

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

GUILHERME NORRI FERREIRA

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TORNEAMENTO PARA
MELHORIA DA ESTABILIDADE DO CHATTER BASEADA EM
DIAGRAMAS DE LÓBULOS**

SÃO CARLOS
2023

GUILHERME NORRI FERREIRA

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TORNEAMENTO PARA
MELHORIA DA ESTABILIDADE DO CHATTER BASEADA EM
DIAGRAMAS DE LÓBULOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Vitor de Carvalho Fontes

SÃO CARLOS
2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Wilson e Angela e a todos meus irmãos, por todo suporte e amor ao longo dessa jornada, sua fé em mim e nas minhas capacidades me permitiu conquistar esta graduação e tonou a caminhada muito mais leve e proveitosa.

Agradeço também a todos meus companheiros da 017 que foram minha segunda família nestes anos, principalmente ao Felipe Neves, Luan Marques, Lucas Ferreira, João Pedro Jesus, Rafael Bueno, Mateus Carpena e Rafael Scatena, pela força nos momentos desafiadores e pelas risadas nos bons momentos, vocês tornaram até as partes difíceis, algo superável.

Aos companheiros de todos os projeto de extensão, deixo meu mais sincero obrigado, me ajudaram muito a caminhar profissionalmente e todas minhas conquistas tem participação de vocês.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica, agradeço todo o conhecimento, suporte e tempo investido, espero poder levar para a frente a chama que acenderam dentro de mim e um dia devolver um pouco ao mundo..

Por último, agradeço ao professor João Vitor de Carvalho Fonte, não só pela orientação excepcional neste trabalho, mas também pela amizade que tornou possível e mais fácil este estudo. Obrigado por ser um mestre neste caminho e me ajudar a superar os desafios.

"Nenhum homem pode banhar-se duas vezes no mesmo rio, pois na segunda vez o rio já não é o mesmo, nem tão pouco o homem!"

(Heráclito de Éfeso)



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 1/2023/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

GUILHERME NORRI FERREIRA

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TORNEAMENTO PARA MELHORIA DA ESTABILIDADE DO CHATTER BASEADA EM DIAGRAMAS DE LÓBULOS

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 03 de fevereiro de 2023

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	João Vitor de Carvalho Fontes
Membro da Banca 1	Armando Ítalo Sette Antonialli
Membro da Banca 2	Sidney Bruce Shiki



Documento assinado eletronicamente por **João Vitor de Carvalho Fontes, Docente**, em 03/02/2023, às 17:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 03/02/2023, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Armando Ítalo Sette Antonialli, Docente**, em 03/02/2023, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0931727** e o código CRC **368AAF15**.

RESUMO

Os processos de usinagem dominam a indústria da manufatura, sendo vitais para a entrega de bens de consumo com confiabilidade e qualidade, porém alguns fenômenos autoexcitados como o *chatter* se mostram limitantes na entrega destes objetivos. Existem estudos que definem parâmetros de torneamento para obter estabilidades e instabilidades, uma das técnicas empregadas é o método do diagrama de lóbulos, que utiliza uma dependência entre a rotação do eixo-árvore e a profundidade de usinagem limite para gerar gráficos que explicitam o comportamento vibratório do sistema. Muitos autores propuseram diferentes metodologias e ferramentas buscando minimizar a ocorrência do *chatter*, seja desenvolvendo modelos dinâmicos complexos e analisando o efeito dos parâmetros de usinagem, seja testando ferramentas com diferentes materiais a fim de promover comportamentos vibratórios mais estáveis. Entretanto, muitas soluções prévias se mostraram complexas demais para serem de fato utilizadas ou até mesmo inefetivas, faltando assim, alguma abordagem mais direcionada. Este estudo tem como foco o desenvolvimento de uma modelagem dinâmica de um torneamento baseado em um corpo de prova de aço endurecido, gerando diagramas de lóbulos que servirão como base para o emprego de uma estratégia de otimização que seja capaz de identificar a estabilidade do processo, entregando uma análise de faixas ótimas de atuação. Os resultados obtidos revelaram a grande interferência do avanço na estabilidade e a necessidade de uma varredura de todas as combinações, uma vez que não há um perfil nítido que permita definir faixas consistentes de aplicação, mesmo com o emprego de diferentes ferramentas, além disso, as funções custos utilizadas não se mostraram suficientemente robustas para contemplar todos os critérios relevantes ao contexto de torneamento. Em suma o estudo se mostrou válido, prático e aplicável ao contexto de minimização do *chatter* e maximização da produtividade e qualidade.

