de usinagem dos programas CNC avaliados.	21
Figura 7 - Geometria de prova.	25
Figura 8 - Trajetória da ferramenta.....	26
Figura 9 - Planejamento da validação do programa proposto.	28
Figura 10 - (a) Centro de usinagem Romi D600 3 + 1 eixos; (b) fresa esférica 6mm; (c) Porta-pinça com ER32.	29
Figura 11 - Sistema de eixos coordenados da usinagem.....	31
Figura 12 – Fluxograma do programa CAMSpeed 4 eixos.	34
Figura 13 - Interface do programa CAMSpeed 4 eixos.	35
Figura 14 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação teórica para o programa NC convencional e proposto (VarMin nula).....	37
Figura 15 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação para o programa NC convencional e proposto (VarMin 200 rpm).	38
Figura 16 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação para o programa NC convencional e proposto (VarMin 400 rpm).	39
Figura 17 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação para o programa NC convencional e proposto (VarMin 1000 rpm).	39
Figura 18 - Tempo de execução dos programas CAMSpeed e convencional.....	40
Figura 19 - Geometria usinada: (a) Região do programa convencional, (b) Região do programa proposto.	42
Figura 20 - Rugosidade R_a da geometria final usinada.....	42
Figura 21 - Imagem com ampliação de 100x da região de rpm máximo: (a) Programa convencional, (b) Programa proposto VarMin 200 rpm, (c) Programa proposto VarMin 400 rpm, (d) Programa proposto VarMin 1000 rpm.....	43

Figura 22 - Imagem com ampliação de 100x da região complexa do fuso: (a) Programa convencional, (b) Programa proposto VarMin 200 rpm, (c) Programa proposto VarMin 400 rpm, (d) Programa proposto VarMin 1000 rpm.....44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de corte utilizados no desbaste	26
Tabela 2 - Parâmetros nominais de corte utilizados para o experimento.....	27
Tabela 3 - Parâmetro de Variação Mínima para cada usinagem.	27
Tabela 4 - Avaliação do MRL para o CAMSpeed e CAMSpeed 4 eixos.	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Níveis MRL e descrição dos conceitos.....	15
Quadro 2 - Perguntas para definir o índice MRL.....	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C&T – Ciência e Tecnologia

CC – Cutter Contact

CL – Cutter Location

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

GAO – Government Accountability Office

GPCAM – Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Intelectual

ICEI – Indicador Composto Estadual de Inovação

MRL – Manufacturing Readiness Level

NASA – National Aeronautics and Space Administration

OCDE – Organização para a Cooperação e desenvolvimento Econômico

RPM – Rotações Por Minuto

TRL – Technology Readiness Level

VBA – Visual Basic for Application

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de corte axial [mm]
a_p	Profundidade de corte radial [mm]
D_{ef}	Diâmetro efetivo de corte [mm]
$D_{nominal}$	Diâmetro Nominal da ferramenta [mm]
F	Velocidade de avanço [mm/min]
$F_{otimizada}$	Velocidade de avanço otimizado [mm/min]
f_z	Avanço por aresta [mm/aresta/revolução]
na	Número de arestas da ferramenta
n	Rotação da ferramenta [rpm]
$n_{otimizada}$	Rotação otimizada [rpm]
R_{ef}	Raio efetivo [mm]
ρ	Raio nominal da ferramenta [mm]
S	Parâmetro de rotação do Programa NC
v_c	Velocidade de corte [m/min]
V_N	Vetor normal à superfície
X_{V_N}	Componente X do vetor normal à superfície
x'_{V_N}	Componente X do vetor normal pós rotação de eixo
Y_{V_N}	Componente Y do vetor normal à superfície
z'_{V_N}	Componente Z do vetor normal pós rotação de eixo
θ	Ângulo de rotação de eixos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1.OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo Geral	12
1.1.2. Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 CLASSIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS PELO MÉTODO TRL E MRL	14
2.2 ESTADO DA ARTE: DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	17
3. METODOLOGIA	22
3.1 VALIDAÇÃO DA MATURIDADE DO PROGRAMA CAMSPEED	22
3.2 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL	23
3.3 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PROPOSTO	24
3.3.1 Composição do experimento	24
3.3.1.1 Geometria de prova	24
3.3.1.2 Desbaste	25
3.3.1.3 Experimento de usinagem do acabamento	26
3.3.1.4 Análise da rugosidade superficial	28
3.3.2 Equipamentos utilizados no experimento	28
3.3.2.1 Centro de usinagem por fresamento e ferramentas	28
3.3.2.2 Equipamento de medição de rugosidade	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL	30
4.1.1 Desenvolvimento matemático	30
4.1.2 Desenvolvimento computacional – CAMSpeed 4 eixos	32
4.1.2.1 Obtenção dos vetores normais e otimização da velocidade de avanço	33
4.1.2.2 Interface do programa e outputs	35
4.2 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PROPOSTO	35
4.2.1 Avaliação do programa gerado	36
4.2.2 Tempo de usinagem dos programas	40
4.2.3 Avaliação da qualidade superficial	41
4.3 AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DO PROGRAMA PROPOSTO	44
5. CONCLUSÃO	47

REFERÊNCIAS.....	49
APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DO MRL PARA OS ESTÁGIOS DO PROGRAMA PROPOSTO.....	51
ANEXO A – CERTIFICADO DE REGISTO DE PROGRAMA DE COMPUTADOR .	53

1. INTRODUÇÃO

A cooperação entre universidades e empresas é um índice importante na competitividade e desenvolvimento dos países e suas indústrias. De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2019), aqueles com alto investimento público em pesquisa e capacidade de inovar apresentam ganhos de produtividade e são propensos a enfrentar os desafios socioeconômicos de forma contundente (OECD, 2019). Segundo Matei (2012), as interações entre empresa, universidade e governo asseguram, por meio da transferência de tecnologia o desenvolvimento tecnológico das empresas. Para mensurar esse desenvolvimento, o autor defendeu a criação de um sistema de indicadores.

Benelli (2022) estipulou um sistema de indicadores a nível federal em conjunto do Indicador Composto Estadual de Inovação (ICEI) a fim de estimar o desenvolvimento das relações universidade-empresa. O indicador demonstrou que o dispêndio público do estado de Santa Catarina aplicado em desenvolvimento de Ciência e Tecnologia (C&T) apresenta uma diferença 25% maior em relação ao Dispêndio empresarial nas Atividades Inovativas. Os dados aglomerados do Brasil apresentam essa proporção de forma inversa, o gasto em C&T proveniente da iniciativa privada se mostra 32% maior que o investimento público (BENELI, 2022), indicando a necessidade de financiamento e distribuição de incentivos para reduzir a diferença entre a esfera pública e privada.

Para isso, a metodologia de transferência de conhecimento das universidades para empresas é um fator importante para aumentar o intercâmbio da inovação laboral para o ambiente industrial, sendo possível por meio de canais informais e formais. Os canais informais incluem a criação de redes de contato, conferências e educação continuada fornecida pelas universidades às empresas. Já os canais formais de interação abrangem spin-offs acadêmicos, pesquisa colaborativa, contratos de pesquisa, patenteamento e licenciamento de invenções de universidades (OECD, 2019).

A partir dos canais formais para aumento do intercâmbio da inovação laboral produzida no âmbito universitário, para o ambiente industrial, uma metodologia dedicada à avaliação da inserção de uma patente na indústria, a partir de estudos de

base iniciados em ambiente universitário, é necessária para reduzir e otimizar o processo de transferência de invenções e patentes. Nessa perspectiva, tem-se o Technology Readiness Levels (TRL), desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), que é um modelo de análise de inovação e tecnologia para estimar a maturidade de um estudo científico previamente iniciado em âmbito universitário laboratorial que será introduzido em um ambiente industrial (OSD MANUFACTURING TECHNOLOGY PROGRAM, 2018).

Criado por Sadin et al. (1989) e complementado por Mankis et al. (1995), o TRL propõe adotar uma escala de um a nove cujo objetivo é estabelecer de forma sistemática níveis evolutivos de desenvolvimento para qualquer tipo de tecnologia, apontando quão assertivo é o projeto avaliado. Na mesma linha, o Manufacturing Readiness Level (MRL), criado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD), para a indústria manufatureira, avalia o desenvolvimento de fornecedores ou aponta a escala de maturidade de um projeto para ser incorporado pelas empresas (MANUFACTURING TECHNOLOGY PROGRAM – OSD, 2018).

Nessa perspectiva, utilizando a metodologia desenvolvida pelo DoD, este trabalho propõe aumentar a maturidade de um programa de computador voltado à otimização da manufatura de moldes com geometrias complexas. O programa CAMSpeed® que está na escala MRL 4 – capacidade de reproduzir a tecnologia em laboratório – foi desenvolvido previamente no laboratório do Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador (GPCAM) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ). O resultado apresenta a matriz de avaliação e execução da análise por MRL expondo as justificativas para aumento da avaliação do software de MRL 4 para MRL 8. Assim como apresenta a evolução da lógica de programação do algoritmo observando os ganhos obtidos em tempo e rugosidade da geometria final com relação ao método convencional.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aumentar a maturidade tecnológica do software CAMSpeed 4 eixos por meio do método MRL para aplicação no fresamento

em escala industrial de geometrias complexas utilizando ferramentas de ponta esférica.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar o emprego dos métodos TRL e MRL visando a aplicação em software para usinagem de formas complexas com ferramenta de ponta esférica;
- Definir a matriz de desenvolvimento da maturidade tecnológica do software;
- Desenvolver os ajustes necessários na linguagem de programação do programa de computador proposto;

Avaliar o emprego da solução computacional e os ganhos em tempo e rugosidade com relação ao método convencional.

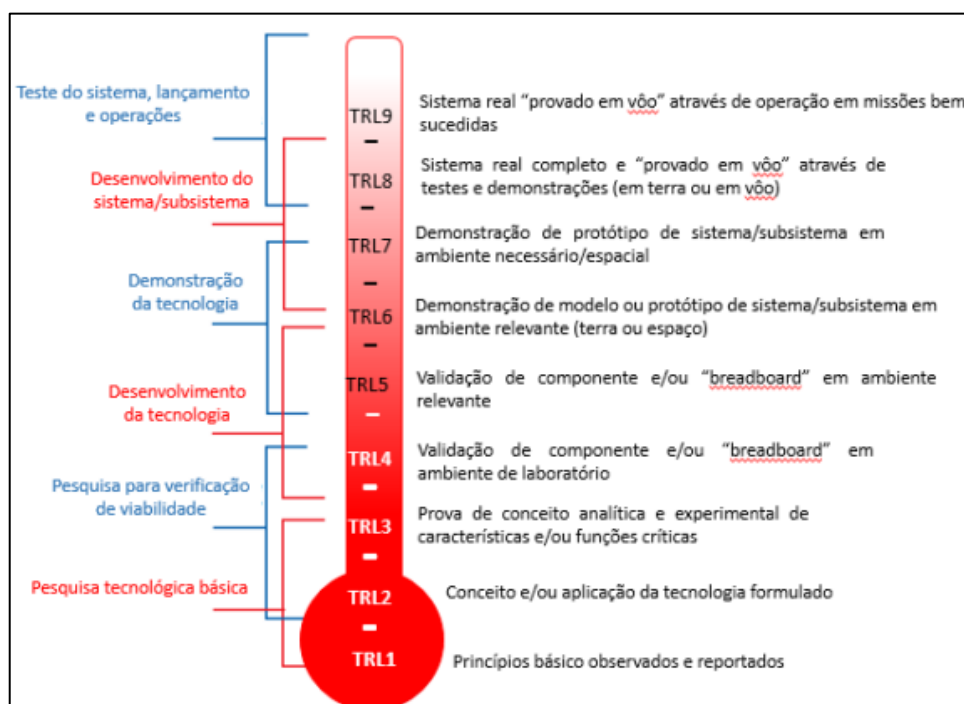
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As próximas seções deste capítulo abordam a teoria que fundamenta a metodologia proposta para desenvolvimento da maturidade tecnológica além de discorrer sobre o escopo do software proposto por este trabalho. Em conjunto com o método de avaliação da maturidade, será apresentado uma revisão do conjunto de experimentos que a versão do CAMSpeed 3 eixos utilizou.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS PELO MÉTODO TRL E MRL

No final dos anos 60, a NASA demonstrava preocupação com a assertividade de tecnologias que seriam utilizadas em missões futuras. Assim, estudos culminaram no desenvolvimento da metodologia TRL para mensurar a maturidade de uma tecnologia (CATARINO, 2014). O objetivo desse modelo é estabelecer de forma sistemática níveis evolutivos de maturidade, independente da tecnologia analisada. A Figura 1 representa os níveis TRL em conjunto com as fases de desenvolvimento e prova da tecnologia.

Figura 1 - Níveis TRL



Fonte: Catarino, 2014.

Ainda segundo Catarino, após diversos relatórios do Government Accountability Office (GAO) encontrando problemas com as tecnologias advindas de programas licenciados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos foi observado a necessidade de outra área ser investigada. Com dificuldades não somente na maturidade das tecnologias adquiridas, mas também, no processo de manufatura dos fornecedores, criou-se o MRL. Este modelo, inspirado no TRL, tem por objetivo avaliar a maturidade dos processos de manufatura. O MRL é composto por 10 níveis, apresentados no quadro 1, sendo que os níveis de 1 a 9 tem relação direta com os níveis de TRL.

Quadro 1 - Níveis MRL e descrição dos conceitos

(continua)

MRL	Descrição	Conceito
1	Implicações de Manufatura básica identificadas	É o nível mais baixo da escala. O objetivo é abordar deficiências e oportunidades necessários para atingir os objetivos do programa. É iniciado na forma de estudos. Um entendimento da viabilidade e riscos de manufatura começa a surgir.
2	Conceitos de manufatura identificados	É caracterizado por descrever a aplicação de novos conceitos de manufatura, incluindo estudos e análises de materiais e abordagens de processos.
3	Prova de conceito de manufatura desenvolvido	Os conceitos de manufatura são validados em laboratório. Esse é o nível de tecnologias em pesquisa aplicada e desenvolvimento avançado. Materiais e processos se mostram viáveis do ponto de vista de disponibilidade e de manufaturabilidade, mas avaliações adicionais e demonstrações são necessárias. Modelos de hardware são desenvolvidos em ambiente de laboratório com funcionalidades limitadas.
4	Capacidade de produzir a tecnologia em laboratório	Nesse nível, a tecnologia a ser produzida deve estar pelo menos no nível de maturidade TRL4. Processos que assegurem manufaturabilidade, produtividade e qualidade são suficientes para produzir tecnologia demonstrável. Riscos de manufatura são identificados na construção de protótipos e planos de mitigação começam a ganhar forma.
5	Capacidade de produzir protótipos de componentes em um ambiente de produção relevante	Base industrial foi identificada para identificar potenciais fabricantes. Protótipos de materiais, ferramentas, equipamentos de testes, bem como habilidades de pessoal são demonstradas, mas muitos processos e procedimentos de manufatura ainda estão em desenvolvimento. Tecnologia a ser produzida deve estar pelo menos no nível de maturidade TRL5

Quadro 1 – Níveis MRL e descrição dos conceitos.