Palavras-chave: Diagrama de Lóbulos de Estabilidade. *Chatter*. Parâmetros de usinagem. Funções custo.

ABSTRACT

Machining processes dominate the manufacturing industry, being vital for the delivery consumer goods with reliability and quality, but some self-excited phenomenon such as chatter are limiting in the delivery of these objectives. There are studies that define turning parameters to obtain stability and instabilities, one of the techniques employed is the lobe diagram method, which uses a dependence between the spindle rotation and the depth of cut limit to generate graphs that explain the vibration behavior of the system. Many authors have proposed different methodologies and tools seeking to minimize the occurrence of chatter, whether developing complex dynamic models and analyzing the effect of machining parameters, or testing tools with different materials in order to promote more stable vibration behavior. However, many previous solutions proved to be too complex to actually be used or even ineffective, thus lacking a more targeted approach. This study focuses on the development of a dynamic modeling of turning based on a carbide specimen, generating lobe diagrams that will serve as a basis for the use of an optimization strategy that is capable of identifying process stability, delivering an analysis of optimum performance ranges. The results obtained revealed the great interference of the feed in stability and the need for a sweep of all combinations, since there is no clear profile that allows defining consistent application ranges, even with the use of different tools, in addition, the The cost functions used did not prove to be sufficiently robust to contemplate all criteria relevant to the context of turning. In short, the study proved to be valid, practical and applicable to the context of minimizing chatter and maximizing productivity and quality.

Keywords: Stability Diagram Lobes. Chatter. Machining parameters. Cost functions

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resultados do <i>chatter</i> no processo de fresamento.	16
Figura 2 – Aplicação prática do diagrama de lóbulos	17
Figura 3 – Acabamento superficial de diferentes aplicação mediante ocorrência de <i>chatter</i>	20
Figura 4 – Organograma do desenvolvimento.	23
Figura 5 – Modelo de torno com três graus de liberdade.	24
Figura 6 – Ferramenta de torneamento genérica.	25
Figura 7 – Modelo de torno com seis graus de liberdade (direção do avanço).	25
Figura 8 – Modelo de torno com seis graus de liberdade (direção do corte).	26
Figura 9 – Diagrama de lóbulos para o conjunto de parâmetros arbitrário	34
Figura 10 – Diagrama de lóbulos com indicação do ponto de interesse para comparação visual	35
Figura 11 – Faixas reais adotadas para desenvolvimento da otimização	37
Figura 12 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (avanço fixo)	41
Figura 13 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (velocidade de corte fixa)	41
Figura 14 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (profundidade de usinagem fixa)	42
Figura 15 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (avanço fixo)	42
Figura 16 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (velocidade de corte fixa)	43
Figura 17 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (profundidade de usinagem fixa)	43
Figura 18 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (avanço fixo)	44
Figura 19 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (velocidade de corte fixa)	44
Figura 20 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (profundidade de usinagem fixa)	45
Figura 21 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (avanço fixo)	45
Figura 22 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (velocidade de corte fixa)	46
Figura 23 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (profundidade de usinagem fixa)	46
Figura 24 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (avanço fixo)	47
Figura 25 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (velocidade de corte fixa)	47

Figura 26 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (profundidade de usinagem fixa)	48
Figura 27 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (avanço fixo)	48
Figura 28 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (velocidade de corte fixa)	49
Figura 29 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (profundidade de usinagem fixa)	49
Figura 30 – Mapas de cor com avanço fixo - Ferramenta de acabamento 1	50
Figura 31 – Mapas de cor com avanço fixo - Ferramenta de acabamento 2	51
Figura 32 – Mapas de cor com avanço fixo - Ferramenta intermediária	52
Figura 33 – Mapas de cor com velocidade de corte fixa - Ferramenta de acabamento 2	53
Figura 34 – Mapas de cor com velocidade de corte fixa - Ferramenta de acabamento 2	54
Figura 35 – Mapas de cor com velocidade de corte fixa - Ferramenta intermediária	55
Figura 36 – Mapas de cor com profundidade de usinagem fixa - Ferramenta de acabamento 2	56
Figura 37 – Mapas de cor com profundidade de usinagem fixa - Ferramenta de acabamento 2	57
Figura 38 – Mapas de cor com profundidade de usinagem fixa - Ferramenta intermediária	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas para diferentes estruturas do torno.	24
Tabela 2 – Parâmetros retirados da bibliografia	31
Tabela 3 – Valores utilizados para gerar o primeiro diagrama de lóbulos	33
Tabela 4 – Faixa de valores imposta arbitrariamente para auxiliar na construção da otimização.	36
Tabela 5 – Dados das ferramentas utilizadas para simulação.	39
Tabela 6 – Melhor combinação de parâmetros para cada ferramenta.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DLE	Diagrama de lóbulos de estabilidade
SDL	Stability Diagram Lobes
CNC	Comando Numérico por Computador
GDL	Graus de Liberdade
RPM	Rotações Por Minuto
3D	Três Dimensões
2D	Duas Dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa
x	Deslocamento na direção x
\dot{x}	Velocidade na direção x (primeira derivada)
\ddot{x}	Aceleração na direção x (segunda derivada)
c	Constante de amortecimento
k	Constante de rigidez
F_x	Força na direção x
s	Variável do domínio de Laplace
σ	Parte real da variável s
m_i	Massa i
x_i	Deslocamento na direção x da massa i
\dot{x}_i	Velocidade na direção x da massa i (primeira derivada)
\ddot{x}_i	Aceleração na direção x da massa i (segunda derivada)
y_i	Deslocamento na direção y da massa i
\dot{y}_i	Velocidade na direção y da massa i (primeira derivada)
\ddot{y}_i	Aceleração na direção y da massa i (segunda derivada)
c_{ji}	Constante de amortecimento na direção j da massa i
k_{ji}	Constante de rigidez na direção j da massa i
G_{xx}	Função de transferência na direção x
G_{yy}	Função de transferência na direção y
F	Vetor de forças
ω_c	Frequência de vibração do sistema
a	Profundidade de usinagem
A	Matriz de coeficientes direcionais

ψ	Ângulo de saída da ferramenta
λ	Autovalor do sistema
a_{lim}	Profundidade de corte limite
κ	Razão do valor real e imaginário do autovalor
τ	Período
Q	Volume de material removido
Q_{min}	Mínimo valor possível de volume removido
h	Rugosidade máxima teórica
h_{max}	Máximo valor possível para a rugosidade teórica
P_1	Peso para o volume de material removido
P_2	Peso para a rugosidade máxima teórica
ϕ	Nota ponderada para a combinação