(conclusão)

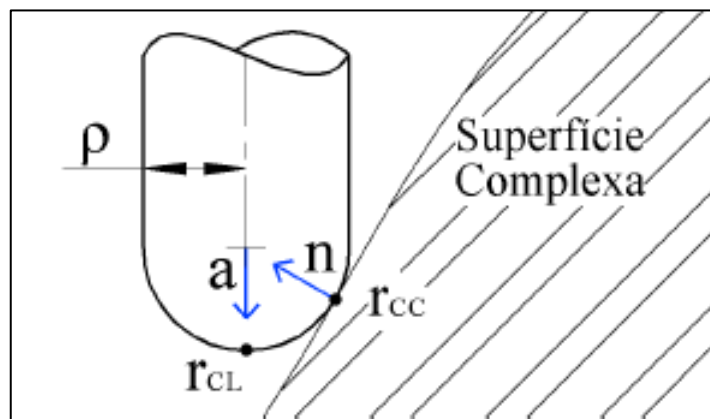
6	Capacidade de produzir um protótipo de sistema ou subsistema em um ambiente de produção relevante	É normalmente visto como o nível de maturidade de manufatura que denota aceitação de um projeto preliminar de sistema. A maioria dos processos foram definidos e caracterizados, mas ainda existem grandes mudanças de design no sistema. Processos e tecnologias de manufatura de protótipos, materiais, ferramentas e equipamentos de teste, além de habilidades de pessoal foram demonstradas ao criar o sistema/subsistema
7	Capacidade de produzir sistemas, subsistemas ou componentes em um ambiente de produção representativo.	Corresponde a um ponto entre Engenharia e Desenvolvimento da Manufatura A atividade de projeto detalhado do sistema está próxima do encerramento. As especificações de material foram finalizadas e materiais estão disponíveis para iniciar uma fabricação piloto. A cadeia produtiva e a garantia da qualidade dos fornecedores foi avaliada. Planos de fabricação e de metas de qualidade são desenvolvidos. Ferramentas para produção e projeto e desenvolvimento de equipamentos de testes são iniciadas. Nível de maturidade da tecnologia a ser fabricada deve ser pelo menos TRL7
8	Capacidade em ambiente de linha piloto demonstrada; pronto para iniciar produção em baixa escala.	Projeto detalhado do sistema é concluído e suficientemente estável para iniciar uma produção de baixa escala. Procedimentos, processos Manufatura e Qualidade provaram estar sob controle num ambiente de produção de baixa escala. Ferramentas, materiais, mão-de-obra, equipamentos de testes e instalações foram provados numa linha de produção piloto e disponíveis para iniciar uma produção em baixa escala.
9	Produção em baixa escala demonstrada; Capacidade para começar produção em grande escala	As tecnologias devem estar pelo menos no nível TRL9
10	Produção em grande escala demonstrada, incluindo práticas de manufatura enxuta	É o nível mais alto da escala. As mudanças de engenharia são poucas e geralmente associadas com a melhoria da qualidade e redução de custos. Sistemas, componentes estão em plena produção, atendendo a todos os requisitos de engenharia, performance, qualidade e confiabilidade. Todos os materiais, processos e procedimentos de fabricação, equipamentos e procedimentos de teste e inspeção são controlados por um nível de qualidade apropriado. Práticas de manufatura enxuta estão bem estabelecidas e processos de melhoria contínua são praticados.

Fonte: Catarino, 2014.

2.2 ESTADO DA ARTE: DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Na usinagem de moldes e matrizes com formas harmônicas, a movimentação da ferramenta é calculada com base em trajetórias criadas por um sistema CAM, gerando assim um programa NC que rege o deslocamento do fuso da máquina CNC. Os métodos de geração foram estudados por CHOI e JERARD (1998) e estabeleceram que a trajetória gerada pode ser baseada nos pontos de contato (CC, do inglês Cutter Contact) ou pontos de localização do centro da ferramenta (CL, do inglês Cutter Location). Dessa forma, construíram uma relação com base no vetor normal ao ponto que permite a correlação entre CC e CL. A figura 2 ilustra essa relação também expressa na Equação 1, na qual r_{CC} é o raio do ponto de contato da ferramenta, r_{CL} é o raio do ponto de localização da ferramenta, ρ o diâmetro nominal, \vec{a} e \vec{n} são o vetor do sentido de corte da ferramenta e o vetor normal à superfície, respectivamente.

Figura 2 - Relação entre os pontos CC e CL



Fonte: Käsemodel (2019).

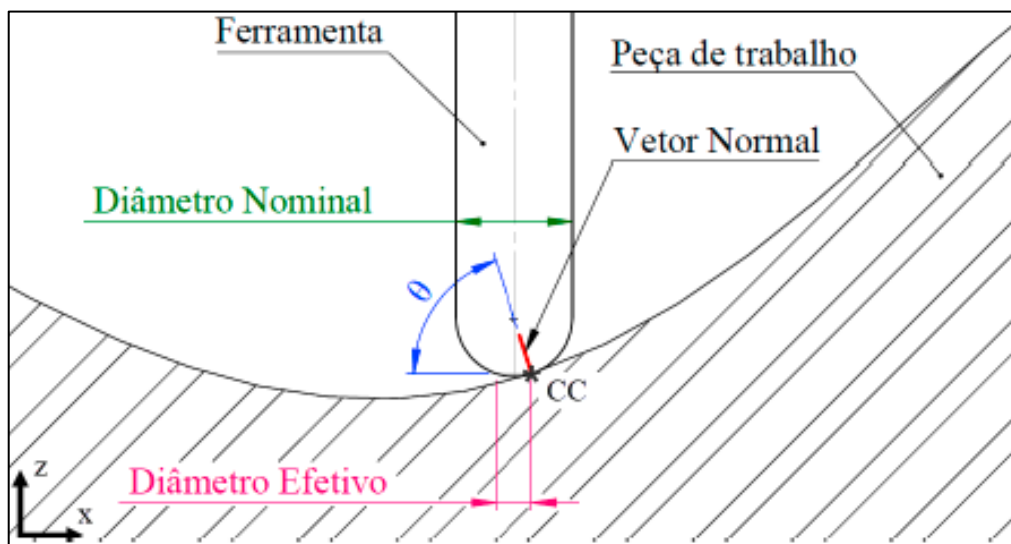
$$r_{CL} = r_{CC} + \rho \times (\vec{n} - \vec{a}) \quad (1)$$

A fim de criar uma prova de conceito, foi testado no laboratório do Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador (GPCAM) da UFSC Joinville a movimentação de uma máquina CNC. Desta prova de conceito, observou-se a relação expressa pela Equação 1, assim como, analisou-se alguns parâmetros de usinagem que poderiam impactar na trajetória da usinagem. No entanto, pouca documentação foi criada como resultado do experimento.

Käsemodel (2019) desenvolveu um programa de computador em linguagem VBA criando uma usinagem sistematizada e estipulando um estudo científico em ambiente laboral. Este software visa auxiliar uma usinagem em três eixos otimizando a velocidade de avanço e rotação da ferramenta mantendo a velocidade de corte e o avanço por aresta da ferramenta o mais constante possível através do diâmetro efetivo de corte.

O autor se baseou no estudo resultante da Equação 1 para desenvolver a matemática do algoritmo. A Figura 3 apresenta a relação entre o vetor normal do ponto CC e o diâmetro efetivo de corte, por meio de uma análise algébrica, culmina-se na Equações 2, para o diâmetro efetivo em função das coordenadas X e Y do vetor normal ao ponto CC.

Figura 3 - Modelo mecânico para o cálculo do diâmetro efetivo



Fonte: Käsemodel (2019).

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

Com base nas equações fundamentais da usinagem por fresamento, a velocidade de corte (v_c) pode ser expressa pela Equação 3 na qual $D_{nominal}$ é o diâmetro da ferramenta e n a rotação em rotações por minuto (rpm). Segundo Souza e Ulbrich (2013), a velocidade de avanço (F) pode ser definida pela Equação 4, onde na é o número de arestas da ferramenta e f_z é o avanço por aresta recomendado pelo fabricante.

$$v_c = D_{nominal} \times \pi \times n / 1000 \text{ [m/min]} \quad (3)$$

$$F = f_z \times na \times n \text{ [mm/min]} \quad (4)$$

Neste ponto, considera-se que será alterado o diâmetro nominal pelo efetivo alterando proporcionalmente a rotação nominal pela rotação otimizada. Desta forma, obtém-se pela equação 5, a rotação otimizada em função da velocidade de corte, do diâmetro efetivo.

$$n_{otimizada} = \frac{1000 \times v_c}{\pi \times D_{ef}} \quad (5)$$

A equação 5 fornece o valor da rotação necessária para manter a velocidade de corte constante no ponto CC analisado. Por fim, a equação 6 permite a obtenção de uma velocidade de avanço otimizada, mantendo o avanço por aresta também constante.

$$F_{otimizada} = f_z \times na \times n_{otimizada} \quad (6)$$

A partir de um programa NC pós-processado e um arquivo com vetores normais à superfície a ser usinada, o algoritmo calcula com base nas Equações 5 e 6 a velocidade de avanço e rotação otimizadas para uma usinagem com forma complexa.

Com o emprego do programa em um corpo de prova, o autor observou a redução do tempo de usinagem de até 26% com relação ao programa NC convencional. Além disso, o programa reduziu todas as componentes de força de usinagem em até 23%, culminando em uma redução da deflexão da ferramenta, e por consequência do erro de forma. Por fim, o algoritmo ainda reduziu a deformação plástica durante o corte, garantindo uma maior estabilidade do processo.

Avançando no aumento da maturidade do programa, Käsemodel et. al (2020) aplicaram o software em um estudo com diferentes estratégias de usinagem como as mais utilizadas: 3D-offset, passes paralelos e espiral. A utilização do software reduziu em até 40% o tempo total de usinagem. A Figura 4 apresenta o resultado para o programa NC otimizado pelo CAMSpeed comparado ao programa NC convencional.

Figura 4 - Programa NC convencional (a) e otimizado pelo CAMSpeed (b)

%				%					
N0010 G40	G17	G90	G71	N0010 G40	G17	G90	G71		
N0040 G00	G90	X44.3567	Y51.3943	S4669 M03	N0040 G00	G90	X44.3567	Y51.3943	S4669 M03
N0070 G01	X44.337	Y51.3697	Z-1.413	F466.9 M08	N0070 G01	X44.337	Y51.3697	Z-1.413	F466.9 M08
N0200 X40.1447	Y51.9796	Z-8.1641		N0200 X40.1447	Y51.9796	Z-8.1641	S8000	F800	
N0220 X39.3861	Y52.3643	Z-8.5239		N0220 X39.3861	Y52.3643	Z-8.5239	S7668	F767	
N0230 X39.2977	Y52.4062	Z-8.5665		N0230 X39.2977	Y52.4062	Z-8.5665	S7547	F755	
N0240 X38.9976	Y52.5520	Z-8.7135		N0240 X38.9976	Y52.5520	Z-8.7135	S7167	F717	

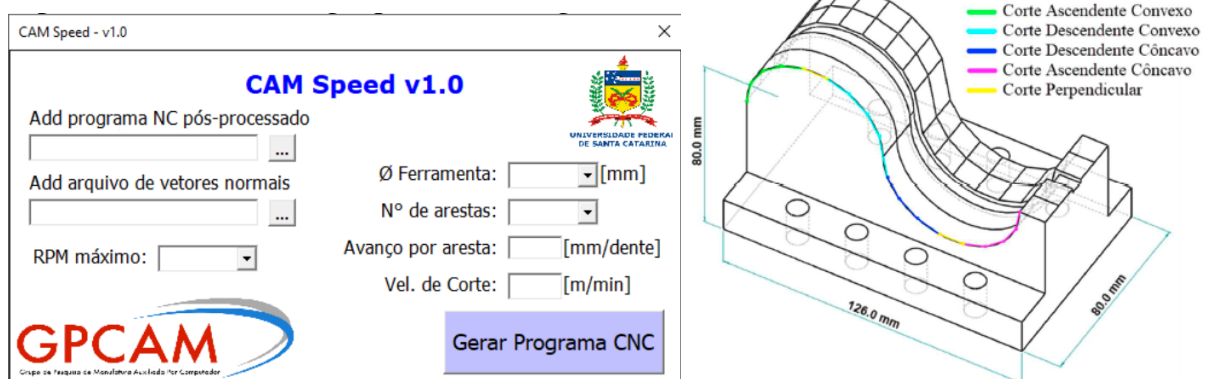
a

b

Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

O desenvolvimento do programa realizado por Käsemodel levou ao menu do usuário do CAMSpeed apresentado na Figura 5 em conjunto com o corpo de prova. Como entradas do menu, o usuário precisa fornecer um programa NC pós-processado, um arquivo com vetores normais da superfície a ser usinada, o número de rotações máxima por minuto (RPM) da fresadora CNC, o diâmetro, número de arestas, velocidade de corte e avanço por aresta da ferramenta. Esse estágio do programa possui registro de software junto ao INPI e está disponível no ANEXO A - Certificado de Registro de Programa de Computador.

Figura 5 - Interface do menu do CAMSpeed versão 1.0 e corpo de prova do experimento



Fonte: Käsemodel, 2019.