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	18
1.2 Estrutura do texto	18
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Modelagem dinâmica dos tornos	19
2.2 Estudo do <i>chatter</i>	20
2.3 Otimização	21
3 – DESENVOLVIMENTO	23
3.1 Introdução do capítulo	23
3.2 Modelagem	23
3.3 Construção do diagrama de lóbulos	31
3.4 Otimização	34
3.4.1 Interpretação matemática da estabilidade	34
3.4.2 Funções custo	36
3.4.3 Mapas de cor	38
4 – RESULTADOS	39
4.1 Validação	40
4.1.1 Ferramenta de acabamento 1 (TR-DC1308S01020F 7015)	41
4.1.2 Ferramenta de acabamento 2 (TCGW110202T01020F 7525)	44
4.1.3 Ferramenta intermediária (RCGW1204MUED 7014)	47
4.1.4 Considerações	49
4.2 Profundidade de corte <i>versus</i> Velocidade de corte	50
4.3 Profundidade de corte <i>versus</i> Avanço	53
4.4 Velocidade de corte <i>versus</i> Avanço	56
4.5 Considerações finais do capítulo	59
5 – CONCLUSÃO	60
5.1 Trabalhos futuros	61
REFERÊNCIAS	62

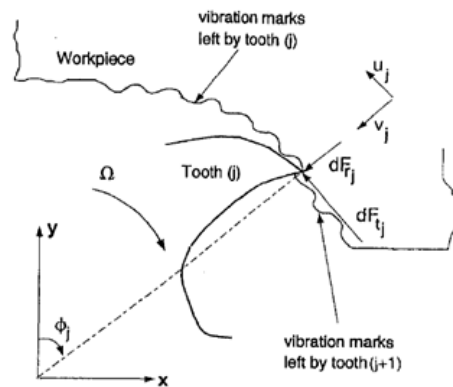
Apêndices	64
APÊNDICE A –Código da construção dos DLEs e otimização	65
APÊNDICE B –Código utilizado para validação da modelagem.	75

1 INTRODUÇÃO

A indústria metal mecânica tem evoluído muito nos últimos anos, todos os dias é possível encontrar novas ferramentas, serviços, materiais, etc. Isso se dá devido à um mercado cada vez mais exigente que demanda produtos com níveis elevados de engenharia, pressionando o ramo da fabricação a entregar soluções cada vez mais precisas, flexíveis e com alta produtividade (QUINTANA; CIURANA, 2011).

Um fator que interfere negativamente nos processos de corte e, portanto, na produtividade, são as vibrações indesejadas que surgem com o emprego de determinadas entradas de deslocamento e velocidade, grandezas físicas muito comuns e impossíveis de serem evitadas no processo. Este tipo de vibração é denominada como auto-excitada, onde em inglês atribuiu-se o nome *chatter* comumente utilizado. Tal fenômeno é extremamente complexo em razão de todos os fatores envolvidos na dinâmica da usinagem e seu comportamento, como: ferramenta de corte, porta-ferramentas, material da peça, estrutura da máquina de usinagem e parâmetros de corte (QUINTANA; CIURANA, 2011). Segue na Figura 1 a exemplificação do fenômeno.

Figura 1 – Resultados do *chatter* no processo de fresamento.



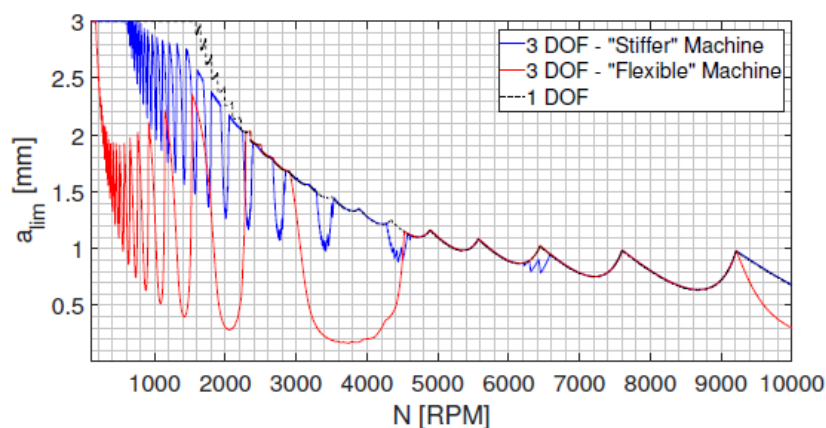
Fonte: Budak e Altintas (1998)

Com o foco de compreender melhor o *chatter*, muitos estudos foram desenvolvidos ao longo da bibliografia de usinagem, sendo alguns mais efetivos que outros. Um dos métodos mais promissores é o método dos Diagramas de Lóbulos de Estabilidade (DLE) ou como é conhecido em inglês *Stability Lobe Diagram* (SLD), este que permite analisar as regiões de estabilidade do *chatter*, criando um limite que separa a zona de corte instável e a estável através de um diagrama da profundidade de corte limite versus a rotação do eixo-árvore (BUDAK; OZLU, 2007). Este método é essencial para a compreensão analítica da usinagem, uma vez que permite uma correlação entre os parâmetros do processo e entrega uma análise visual clara.

O *chatter* é um assunto recorrente e essencial para a fabricação em geral, sendo ele discutido por vários autores. Inicialmente Minis e Yanushevsky (1993) propuseram um modelo preditivo de análise do *chatter* provocado pela ferramenta de corte, utilizando séries de Fourier e uma sequência de séries infinitas com métodos de controle aplicados, obtendo um modelo preciso para o processo. Yang, Muñoa e Altintas (2010) foram além, estudando estratégias de otimização para a ferramenta de corte aplicando vários absorvedores dinâmicos de vibração, inicialmente estudando o processo de torneamento, mas percebendo que a análise poderia ser estendida para o fresamento.

Já o foco de Budak e Altintas (1998) foi estudar o processo de torneamento e definir sua dinâmica para uma análise da profundidade de usinagem axial e radial, obtendo um modelo dinâmico com múltiplos graus de liberdade e que fosse capaz de descrever corretamente a ocorrência de *chatter*, bem como seu limite de estabilidade, sendo este um fator crucial para o desenvolvimento do presente artigo. Com o tempo novos modelos de análise foram surgindo, desta vez para definir os limites de estabilidade do *chatter* e formas de se trabalhar com isto, sendo Budak e Ozlu (2007) pioneiros neste aspecto. Saretti e Shiki (2019) fornecem uma análise essencial para o método do diagrama de lóbulos com modelos dinâmicos analíticos, embasando o que será desenvolvido a seguir, a Figura 2 abaixo ilustra o resultado do método.

Figura 2 – Aplicação prática do diagrama de lóbulos



Fonte: Saretti e Shiki (2019)

Após a análise teórica alguns autores desenvolveram estudos mais práticos para a definição dos diagramas de lóbulos, como Quintana *et al.* (2009) com um mapeamento sonoro do processo de torneamento.

Apesar de tantas abordagens distintas sobre o *chatter*, a comunidade acadêmica carece de um estudo analítico que consiga minimizar o fenômeno antes da aplicação prática, buscando alterar os parâmetros de usinagem que são a interface direta com o processo e assim permitir que planejamentos de produção sejam projetados com a concepção da qualidade superficial já estabelecida. Todos os tópicos de modelagem dinâmica,

concepção dos diagramas de lóbulos e aplicação da otimização serão esmiuçados na seção de desenvolvimento.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é utilizar uma modelagem simples e eficaz para o contexto produtivo e posteriormente aplicar lógicas de otimização para minimizar o *chatter*, obtendo uma melhor qualidade superficial e produtividade. Utilizando, para isso, o método dos diagramas de lóbulos de estabilidade como base de análise.

Para que esse objetivo seja atingido os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Obter dados experimentais para entrada do sistema de forma a modelar um sistema mais condizente possível com a realidade e que possua utilidade prática.
- Desenvolver o equacionamento para obter os diagramas de lóbulos segundo a bibliografia base.
- Encontrar funções-custo de otimização que consiga expressar da melhor forma os aspectos mais relevantes do processo de torneamento.
- Propor correlações entre parâmetros de usinagem, além de faixas ótimas de atuação em regime de estabilidade.