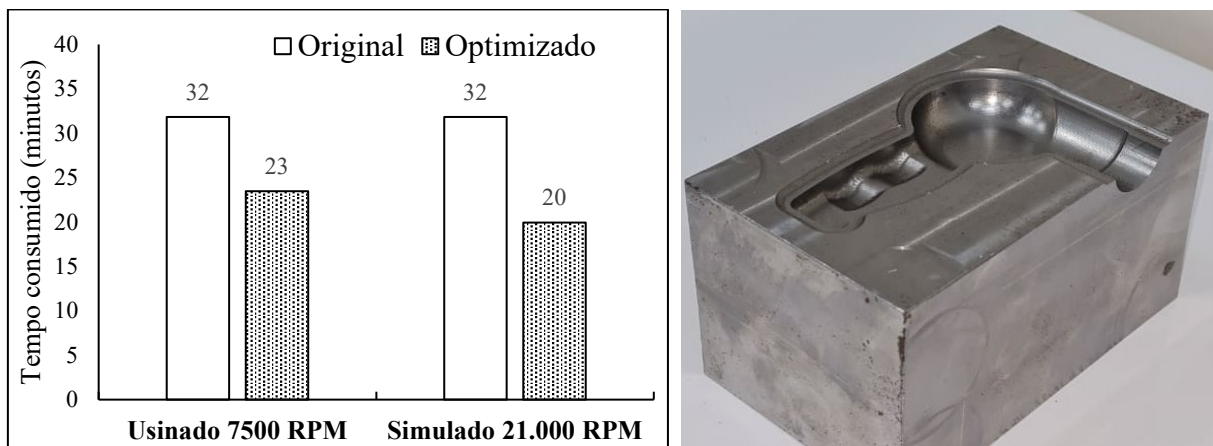
Camargo (2021), utilizou o CAMSpeed para analisar a vida da ferramenta após usinagens com o programa proposto e o programa convencional. O autor

observou que a vida da ferramenta e o erro de forma se mantiveram semelhantes aos programas NC convencionais, com uma tendência de melhora.

Avançando para a maturidade em um ambiente relevante, Souza et. al (2021) desenvolveu a primeira versão do programa CAMSpeed 3 eixos atrelado ao software CAD/CAM Siemens NX. Com o emprego do algoritmo em uma usinagem do molde de um secador, os experimentos foram realizados com uma máquina CNC com limitação de 7500 rpm para o eixo árvore. Para esta etapa, o programa proposto já apresentava uma nova interface com o usuário, automatizando o processo de vetores normais, retirados diretamente da operação criada no software CAM.

Como resultado do emprego do programa na geometria do molde, a Figura 6 apresenta o molde usinado e o ganho com o tempo de usinagem realizado no experimento, assim como, o tempo teórico, caso a máquina CNC utilizada dispusesse de maior velocidade de rotação do eixo árvore. Para esta usinagem em ambiente relevante, obteve-se uma redução de 26% no tempo de usinagem real e 37% no tempo de usinagem simulado.

Figura 6 - Cavidade usinada e tempo de usinagem dos programas CNC avaliados



Fonte: Souza et. al (2021).

Neste trabalho, propõe-se um avanço na maturidade do programa CAMSpeed, otimizando uma usinagem de uma geometria complexa com quatro graus de liberdade em ambiente representativo. Com este programa, pretende-se reduzir o tempo total de processo, garantindo uma qualidade superficial da geometria final superior ou próxima do programa convencional.

3. METODOLOGIA

Este trabalho está dividido em três fases. Na primeira, realizou-se uma análise da maturidade atingida previamente pelo algoritmo do CAMSpeed, por meio do método MRL, na qual foi identificado o nível no qual se encontrava. Na segunda fase, foi proposto um algoritmo de computador, que altera os programas CNC gerados com quatro eixos atuantes por um programa CAM, cujo objetivo é manter a velocidade de corte constante ao longo da trajetória da ferramenta. Por fim, na terceira fase, realizou-se a experimentação utilizando o programa CNC otimizado pelo programa proposto e comparado com o programa convencional (gerado por sistema CAM, sem qualquer alteração), avaliou-se tempo de usinagem e qualidade da superfície final.

3.1 VALIDAÇÃO DA MATURIDADE DO PROGRAMA CAMSPEED

Segundo a estrutura apresentada no Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (2011), pode-se definir o nível de maturidade de uma tecnologia de manufatura a partir de uma quantidade única de fatores. Com a utilização do Quadro 2, proposto pelo Deskbook, busca-se o ranqueamento de cada tópico apresentado para o CAMSpeed e CAMSpeed 4 eixos, proposto por este trabalho, para corresponder a um MRL distinto em uma das nove categorias de maturidade apresentadas no Quadro 1.

Quadro 2 - Perguntas para definir o índice MRL

(continua)

Categoria de análise	Interpretação
Tecnologia e base industrial	Recursos industriais implementados para dar suporte à fabricação de protótipos de dispositivos em um ambiente de produção relevante
Design	Trabalho de projeto preliminar em andamento e capaz de apoiar a avaliação da capacidade de fabricação
Custo e financiamento	Processos, materiais e projetos podem fornecer estimativas razoáveis, incluindo despesas de capital
Materiais	As especificações preliminares do material estão em vigor e a capacidade da cadeia de suprimentos é identificada
Capacidade e controle do processo	Os processos da linha piloto são identificados no nível do componente

Quadro 3 - Perguntas para definir o índice MRL

(conclusão)

Gerenciamento da qualidade	O plano e o sistema de qualidade estão em vigor. Processos de inspeção e critérios de aceitação são identificados
Pessoal para fabricação	Os conjuntos de habilidades de fabricação são identificados e os requisitos da força de trabalho de produção avaliados
Instalações	As instalações de fabricação estão sendo avaliadas e os planos desenvolvidos para a produção de protótipos
Gerenciamento da manufatura	A estratégia de fabricação é refinada com base no conceito de design preferido. Avaliações de fazer/comprar iniciadas e incluir considerações de produção para a linha piloto

Fonte: Creelman et. al (2022).

Segundo Creelman (2021), pode-se avaliar um programa por meio do ranqueamento dos tópicos apresentados no Quadro 2. A avaliação deve expressar uma nota de 1 a 10, sendo 1 o MRL mais baixo e 10 pronto para ser utilizado em ambiente industrial relevante. A seguir, com a média aritmética dos tópicos, tem-se o MRL do programa proposto.

3.2 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL

O desenvolvimento matemático foi realizado a partir de conceitos e metodologias de geometria analítica e álgebra linear, utilizando como variáveis de entrada o diâmetro da ferramenta, as coordenadas de posicionamento da ferramenta ao longo da usinagem e os vetores da superfície a ser usinada. A fim de explicitar adequadamente o programa proposto, a metodologia de execução do algoritmo foi dividida em três etapas. A primeira etapa demonstrará a interface do usuário com o menu do programa. A segunda, evidencia-se a aquisição das variáveis de entrada do desenvolvimento matemático, já a etapa subsequente é destinada para o cálculo da rotação e velocidade de avanço da ferramenta e outras saídas.

A aquisição e cálculo do programa proposto é realizada a partir do software CAD/CAM Siemens NX 9.0 com o emprego da biblioteca de programação NXOpen, desenvolvido em linguagem C# no ambiente de programação do Visual Studio. Nesta primeira fase, foi desenvolvida uma interface para utilização do usuário sem necessidade de treinamento prévio. O usuário deverá alimentar o menu com variáveis de entrada: programa CNC pós-processado, a seleção da operação de usinagem no

NX, a geometria da usinagem e os parâmetros do processo (v_c, f_z e rotação máxima do centro de usinagem). Com os parâmetros inicializados, na segunda fase, as variáveis que compõem o cálculo são adquiridas considerando o ponto de contato (CC) entre a superfície a ser usinada e a ferramenta, vetores normais ao ponto CC e o incremento de rotação do quarto eixo. Ao final desta rotina, obtém-se um vetor unitário normal a cada ponto CC da usinagem atrelado ao grau de rotação do quarto eixo.

Na etapa final, a rotação e a velocidade de avanço são calculadas a partir do vetor unitário e grau de rotação do quarto eixo culminando no programa CNC corrigido, com as informações de rotação e avanço adicionadas ao final dos blocos, quando necessário. Desta forma, o avanço por aresta e a velocidade de corte se manterão constantes ao longo da trajetória de usinagem.

3.3 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PROPOSTO

Nesta etapa do trabalho, busca-se mensurar os ganhos obtidos com a utilização do programa proposto. Para isso, foi usinada uma bucha de injeção usada na refrigeração de moldes e realizadas medições da qualidade da superfície e tempo total do processo de acabamento, conforme detalhado nas seções a seguir.

3.3.1 Composição do experimento

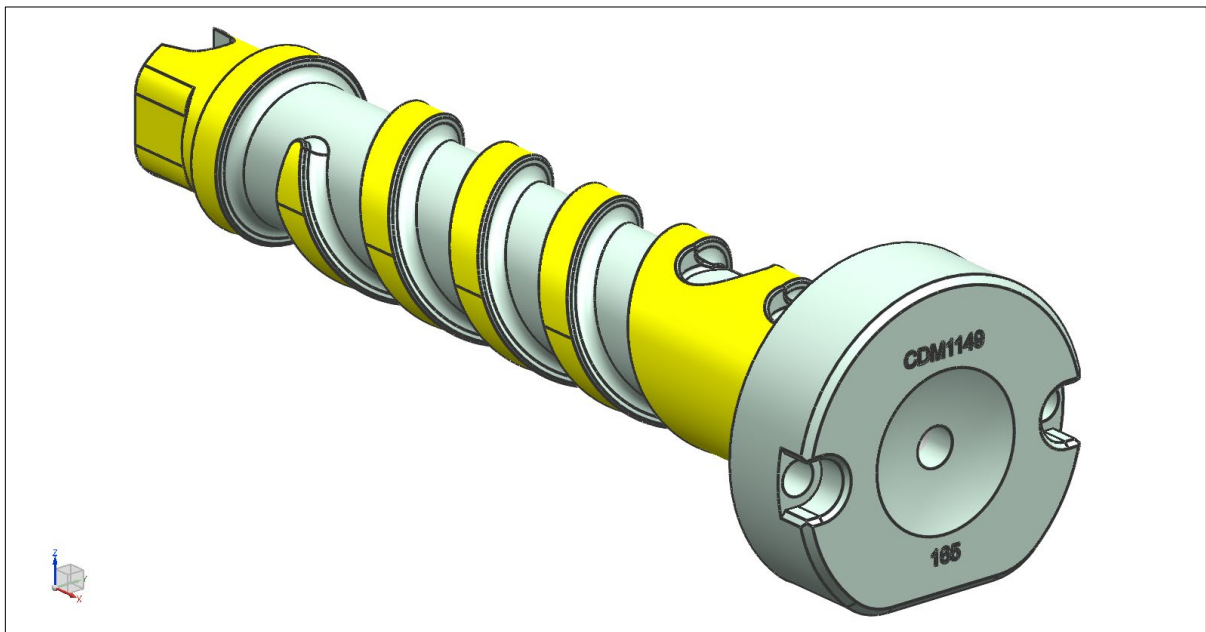
3.3.1.1 Geometria de prova

A geometria de prova apresenta duas seções que provém uma avaliação da proposta do CAMSpeed quatro eixos: uma complexa e outra reta. A geometria complexa proporciona uma análise das alterações de rotação e avanço geradas pelo programa. Na geometria reta, é possível verificar a menor porção de contato ferramenta-peça, esperando-se a elevação máxima da rotação da ferramenta. Para esta validação, usinou-se uma geometria de prova em aço AISI 8550.

A geometria foi dividida em duas porções de mesmo comprimento, a primeira destinada ao emprego da usinagem convencional (parâmetros provenientes da empresa) e, a segunda, para a usinagem otimizada pelo algoritmo proposto, garantindo-se 360° de usinagem para cada fração. A Figura 7 apresenta a geometria

de ambiente representativo. Em sua totalidade, a geometria possui regiões com as principais condições de corte: corte ascendente e descendente, côncavo e com corte perpendicular. Dessa forma, permite-se observar momentos de corte em que o diâmetro efetivo variará entre o espectro nominal ao diâmetro zero (atingindo quando somente o centro da ferramenta está em contato com a geometria).

Figura 7 - Geometria de prova



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.3.1.2 Desbaste

Os processos de desbaste e acabamento das geometrias 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 1, provenientes do catálogo de ferramentas da empresa fabricante, utilizados fielmente sem qualquer otimização ou intervenção do autor. No desbaste foram realizados passes paralelos no sentido transversal ao processo de acabamento.

Tabela 1 - Parâmetros de corte utilizados no desbaste

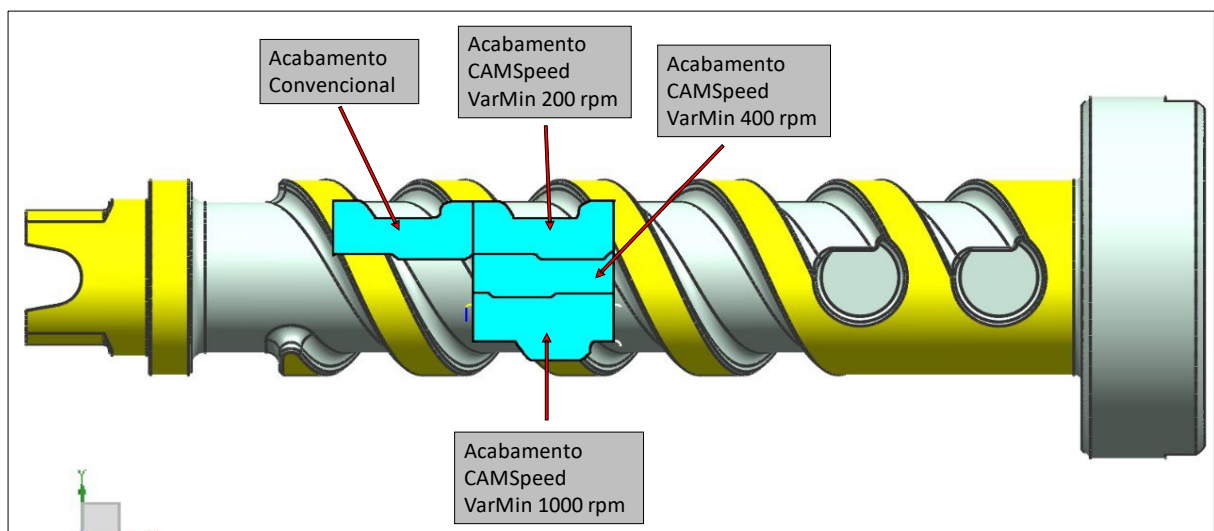
	Diâmetro da ferramenta	a_p	a_e	Estratégia	F	S
Unidade	mm	mm	mm	-	mm/min	rpm
Valor	6	9,0	0,3	Passes transversais	1152	7000

Para prevenir eventuais desalinhamentos entre as usinagens, foram utilizadas três pinças do quarto eixo e uma ponteira como dispositivo de fixação, garantindo rigidez e baixa vibração ao longo dos processos de desbaste e acabamento.