1.2 Estrutura do texto

Esta monografia está organizada da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que cerca a modelagem dinâmica em processos de usinagem, o *chatter* como área de estudo relevante em processos de fabricação e as diversas estratégias de otimização disponíveis atualmente;
- O capítulo 3 descreve os métodos e estratégias utilizados na validação de faixas ótimas de operação;
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a modelagem realizada e discussões relacionadas;
- O capítulo 5 contém as conclusões do trabalho e a indicação de trabalhos futuros;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento de uma análise do problema proposto, é necessário entender e construir uma série de entendimentos sobre como foi desenvolvida a pesquisa da modelagem dinâmica sobre tornos, estudos sobre o *chatter* e estratégias de otimização. Com o intuito de fomentar esta base, nas seções a seguir serão discutidos cada um destes tópicos, tornando mais claro o que já foi desenvolvido e até mesmo dialogando sobre pontos interessantes que poderão ser desenvolvidos em futuros trabalhos.

2.1 Modelagem dinâmica dos tornos

Os fenômenos dinâmicos envolvidos na usinagem dos materiais compõem uma área vasta e muito significativa para qualquer contexto produtivo, uma vez a usinagem se apresenta como o processo mais relevantes na fabricação de quaisquer produtos, sendo seu comportamento dinâmico o primeiro ponto a ser analisado e modelado para que, de fato, se entenda a física por traz deste processo.

Diversos autores focaram seus estudos em diferentes abordagens e perspectivas sobre a dinâmica de tornos no processo de usinagem, todos buscando uma abordagem mais realista que permitisse a melhor previsão de variáveis importantes no processo de usinagem, como: rugosidade, desgaste do equipamentos, precisão e etc. Bollinger e Geiger (1964), por exemplo, propuseram um estudo do comportamento estático e dinâmico de um torno através do método das diferenças finitas, utilizando matemática computacional, desenvolveram um sistema de equações para descrever a ação do torno, abordando até mesmo o impacto que a peça a ser usinada tem sobre tal comportamento, uma vez que implica em uma mudança da massa e centro de massa do equipamento, permitindo assim um decréscimo do amortecimento.

Já Liu *et al.* (2021) exploraram o comportamento de um componente em específico, o rolamento empregado em tornos CNC, considerando a mudança que a interferência térmica gera no contato angular entre as esferas do mesmo e conseqüentemente, o comportamento do eixo-árvore em si, permitindo um olhar muito mais minucioso e específico sobre o problema, mas muito crítico quando se fala do projeto desta máquina e de como o desgaste deste interfere no comportamento global do processo. Sendo assim, é indispensável olhar para quais os aspectos mais relevantes a serem abordados na modelagem dinâmica.

Como referência de outras possibilidades, tem-se também o estudo de Hadraba e Hadas (2017) que considera a ação de um torno com múltiplos eixo-árvore, sofrendo a influência de diversos componentes de amortecimento, uma vez que o sistema é muito complexo, encontrando assim regiões de estabilidade com a simulação computacional, muito similar ao que se pretende com este estudo, diferenciando-se apenas pela variável

que se deseja otimizar.

Nota-se então que diversas abordagens são possíveis, dado que mesmo dentro do escopo de tornos, várias configurações, componentes e perspectivas são utilizadas, sendo assim, o presente estudo será focado em um torno convencional e uma modelagem simples de seis graus de liberdade, como proposto por Saretti e Shiki (2019). Com tal configuração é possível observar um comportamento próximo a realidade sem agregar complexidade matemática desnecessária, o que será útil para melhores considerações na etapa de construção dos DLE.

2.2 Estudo do *chatter*

Uma vez em posse da abordagem dinâmica do torno, o próximo passo é aplicar tal consideração ao *chatter*, este fenômeno que começou a ser amplamente estudado no campo da engenharia de fabricação por apresentar um decréscimo muito grande em produtividade, uma vez que se limita as faixas de melhor entrega de volume removido afim de não se aproximar de regiões de instabilidade, bem como de qualidade das peças usinadas, dadas ranhuras regulares que surgem, advindas do movimento vibratório, tal decréscimo de qualidade superficial pode ser visto na Figura 3. Dessa forma, assim como apresentado na introdução, diversos autores buscaram compreender melhor o *chatter*.