3.3.1.3 Experimento de usinagem do acabamento

A estratégia de usinagem utilizada no experimento foi do tipo streamline, passes paralelos unidirecionais (zigue) no sentido axial do fuso da bucha (Eixo X). Esta trajetória apresentada Figura 8 foi utilizada nos quatro experimentos e foi escolhida devido à utilização em ambiente relevante desenvolvido na empresa parceira ao estudo, possibilitando a análise entre a usinagem convencional e a proposta por esse trabalho com enfoque em ganhos para o ambiente fabril.

Figura 8 - Trajetória da ferramenta



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A Tabela 2 apresenta os valores nominais para os parâmetros do acabamento utilizados na validação do programa proposto. Aqui, ressalta-se a ausência dos

parâmetros da rotação (S) e velocidade de avanço (F), visto que são constantemente alterados ao longo da usinagem pelo programa proposto. O acabamento foi realizado com um comprimento de balanço de 25 mm.

Tabela 2 - Parâmetros nominais de corte utilizados para o experimento

	Diâmetro da ferramenta	a_p	a_e	Estratégia	v_c	f_z
Unidade	mm	mm	mm	-	m/min	Mm/aresta/rot
Valor	6	0,5	0,15	Passes paralelos no sentido do fuso	80	0,1

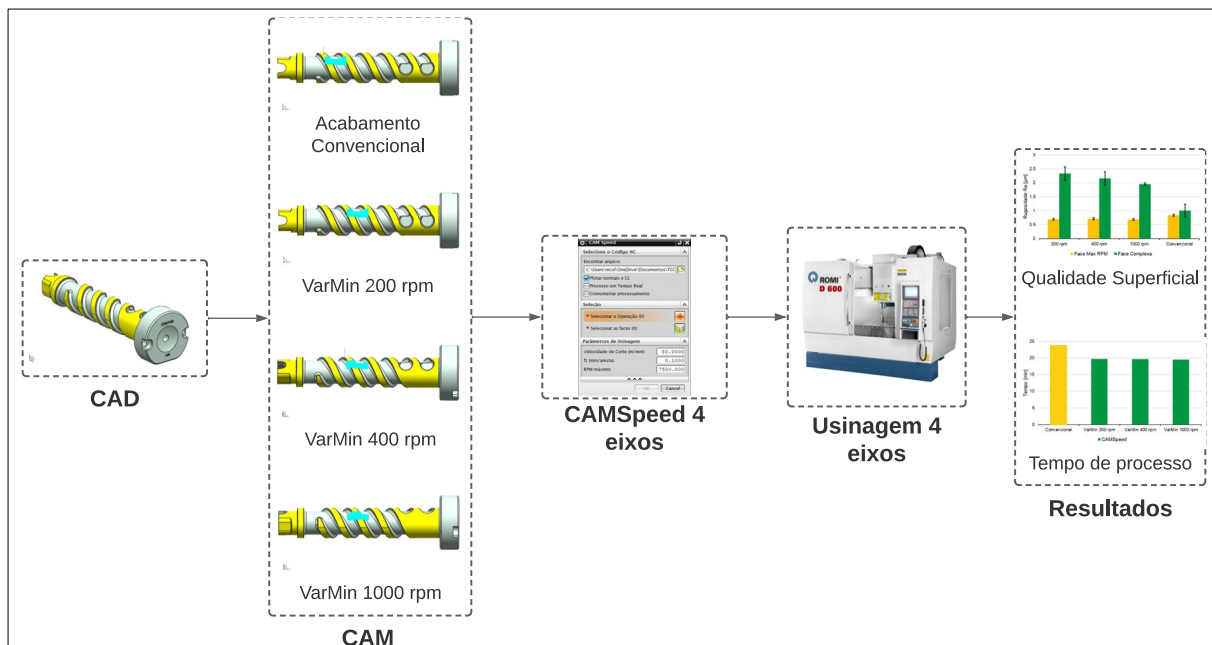
Por fim, o estudo será realizado com quatro usinagens comparativas variando o parâmetro de variação mínima para alteração da rotação (VarMin). Esta variável assumirá 3 valores além da usinagem convencional. Este parâmetro implica na mínima variação de rotação que deve existir entre uma linha e a próxima do código NC para que o valor seja utilizado no programa final. A Tabela 3 apresenta os valores estipulados a fim de estudar o impacto de uma graduação de variação na qualidade superficial e tempo total da geometria final.

Tabela 3 - Parâmetro de Variação Mínima para cada usinagem

	Convencional	Otimização 1	Otimização 2	Otimização 3
Parâmetro VarMin	-	200 rpm	400 rpm	1000 rpm

A fim de ilustrar o procedimento experimental adotado neste trabalho, o fluxograma é exibido na Figura 9.

Figura 9 - Planejamento da validação do programa proposto



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.3.1.4 Análise da rugosidade superficial

Para obtenção da análise da qualidade superficial da geometria, foi utilizado um rugosímetro portátil disponível no laboratório de metrologia da UFSC campus Joinville. Neste trabalho, a rugosidade foi analisada na superfície reta em que o CAMSpeed atingiu a máxima rotação suportada pela fresadora CNC e na região complexa para as 4 usinagens. Cinco medições de rugosidade foram realizadas conforme estipulado pela ABNT 4288:2008, com o curso do rugosímetro perpendicular ao avanço da ferramenta e comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 mm.

3.3.2 Equipamentos utilizados no experimento

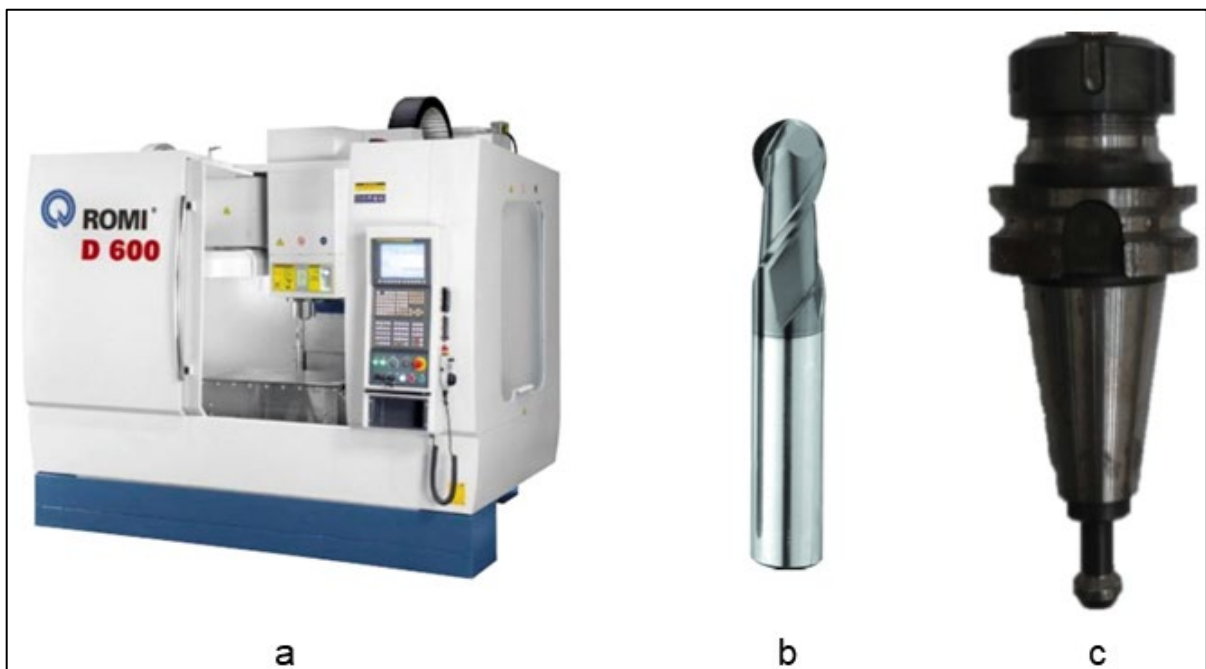
3.3.2.1 Centro de usinagem por fresamento e ferramentas

O experimento proposto foi realizado em um centro de usinagem por fresamento vertical ROMI D600 com comando numérico FANUC 0i-MC. Esta CNC possui capacidade de deslocamento máximo de 600x530x580 mm nas direções X, Y e Z respectivamente. O eixo árvore principal dispõe de potência máxima de 15kW e rotação máxima de 7500 rpm, já o eixo árvore do quarto eixo (eixo A), possui rotação

máxima em usinagem simultânea de 800 rpm. Essa máquina está apresentada na figura 10a.

A ferramenta utilizada na usinagem foi uma fresa com cobertura de uma liga de nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) de 6,0 mm de diâmetro com 2 arestas de corte do modelo 2ENM da fabricante KC Ferramentas, Figura 10b. A ferramenta foi fixada utilizando pinça ER32, Figura 10c.

Figura 10 - (a) Centro de usinagem Romi D600 3 + 1 eixos; (b) fresa esférica 6mm; (c) Porta-pinça com ER32



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.3.2.2 Equipamento de medição de rugosidade

Para análise da rugosidade superficial da geometria pós acabamento, utilizou-se um rugosímetro portátil digital da fabricante Mitutoyo modelo Sufitest SJ-210. Este equipamento permite medições de rugosidade com resolução de $0,002 \mu\text{m}$ para parâmetros Ra, Rz, entre outros. Para análise gráfica e estatística dos resultados, uma planilha é criada para armazenar os dados da medição e exportada para tratamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção está dividida em avaliação da maturidade, desenvolvimento matemático e computacional e validação do programa proposto. Na primeira parte, expõe-se o uso da metodologia MRL para encontrar o nível de maturidade do CAMSpeed previamente a este trabalho. Na segunda parte, discute-se sobre o desenvolvimento matemático e computacional. Por fim, na terceira parte, é apresentada uma validação do programa desenvolvido e os resultados da aplicação, evidenciando a diferença entre o processo convencional de usinagem por fresamento.

4.1 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

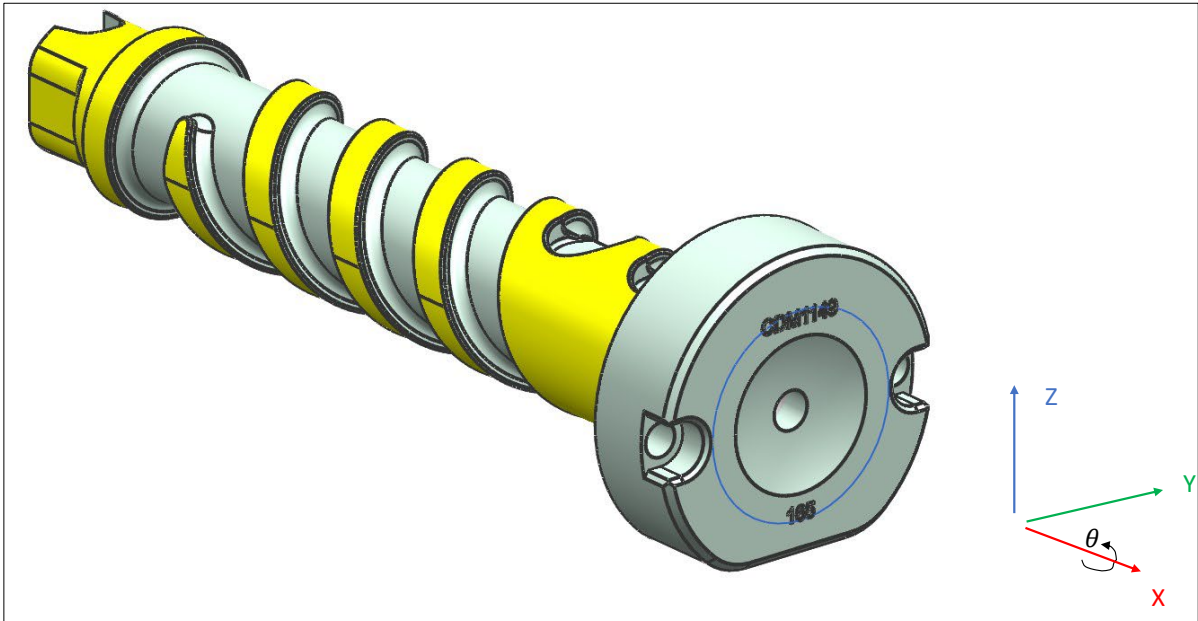
4.1.1 Desenvolvimento matemático

Inicialmente, necessita-se identificar e parametrizar o diâmetro efetivo da ferramenta ao longo da trajetória da usinagem. Como enunciado por Souza et al. (2014), o diâmetro efetivo varia de um valor mínimo até um máximo, no entanto, neste trabalho, será considerado o diâmetro calculado no ponto CC. Esse fato não foi considerado devido a maior complexidade de análise da direção de corte da ferramenta e o contato ferramenta-peça.

O programa para usinagem em 3 eixos proposto por Käsemodel (2019) resultou nas equações que regem o cálculo do diâmetro efetivo, Equação 2, rotação da ferramenta otimizada, Equação 5 e velocidade de avanço otimizada, Equação 6. A partir disso, constrói-se as equações que regem o cálculo das variáveis para uma usinagem em 4 eixos. Considerando que a ferramenta estará perpendicular ao eixo de rotação da usinagem, garante-se que o eixo z (ferramenta) estará 90° em relação ao eixo A ao longo da usinagem. Logo, as equações para o CAMSpeed 3 eixos podem ser utilizadas sofrendo uma rotação de plano de acordo com a rotação do eixo A.

Adotando os conceitos da geometria analítica e álgebra linear, atribui-se o ângulo theta ao eixo de rotação, correspondente ao 4° eixo da máquina CNC, neste caso, o eixo X. Com isso, forma-se a matriz de rotação de eixos em torno de X, dada pela Equação 7. A Figura 11 apresenta de maneira clara o sistema de eixos coordenados utilizados nesta validação.

Figura 11 - Sistema de eixos coordenados da usinagem



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

Em posse da matriz de rotação é possível rotacionar um ponto do sistema de coordenadas do programa NC, que aqui será intitulado (x',y',z') , para um novo sistema coordenado que será intitulado (x,y,z) . O ângulo de rotação θ será representado no programa NC pela letra A precedido pelo ângulo em graus. Por meio da rotação das coordenadas do programa NC, garante-se o cálculo do diâmetro efetivo com os eixos originais, logo, sustenta-se a modelagem matemática entre a fresa perpendicular à geometria.

A mudança de coordenadas do sistema (x',y',z') para (x,y,z) é realizada por meio do produto de matrizes apresentadas na Equação 8. Resolve-se o produto e por fim as equações 9, 10 e 11 para (x,y,z) são apresentadas.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$x = x' \quad (9)$$

$$y = z' \cdot (-\sin \theta) \quad (10)$$

$$z = z' \cdot \cos \theta \quad (11)$$

Tendo a definição das coordenadas do sistema original, é definida a equação que calcula o diâmetro efetivo neste estudo. Logo, a Equação 2 pode ser reescrita utilizando as coordenadas do sistema girante.

$$D_{ef} = D_{nominal} \times \sqrt{x'_{V_N}{}^2 + (z'_{V_N} \cdot (-\sin \theta))^2} \quad (12)$$

Substituindo a Equação 12 em 5 e 6,

$$n_{otimizada} = \frac{1000 \times v_c}{\pi \times D_{nominal} \times \sqrt{x'_{V_N}{}^2 + (z'_{V_N} \cdot (-\sin \theta))^2}} \quad (13)$$

$$F_{otimizada} = f_z \times na \times \frac{1000 \times v_c}{\pi \times D_{nominal} \times \sqrt{x'_{V_N}{}^2 + (z'_{V_N} \cdot (-\sin \theta))^2}} \quad (14)$$

A Equação 13 fornece a rotação necessária para manter a velocidade de corte no valor originalmente previsto pelo usuário, enquanto a Equação 14 garante por meio da velocidade de avanço que o avanço por aresta também será mantido no valor programado.

4.1.2 Desenvolvimento computacional – CAMSpeed 4 eixos

O programa proposto, CAMSpeed 4 eixos, foi desenvolvido em linguagem C# no ambiente integrado ao software NX para realizar uma otimização da rotação da ferramenta e velocidade de avanço visando o menor custo computacional. Para isso, altera-se o código do programa CNC gerado pelo próprio software CAM (Código G). A utilização do algoritmo atingiu a melhores resultados do tempo de usinagem e qualidade da superfície em regiões de máxima rotação da ferramenta para um centro de usinagem cuja rotação máxima do eixo árvore atinge 7500 rpm e 1000 rpm de rotação máxima do quarto eixo.

O software atuará de forma semelhante a lógica do CAMSpeed original, que altera o programa CNC adicionando ao final do bloco a rotação e a velocidade de avanço otimizadas. No entanto, a matemática para usinagem com quatro graus de liberdade foi desenvolvida, além de um novo código-fonte que possui um desempenho mais ágil ao código-fonte original, produzido em linguagem VBA no excel.

4.1.2.1 Obtenção dos vetores normais e otimização da velocidade de avanço

O cálculo apresentado na subseção anterior culminou nas equações 13 e 14 que são utilizadas na compensação da velocidade de corte. A principal variável das equações apresentadas é o vetor normal à superfície, logo, o primeiro núcleo de atuação do algoritmo será a obtenção desses vetores, enquanto o segundo, na otimização da velocidade de avanço e exportação do programa NC otimizado.

Neste primeiro núcleo, o algoritmo inicia a leitura linha a linha e criação dos pontos (CL) advindos do programa NC pós processado, obtendo as coordenadas (X,Y,Z e A) para cada ponto. Para análise lógica do programa, a linha atual será intitulada **n**. Para cada ponto CL atribuído pela linha **n**, encontra-se omnidirecionalmente o ponto mais próximo à uma superfície qualquer. Utiliza-se de um condicional dentro de uma iteração, a superfície é definida quando a distância entre CL e o ponto na superfície for menor ou igual a 0,5 mm. Este ponto, portanto, é o ponto CC.

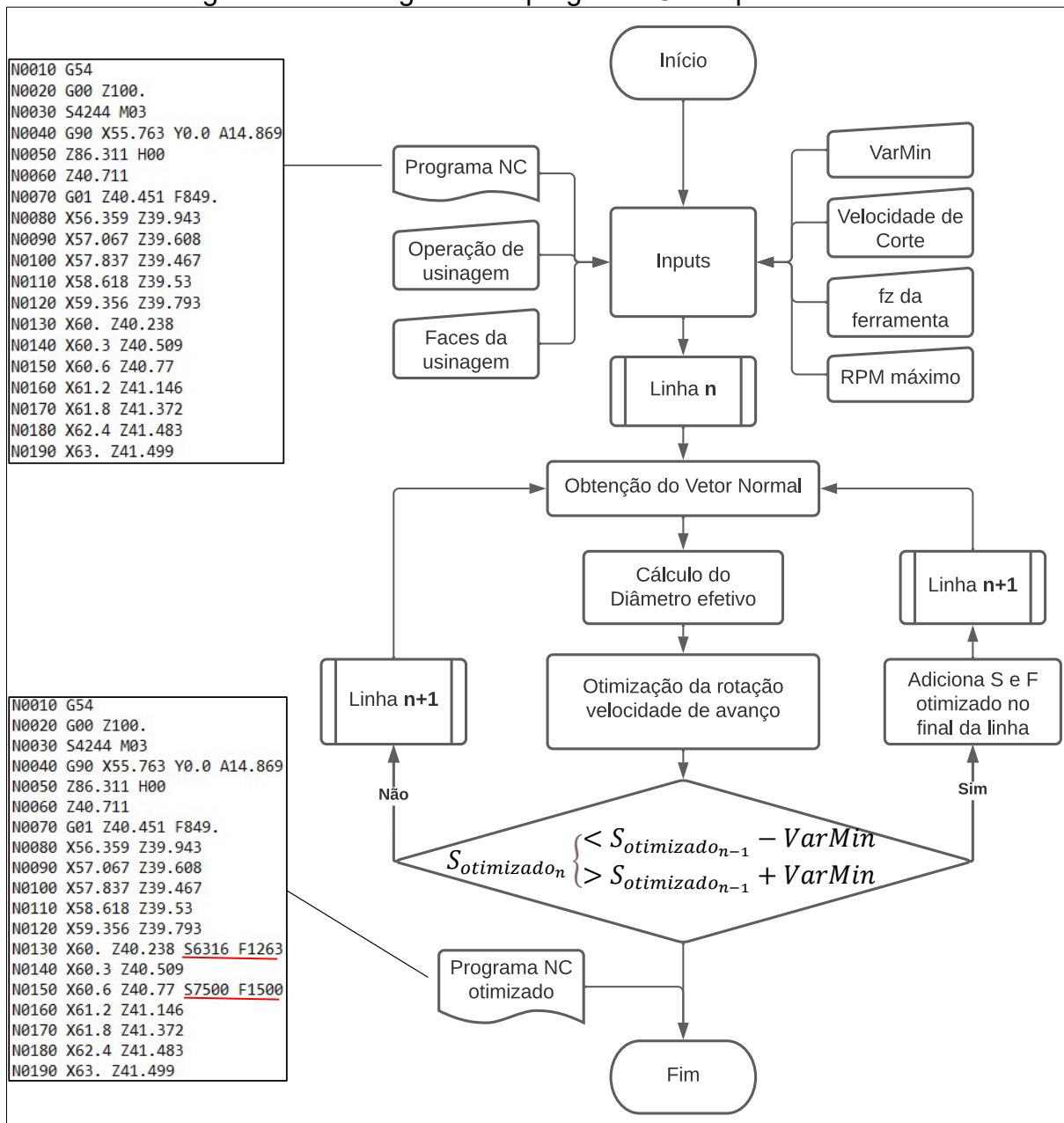
Assim, o vetor normal à superfície pode ser obtido com a superfície definida e condicionada ao ponto CC (base do vetor). Para isso, utiliza-se do método *AskFaceParm* em conjunto o *AskFaceProps* da classe *theUfSession* proveniente da biblioteca do próprio NXOpen. Esses métodos são utilizados de forma a realizar o cálculo das coordenadas do vetor normal unitário armazenadas em um vetor *double* unidimensional de três posições. Desta forma, calcula-se o diâmetro efetivo para cada ponto do programa NC a partir da fórmula 12, finalizando o primeiro núcleo.

Neste segundo núcleo, o diâmetro efetivo associado a cada ponto será utilizado para calcular a velocidade de avanço e rotação otimizados. Por meio do vetor *double* e do valor de diâmetro efetivo, utilizando as fórmulas 13 e 14, respectivamente, o algoritmo calcula a rotação e velocidade de avanço para a linha **n**. Por fim, avalia-se o valor das variáveis otimizadas da linha **n-1**. Caso os valores de **n** somados ou subtraídos do valor de VarMin sejam maiores ou menores que os valores de **n-1**, o

programa adicionará os valores na linha n . Caso contrário, o programa passa para a linha $n+1$. Aqui, vale ressaltar a rotação máxima atingida pela máquina CNC. Caso a rotação calculada supere a rotação máxima, o algoritmo associará a rotação máxima para aquele ponto.

Este procedimento é repetido até a última linha do programa NC. Ao identificar o final do ciclo, o algoritmo exporta um arquivo em formato de texto com o programa NC otimizado. A Figura 12 apresenta o fluxograma simplificado do programa CAMSpeed 4 eixos.

Figura 12 – Fluxograma do programa CAMSpeed 4 eixos

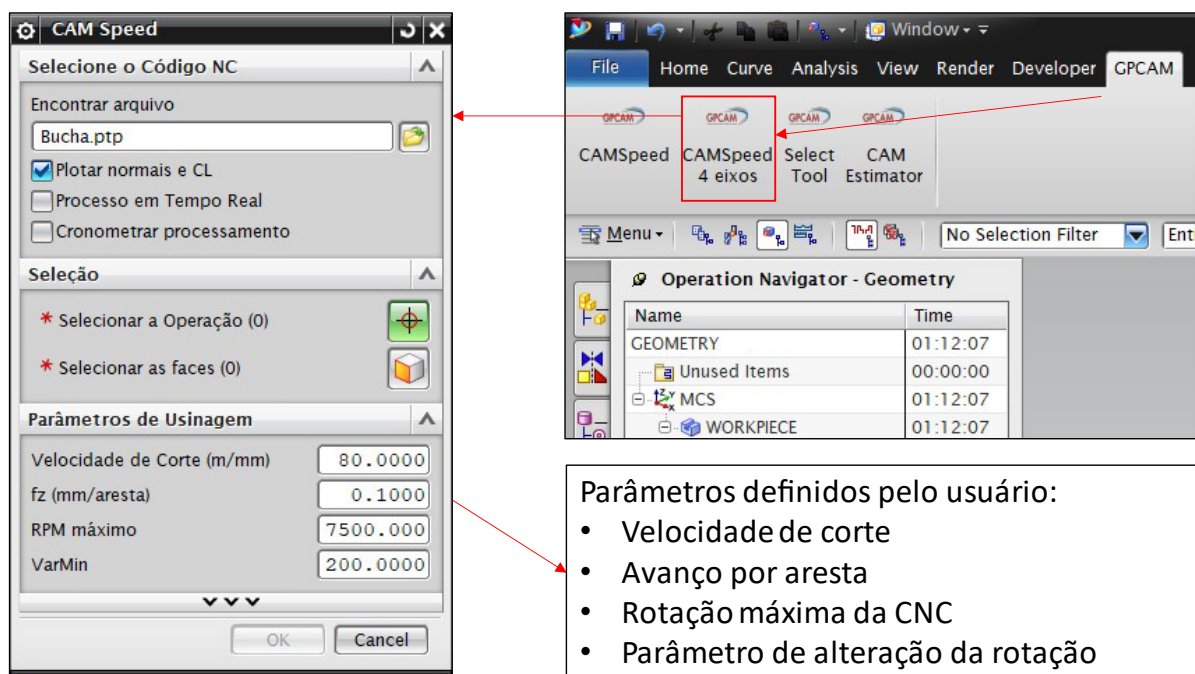


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

4.1.2.2 Interface do programa e saídas

Para melhor entendimento do funcionamento do programa, apresenta-se na Figura 13 a interface do programa CAMSpeed. Ao iniciar, o usuário deve definir as entradas físicas do programa: o programa NC pós-processado, a operação de usinagem e as faces de usinagem no software NX. Além disso, os parâmetros teóricos também são definidos no menu do CAMSpeed: velocidade de corte, f_z da ferramenta, rpm máximo da máquina ferramenta e o parâmetro VarMin.

Figura 13 - Interface do programa CAMSpeed 4 eixos



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Ao observar a Figura 13, é possível compreender a facilidade de uso do programa proposto, com uma interface amigável e clara, não necessitando de um treinamento técnico para utilização.

4.2 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA PROPOSTO

Segundo Seguy et al. (2010) e Käsemöller (2019), não há redução do tempo de vida de componentes da CNC devido à variação contínua da rotação do eixo-

árvore. Assim, garante-se que o programa proposto não danifica a máquina ferramenta.

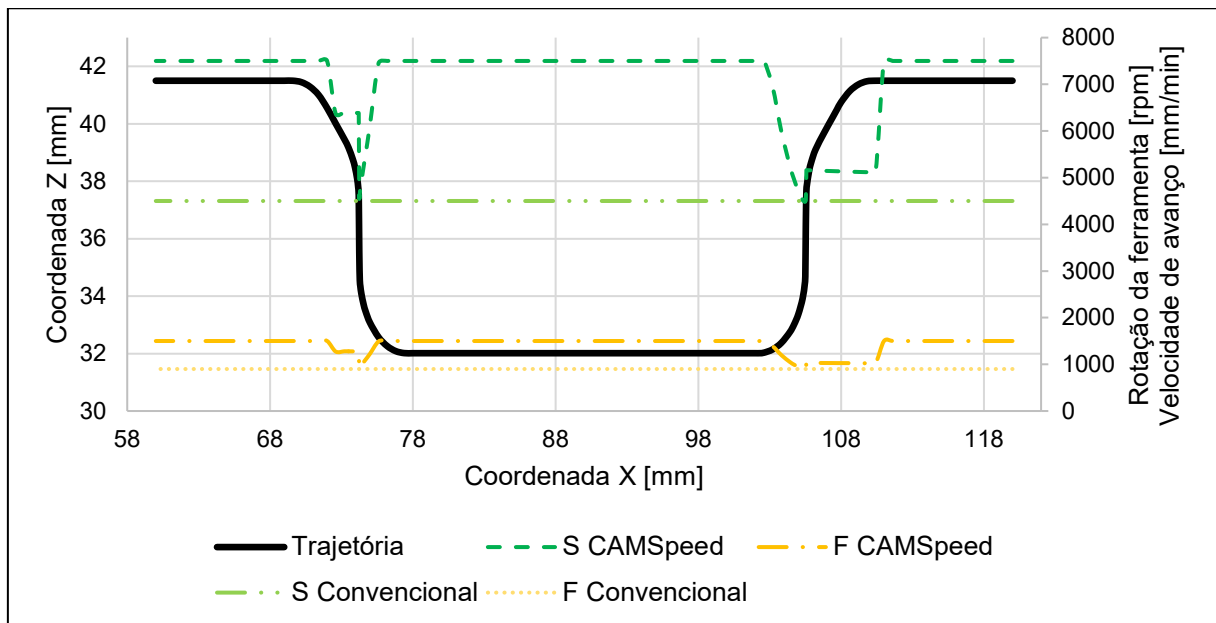
O programa proposto foi avaliado em três pontos: desempenho do programa, tempo de usinagem e qualidade da superfície final usinada. Nas subseções a seguir, discute-se cada aspecto avaliado e o resultado obtido.

4.2.1 Avaliação do programa gerado

A fim de validar o programa proposto e as modificações realizadas, precisa-se avaliar a rotação e a velocidade de avanço tanto para o programa convencional como o proposto. O programa original mantém o avanço e a rotação constantes calculados com base no diâmetro nominal da ferramenta. Já o programa proposto calcula a rotação com base no diâmetro efetivo de corte e o avanço com base nesta rotação. Desta forma, o diâmetro efetivo será sempre menor ou igual ao diâmetro nominal.

A Figura 14 representa os resultados de avanço e rotação propostos para uma usinagem teórica com VarMin nula. Desta forma, não houve intervenção do autor para limitar a alteração das velocidades. Além disso, a figura apresenta a trajetória do perfil usinado da geometria da bucha que será utilizado para análise de cada teste de VarMin proposto. Além da trajetória, o avanço (F) e a velocidade de rotação (S) da ferramenta para o programa convencional e proposto são plotados ao longo da trajetória.

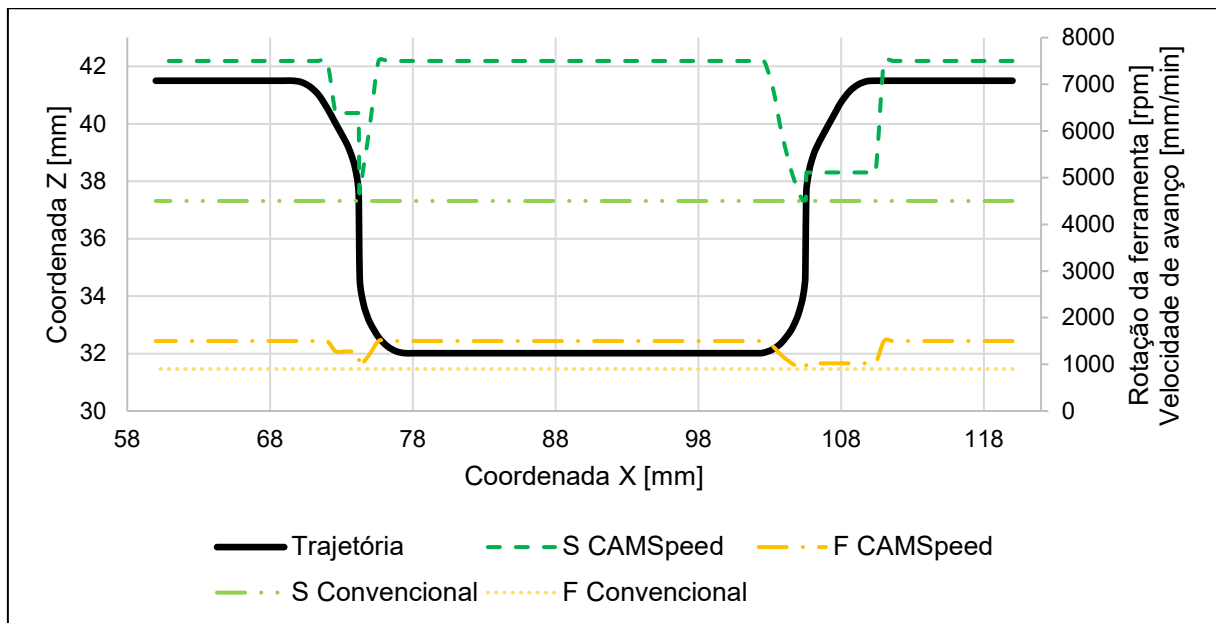
Figura 14 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação teórica para o programa NC convencional e proposto (VarMin nula)



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Observando o gráfico da Figura 14, verifica-se que a velocidade de avanço e rotação da ferramenta do programa proposto é igualado apenas em duas regiões, obtendo melhor desempenho nas regiões restantes. Assim, a rotação varia do valor mínimo de 4500 rpm (utilizado integralmente pelo programa convencional) ao máximo suportado pela CNC de 7500 rpm. A Figura 15 apresenta as mesmas variáveis para a usinagem com VarMin 200 rpm. Nesta figura, pode-se observar, mais uma vez, que a velocidade de avanço e rotação do programa proposto é igualado apenas em duas regiões. Este fato está presente em duas usinagens utilizando o programa proposto.

Figura 15 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação para o programa NC convencional e proposto (VarMin 200 rpm)



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Nota-se que o valor para rotação e avanço proposto pelo CAMSpeed com este valor de VarMin não alterou de maneira perceptível em relação à VarMin nula. No entanto, nas regiões onde o CAMSpeed atuou aumentando a velocidade de avanço, alcançou-se 67% de ganho em relação ao programa convencional, elevando de 902 mm/min para 1500 mm/min. Este fato implicará na redução de tempo total de usinagem.

As Figuras 16 e 17 mostram o comportamento da velocidade de avanço e rotação para VarMin em 400 e 1000 rpm. Para VarMin em 400 rpm, observa-se na região complexa côncava descendente e ascendente da trajetória uma leve diferença dos valores apresentados na Figura 15. Isso ocorre devido a variável VarMin reduzir o número de intervenções no programa proposto. Da mesma forma, para VarMin em 1000 rpm, a velocidade de avanço calculada pelo CAMSpeed superou o valor do programa convencional até mesmo nas regiões complexas do fuso. Essa oscilação não chega a ser um problema, uma vez que os valores variam aproximadamente 120 mm/min, correspondendo a 13% do valor nominal.

Figura 16 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação para o programa NC convencional e proposto (VarMin 400 rpm)

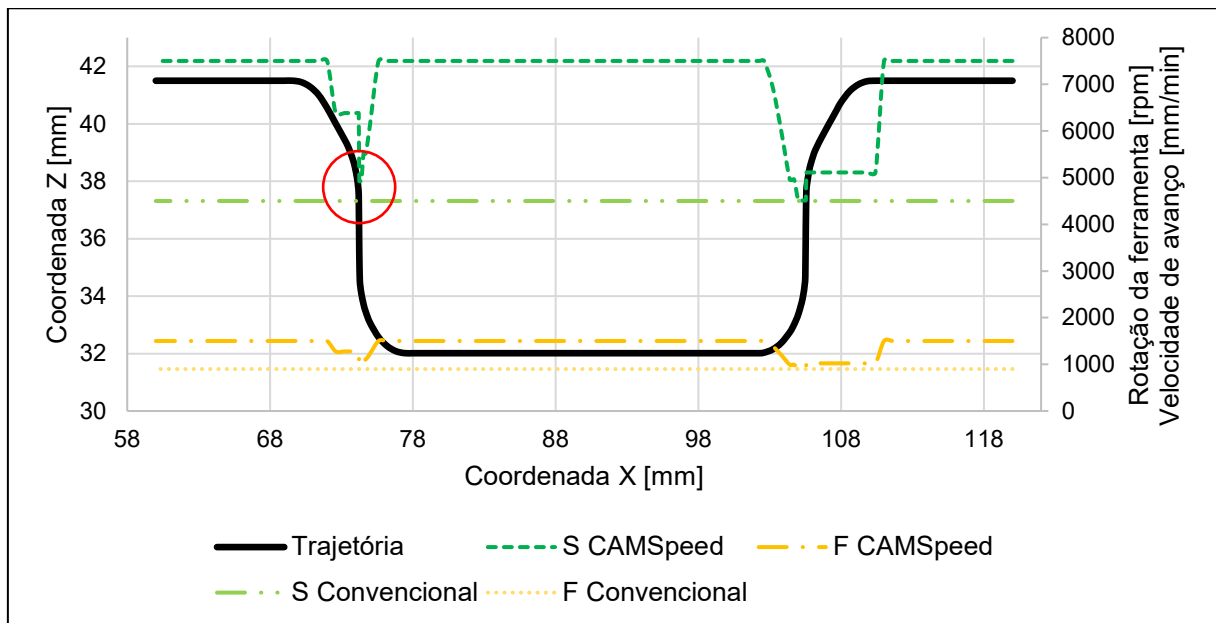
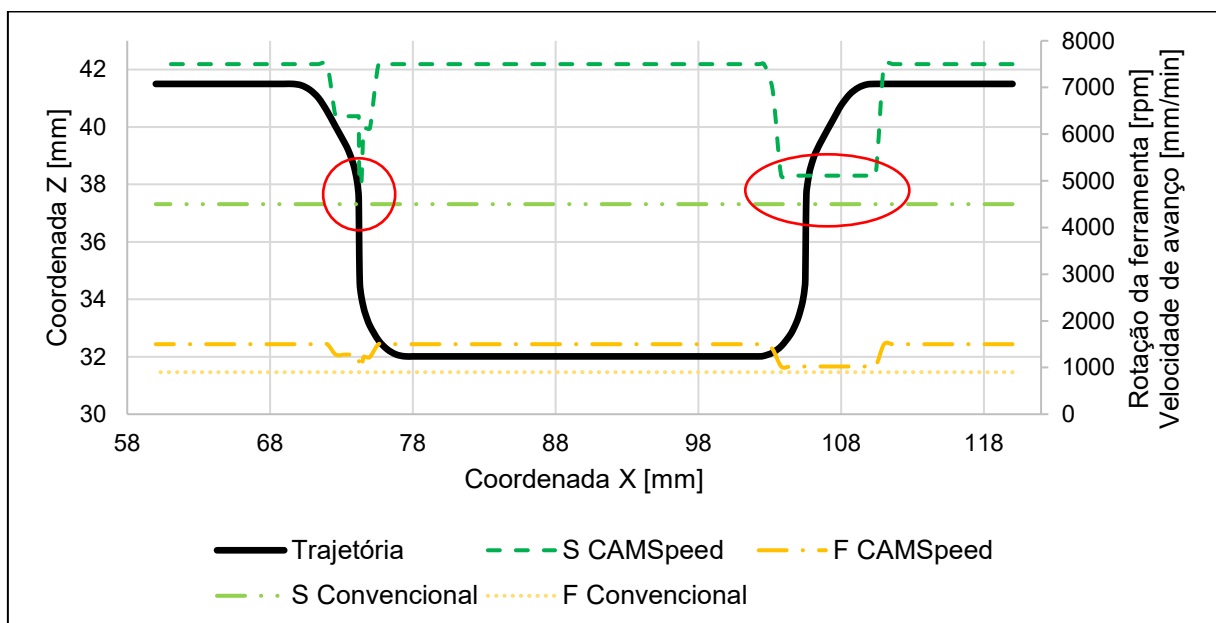


Figura 17 - Trajetória da ferramenta em conjunto à velocidade de avanço e rotação para o programa NC convencional e proposto (VarMin 1000 rpm)



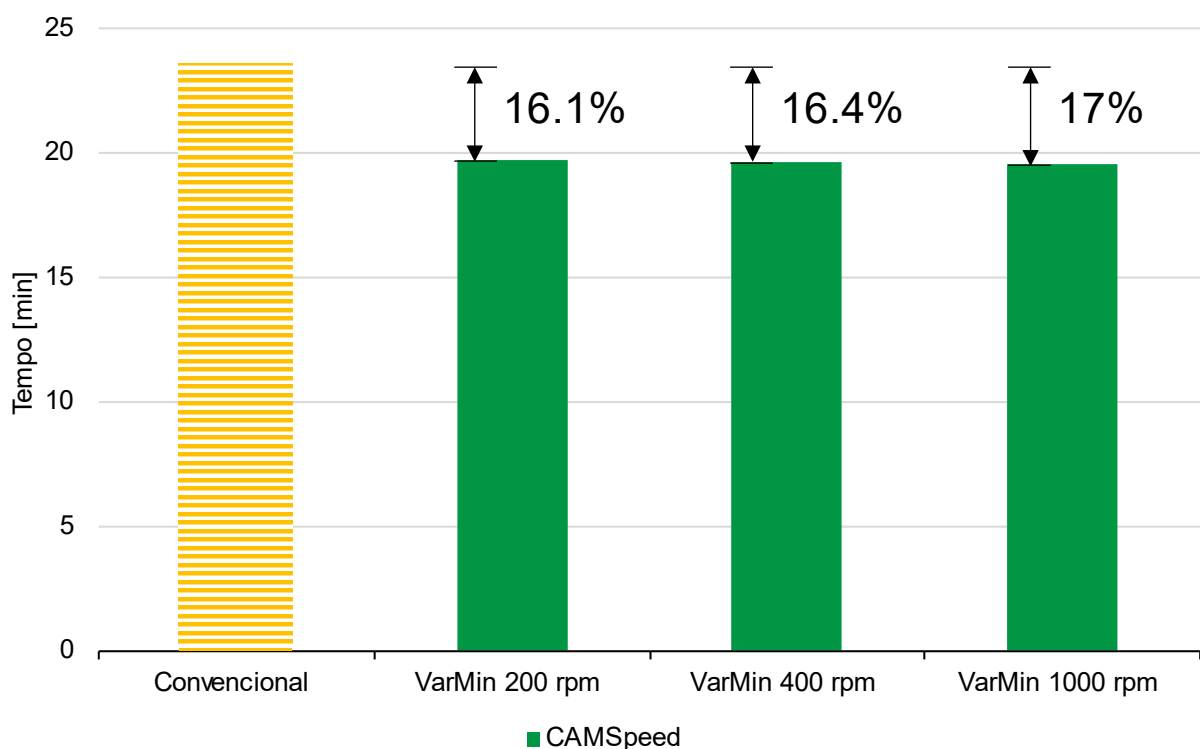
Para o programa proposto, independentemente do valor para VarMin, obteve-se um aumento de 67% da velocidade de avanço nas regiões onde o centro da ferramenta está em contato com a peça. Já para regiões complexas da geometria do

fuso, apresentaram variação na velocidade de avanço conforme o diâmetro efetivo local, proporcionando um ganho entre zero e 67% para VarMin 200 e 400 rpm. Para VarMin 1000 rpm, o ganho foi entre 11,7% e 67% em relação a usinagem convencional.

4.2.2 Tempo de usinagem dos programas

Para este subitem, o tempo de execução do processo de acabamento foi extraído da tela do centro de comando numérico da máquina CNC utilizada para o experimento. A Figura 18 apresenta os tempos do processo e a diferença percentual entre o programa convencional e os programas propostos pelo CAMSpeed 4 eixos.

Figura 18 - Tempo de execução dos programas CAMSpeed e convencional



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O programa convencional, como esperado, superou o tempo de usinagem em comparação aos programas propostos. Neste caso, os programas gerados pelo CAMSpeed 4 eixos foram executados de 16% a 17% em um período menor. A redução do tempo é resultado do aumento da velocidade de avanço da ferramenta. O resultado obtido ilustra que mesmo para uma rotação máxima de 7500 rpm, houve

significativa redução. Máquinas CNC mais modernas do parque fabril brasileiro atingem até 21000 rpm, o que acarretaria ganhos mais notáveis.

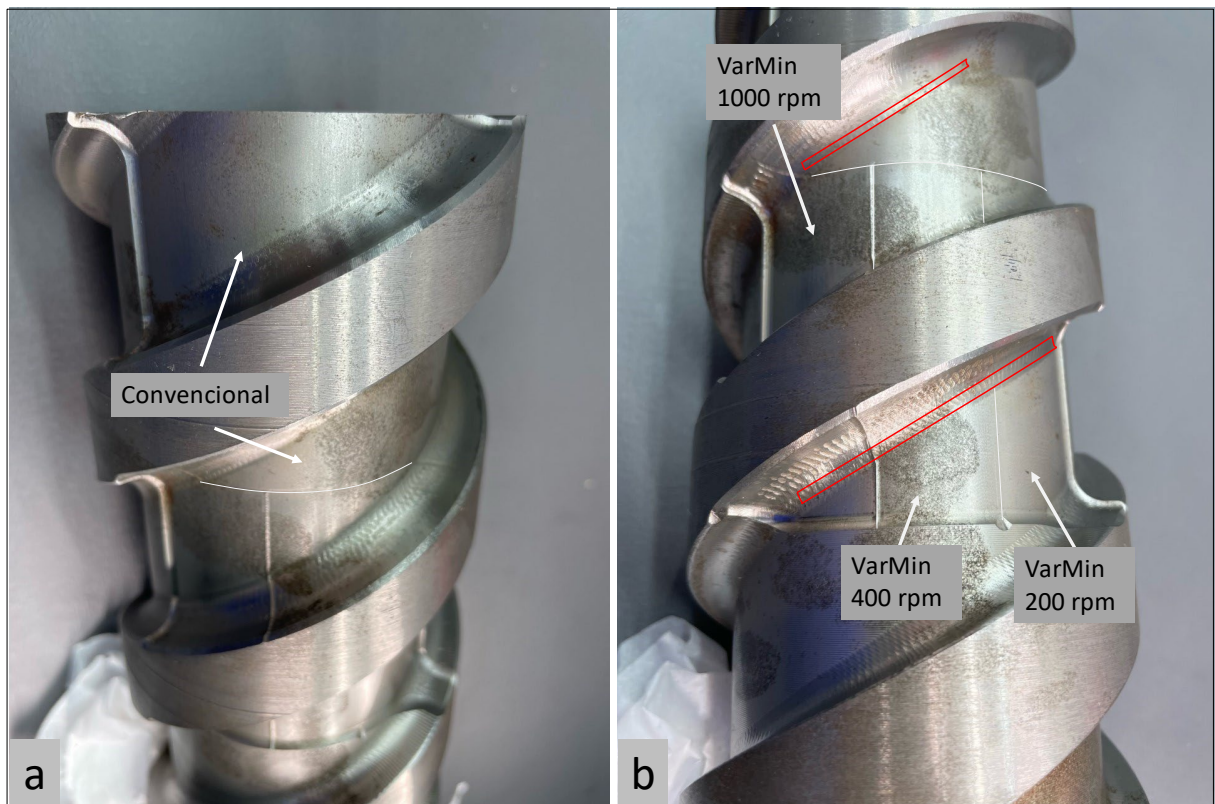
Nota-se que alterando o parâmetro de mínima variação não obteve impacto no tempo de processo neste experimento. Este fato ocorre devido à geometria possuir uma superfície harmônica, assim, o avanço é reduzido apenas na região complexa do fuso. Logo, a parcela do tempo total de usinagem para esta região é pouco impactante.

4.2.3 Avaliação da qualidade superficial

Nesta subseção serão discutidos os resultados obtidos por meio da análise de rugosidade e qualidade superficial na geometria final.

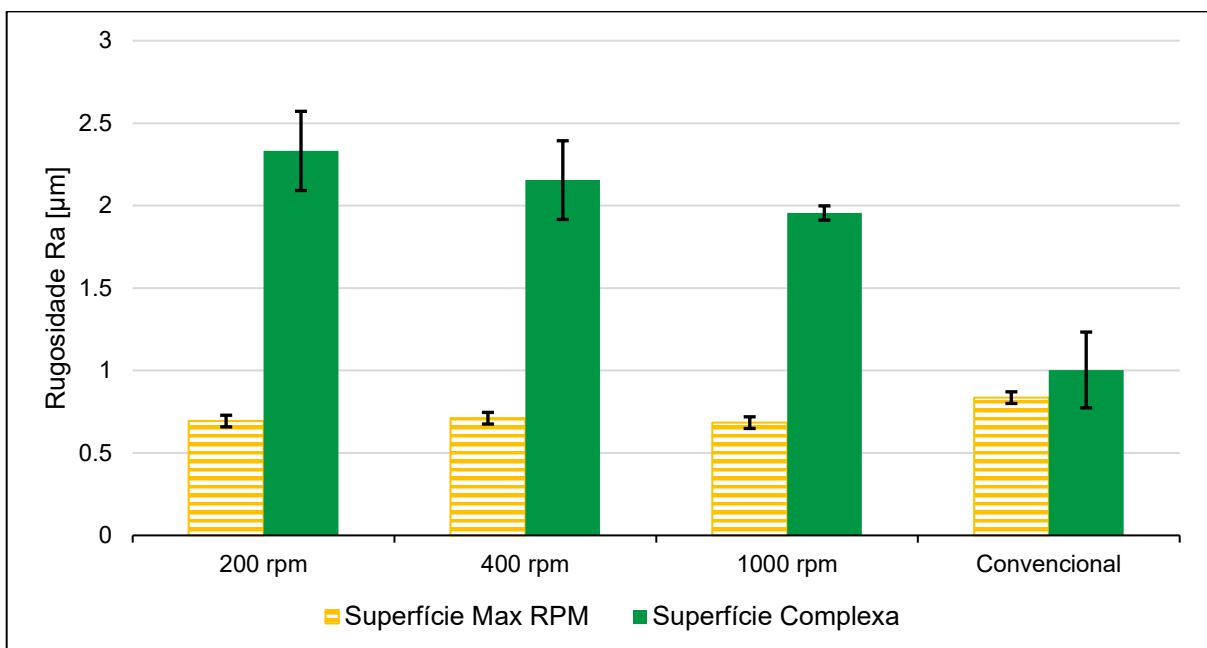
A rugosidade da região complexa da geometria foi analisada na superfície côncava do fuso para garantir homogeneidade nas quatro usinagens. A Figura 19 apresenta a geometria usinada da bucha, destacando as regiões para cada programa NC. Além disso, destaca-se na figura a região complexa do fuso, onde a rugosidade foi analisada pelo rugosímetro portátil. O perfil de rugosidade R_a para a região na qual o centro da ferramenta estava em contato com a superfície, portanto, onde o CAMSpeed calculou a velocidade máxima de avanço e a região complexa é apresentado na Figura 20 com base em 6 medições em cada região.

Figura 19 - Geometria usinada: (a) Região do programa convencional, (b) Região do programa proposto



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

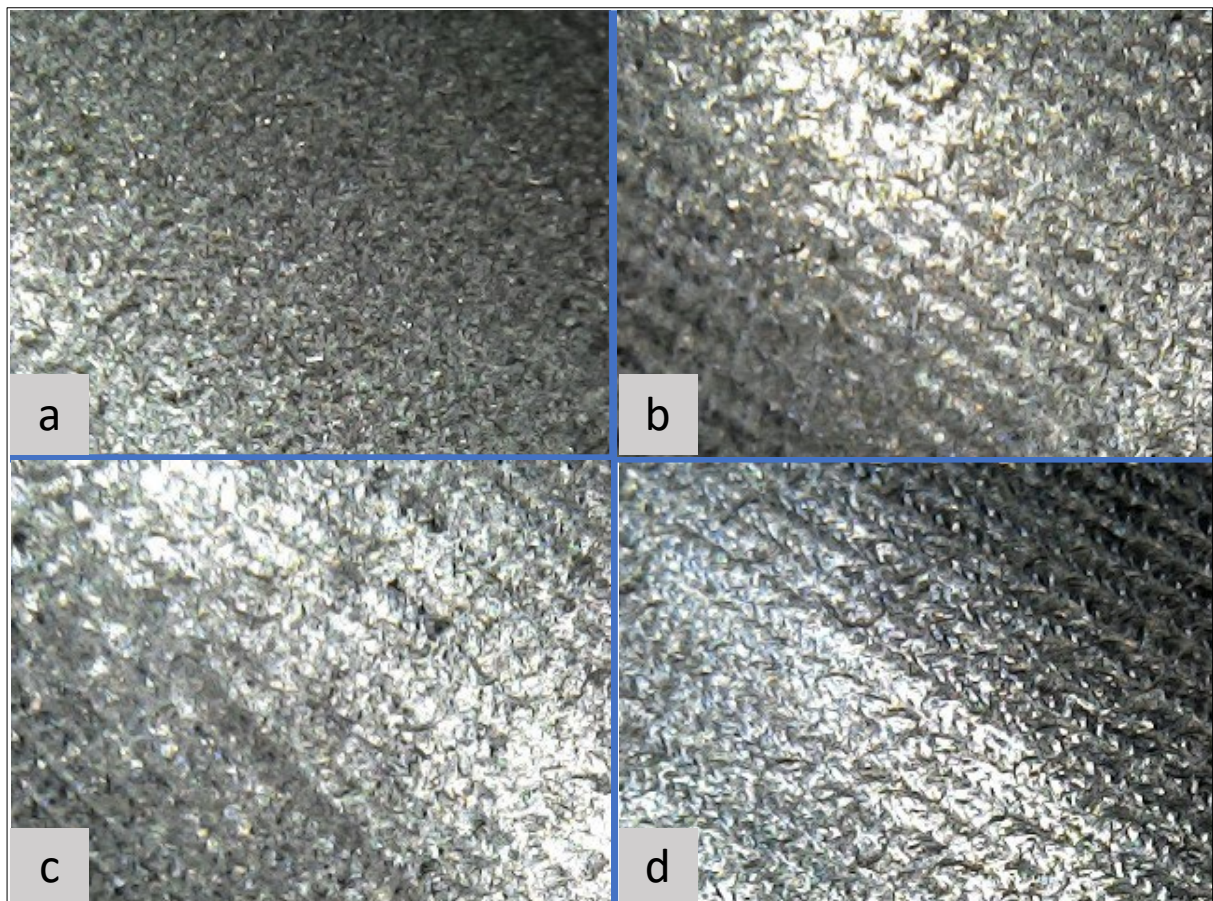
Figura 20 - Rugosidade R_a da geometria final usinada



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A partir da figura, é possível observar que houve uma redução significativa na região cuja rotação alcançou o máximo suportado pela máquina ferramenta. Esta redução média entre as usinagens com o programa proposto de 17% também foi observada por Souza et al. (2014) quando o centro da ferramenta está participando do corte, é esperado uma melhoria na qualidade da superfície ao aumentar a velocidade de avanço. A Figura 21 apresenta uma imagem por microscópio ótico portátil da região de máximo RPM atingido.

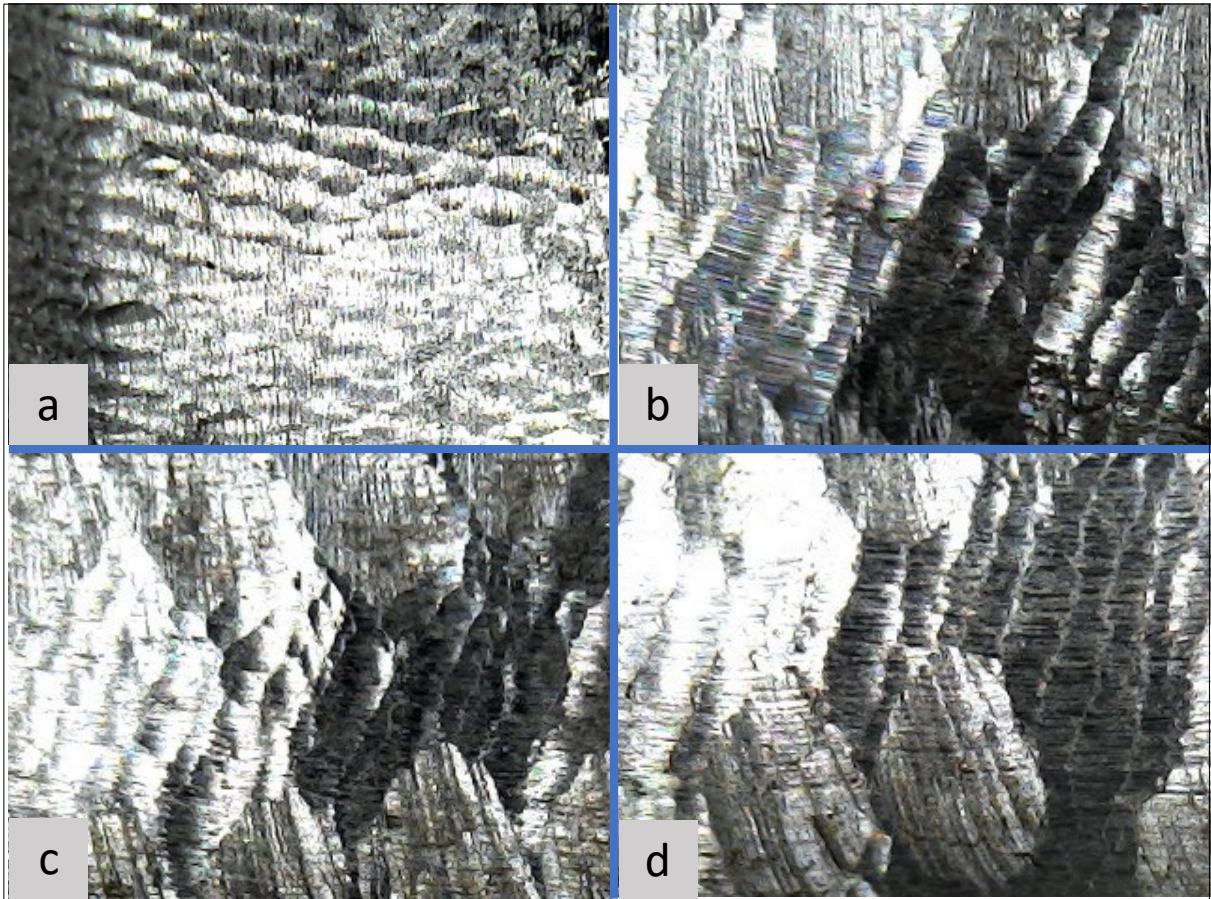
Figura 21 - Imagem com ampliação de 300x da região de rpm máximo: (a) Programa convencional, (b) Programa proposto VarMin 200 rpm, (c) Programa proposto VarMin 400 rpm, (d) Programa proposto VarMin 1000 rpm



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Já para a superfície complexa, não houve ganhos em relação ao programa convencional. Este fato ocorre devido as oscilações bruscas de avanço na região, dessa forma, a ferramenta deforma a superfície a cada variação da velocidade. Essa deformação fica evidente na Figura 22 retirada do microscópio.

Figura 22 - Imagem com ampliação de 300x da região complexa do fuso: (a) Programa convencional, (b) Programa proposto VarMin 200 rpm, (c) Programa proposto VarMin 400 rpm, (d) Programa proposto VarMin 1000 rpm



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Após análise gráfica, percebe-se que a rugosidade na região reta, onde o CAMSpeed alcançou máximo rpm disponível houve uma redução da deformação plástica causada pela ferramenta, aumentando a qualidade da superfície. Já para a região complexa do fuso, as marcas da ferramenta causadas pela constante variação abrupta da ferramenta aumentaram a rugosidade superficial local nas três usinagens com o programa proposto. O valor médio da rugosidade da região complexa foi reduzido com o aumento do valor de VarMin.

4.3 AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DO PROGRAMA PROPOSTO

Por fim, pretende-se avaliar o progresso de maturidade do programa proposto por meio do método estipulado pelo departamento de defesa dos Estados Unidos.

Utilizou-se o Quadro 2 para avaliar o programa proposto e definir o MRL para antes e depois do desenvolvimento proposto por este trabalho. A Tabela 4 apresenta o resultado da avaliação realizada pelo autor.

Tabela 4 - Avaliação do MRL para o CAMSpeed e CAMSpeed 4 eixos.

Categoria de análise	CAMSpeed 3 eixos- Avaliação do MRL	Programa Proposto CAMSpeed 4 eixos - Avaliação do MRL
(1) Tecnologia e base industrial	5	8
(2) Design	3	8
(3) Custo e financiamento	Não se aplica	Não se aplica
(4) Materiais	3	8
(5) Capacidade e controle do processo	5	9
(6) Gerenciamento da qualidade	Não se aplica	Não se aplica
(7) Pessoal para fabricação	3	9
(8) Instalações	Não se aplica	Não se aplica
(9) Gerenciamento da manufatura	2	7
MRL do programa	3,5	8,2

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O detalhamento das definições para cada índice MRL atribuído aos tópicos avaliados está apresentado no Apêndice A – Avaliação do MRL para os estágios do programa proposto. Aqui, destaca-se o ranqueamento para a categoria Materiais e Gerenciamento da manufatura. Para a primeira, o programa proposto reduziu a necessidade de softwares auxiliando o algoritmo, além de apresentar um menu amigável dentro do software CAM. Já para o segundo, destaca-se o levantamento de riscos realizados para o programa proposto. O principal objetivo para as próximas etapas de desenvolvimento é analisar o aquecimento do fuso e mitigar possíveis problemas com o tempo de vida.

Por meio da análise da média das atribuições ao programa proposto, observa-se que o MRL advindo do CAMSpeed 3 eixos estava localizado entre 3 e 4. Dessa

forma, o programa se encontrava na transição de prova de conceito de manufatura para capacidade desenvolvida de reproduzir o objetivo do programa em laboratório. Já para o programa proposto neste trabalho, ficou evidente o desenvolvimento da maturidade do software, demonstrando capacidade de atuação em uma linha piloto e pronto para inserção em uma produção de baixa escala industrial.

Em parceria com a empresa PerfilPolimer, este trabalho contribuiu para o desenvolvimento da hélice tríplice, demonstrando o aperfeiçoamento que um software desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina por meio de pesquisas de extensão pode exercer na indústria de moldes e matrizes.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema computacional atrelado ao software CAD/CAM high-end Siemens NX a fim de calcular a velocidade de rotação e avanço mantendo a velocidade de corte e avanço por aresta constante. Para isso, o programa proposto identifica o diâmetro efetivo no ponto de contato (CC) de uma ferramenta de ponta esférica ao longo de uma trajetória complexa. Este programa foi avaliado e apresenta as principais conclusões:

- O algoritmo é capaz de identificar a dinâmica entre ferramenta-superfície ao longo de uma trajetória qualquer, corrigindo a rotação e velocidade de avanço de forma a manter o mais constante possível a velocidade de corte e avanço por aresta.
- Dentre as usinagens com o programa proposto, quanto menor o valor do parâmetro VarMin, maior é a correção realizada pelo algoritmo, mantendo a velocidade de avanço igual ou superior ao programa convencional. Para VarMin elevado, pode-se atingir velocidades incoerentes, reduzindo a vida da ferramenta.
- Como resultado da otimização da velocidade de avanço, obteve-se um ganho de 16 a 17% no tempo de usinagem com relação ao programa convencional.
- Com base na análise da qualidade da superfície, observou-se uma redução na rugosidade da superfície em que o CAMSpeed alcançou a máxima velocidade de avanço. Essa redução foi em média de 17% em relação ao programa convencional. Para a região complexa do fuso, percebeu-se que a variação da rotação foi abrupta, aumentando a rugosidade local da geometria.
- O programa apresentou uma validação que se equiparou a um ambiente fabril, aumentando o nível de MRL para 8, possibilitando a utilização em ambiente relevante.

A fim de continuar o estudo e o desenvolvimento deste trabalho, sugere-se os seguintes estudos futuros:

- Investigar o impacto da alteração da rotação na vida do eixo-árvore da máquina ferramenta.
- Desenvolver uma análise para implementar uma melhor variação da velocidade de avanço em trechos complexos onde a velocidade será alterada de forma abrupta. Visando reduzir as marcas da ferramenta na geometria final.
- Estender o estudo da matemática para uma usinagem de geometria complexa em cinco eixos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288**. Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- BENELI, D.; CARVALHO, S.; FURTADO, A. Indicador composto estadual de inovação (ICEI): uma metodologia para avaliação de sistemas regionais de inovação. **Scielo Brasil**. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6351/6982>. Acesso em: 20 maio 2022.
- CAMARGO, L. **Fresamento de formas complexas com ajuste dinâmico da rotação e da velocidade de avanço**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.
- CATARINO, L. C. **Abordagem dos modelos TRL, MRL e CMMI-DEV aplicada ao desenvolvimento de pequenos e médios fornecedores da cadeia produtiva espacial**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Logística) – Instituto Nacional de Pesquisas Aeroespaciais, 2014.
- CHOI, B. K.; JERARD, R. B. Sculptured surface machining: **theory and applications**. First ed. The Netherlands: Fluwer Academic Publishers, 1998.
- CREELMAN, B.; FRIVOLD, C.; SIERRA, J.; SAXON, G; JARRAHIAN, C. Manufacturing readiness assessment for evaluation of the microneedle industry: an exploration of barriers to full-scale manufacturing. **Drug Delivery and Translational Research**. v.12, p. 368-375, 2021.
- KÄSEMODEL, R.B. **Desenvolvimento de um sistema computacional para otimização do fresamento de formas complexas através da velocidade de corte e velocidade de avanço**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.
- KÄSEMODEL, R. B.; DE SOUZA, A. F.; VOIGT, R.; BASSO, I.; RODRIGUES, A. R. CAD/CAM interfaced algorithm reduces cutting force, roughness, and machining time in free-form milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, p.1883-1900, 2020.
- MANKINS, J. C. Technology readiness levels. **NASA**, 1995.
- MATEI, A. P. et al. Avaliação da qualidade demandada e diretrizes de melhoria no processo de interação universidade-empresa. **Produção**. Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 27-42, jan./fev. 2012.
- NASA. **Technology readiness level**. United States of America, 2021. Disponível em: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level. Acesso em: 20 maio 2022.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **University-industry collaboration: new evidence and policy options**. Paris: OECD Publishing, 2019.

OSD MANUFACTURING TECHNOLOGY PROGRAM. **Manufacturing readiness level (MRL) Deskbook**. Departamento de Defesa dos Estados Unidos, 2011. Disponível em: http://www.dodmrl.com/MRL_Deskbook_2018.pdf. Acesso em: 20 maio 2022.

SADIN, S. R.; POVINELLI, F. P.; ROSEN, R. The NASA technology push towards future space mission systems. **Acta Astronautica**, v. 20, p. 73-77, 1989.

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.

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

SOUZA, A. F.; 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, 2014.

SOUZA, A. F.; SEVERINO, N.; KÄSEMODEL, R. B.; MARIN, F. Novo aplicativo reduz mais de 25% no fresamento de moldes e matrizes parametrizando a rotação (S) e a velocidade de avanço (F). **Revista Ferramental**, Joinville, v. 86, p. 20-23, jul./ago. 2021.

APÊNDICE A – Avaliação do MRL para os estágios do programa proposto

Correspondência MRL – justificativa para classificação da maturidade, adaptado de Manufacturing readiness level (MRL) deskbook (2018).

(1) Tecnologia e base industrial: Desenvolvimento Tecnológico

	CAMSpeed 3 eixos- Avaliação do MRL	Programa Proposto	CAMSpeed 4 eixos - Avaliação do MRL
Valor	5		8
Justificativa	Tecnologia requerida desenvolvida e testada em laboratório		Tecnologia requerida desenvolvida e aprimorada em relação à maturidade anterior. Testada em ambiente relevante de usinagem piloto

(2) Design: Programa de produtividade:

	CAMSpeed 3 eixos- Avaliação do MRL	Programa Proposto	CAMSpeed 4 eixos - Avaliação do MRL
Valor	3		8
Justificativa	Inputs relevantes para o programa foram avaliados visando a experimentação laboratorial		Inputs relevantes foram desenvolvidos e aprimorados no software proposto. Validados em ambiente relevante de usinagem piloto

(4) Materiais: Maturidade:

	CAMSpeed 3 eixos- Avaliação do MRL	Programa Proposto	CAMSpeed 4 eixos - Avaliação do MRL
Valor	3		8
Justificativa	Matéria-prima e softwares de apoio foram validados por meio de experimento laboratorial		Materiais aplicados para utilização programa proposto foram validados. Reduziu-se a necessidade de softwares de apoio. Validação em ambiente relevante de usinagem piloto

(5) Capacidade e controle do processo: Modelagem e Simulação:

	CAMSpeed 3 eixos- Avaliação do MRL	Programa Proposto CAMSpeed 4 eixos - Avaliação do MRL
Valor	5	9
Justificativa	Primeira versão do programa desenvolvida e testada em ambiente laboratorial	Versão final do programa proposto desenvolvida, verificada em simulações e validade em ambiente relevante de usinagem piloto

(7) Pessoal para fabricação:

	CAMSpeed 3 eixos- Avaliação do MRL	Programa Proposto CAMSpeed 4 eixos - Avaliação do MRL
Valor	3	9
Justificativa	Programa com baixo nível de desenvolvimento na experiência do usuário	Programa proposto visando pouca ou nenhuma necessidade de treinamento pelo usuário, interface amigável e hospedado no software CAM

(9) Gerenciamento da manufatura: Planejamento de Manufatura e riscos

	CAMSpeed 3 eixos- Avaliação do MRL	Programa Proposto CAMSpeed 4 eixos - Avaliação do MRL
Valor	2	7
Justificativa	Programa desenvolvido e testado em ambiente laboratorial, sem riscos levantados.	Programa proposto testado em ambiente relevante de usinagem piloto e levantado riscos a serem mitigados nas próximas etapas do desenvolvimento

ANEXO A – Certificado de Registo 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 Registo 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, D5-03, 5M-04

Algoritmo Hash: SHA-256

Resumo Digital: E41ECFF972C4E3D808CAE38DE3A1E0379D76AE22EA2E3B413ABE99AAA4E405EC

Expedido em: 29 de maio de 2018

Aprovado por Julio Cesar Castelo Branco Reis Moreira