Figura 3 – Acabamento superficial de diferentes aplicação mediante ocorrência de *chatter*.



Fonte: Venter (2019)

Segundo Quintana e Ciurana (2011), há quatro grandes grupos de estudo dentro deste fenômeno, o primeiro seria o grupo fora do processo, como a análise pelo método dos DLE, o segundo seriam as estratégias de pesquisa dentro do processo em si, mas voltadas a um monitoramento do comportamento em si para detectar sua ocorrência, já o terceiro seria voltado à ações passivas, como a mudança de componentes de amortecimento e algumas outras variáveis do sistema, permitindo manipular a ocorrência do *chatter* e por fim, o quarto grupo seria o de estudo de metodologias ativas através de sistemas de controle em malha fechada, promovendo ações com atuadores em resposta a coleta de vibração para inibir o fenômeno auto excitado.

Como exemplos de estudos destes casos, temos para o primeiro grupo o próprio desenvolvimento de Budak e Ozlu (2007), um vez que desenvolveram uma análise através do diagrama de lóbulos de estabilidade para variáveis mais comuns na usinagem, permitindo assim, fora do processo, a compreensão onde estariam as regiões de instabilidade que gerariam o *chatter*. Propõem então um foco preditivo, similar o que se busca obter no presente artigo, para que seja possível compreender e validar um processo antes mesmo de sua estruturação e a adaptação de processos já implementados, o que vai de encontro com o status da industrialização do Brasil, que prefere a adaptação de sua frota industrial do que a estruturação de uma nova, como mostrado por Tyler (1976) e mais recentemente por Araújo, Miguel e Pimentel (2012).

Hagood e Flotow (1991) no entanto, buscaram soluções ativas e passivas através de piezoelétricos e redes elétricas, os autores realizaram a dissipação da energia mecânica da vibração convertendo-a em energia elétrica, permitindo assim um amortecimento do sistema. De maneira muito similar Garg D. P. (2003) atuaram com o uso de piezocerâmicas e amortecedores magnéticos e fluídicos para obter o mesmo amortecimento, sendo o grande gargalo nesta tentativa a tecnologia disponível na época do desenvolvimento, mostrando também uma oportunidade para futuros artigos.

Compreende-se então, que se carece de estudos com o viés mais próximo ao mercado brasileiro, que permita uma adequação das máquinas e um olhar sobre variáveis de processo, para que seja de fácil aplicação para os mais abrangentes casos, demandando apenas a definição de alguns parâmetros da máquina para que já seja possível encontrar melhores parâmetros para evitar o *chatter*.

2.3 Otimização

Existem hoje diversas estratégias de otimização, desde métodos ativos buscando melhor desempenho de uma ou mais variáveis, até métodos puramente matemáticos como análise de Pareto, funções custo e etc. No contexto de fabricação, é muito comum encontrar estudos para otimização através de intervenção do processo, dado que é muito mais efetivo, porém se apresenta como uma alternativa custosa financeiramente e estrategicamente.

Yusoff *et al.* (2011) em seu estudo, faz um resumo sobre as estratégias de

otimização adotadas para a ocorrência do *chatter*, uma vez que desde o descobrimento deste fenômeno tão nocivo, diversos autores buscaram minimizar os efeitos do mesmo das mais diversas formas. O que temos como resultado são diversas metodologias voltadas ao controle do *chatter*, abordando desde atenuadores de vibração, estratégias diferentes de apoio do eixo-árvore, análise de elementos finitos para diferentes fixações, entre outras, tudo isso culmina novamente em diferentes óticas sobre o mesmo efeito físico, se fazendo necessário a compreensão de qual contexto cada uma se encaixa melhor.

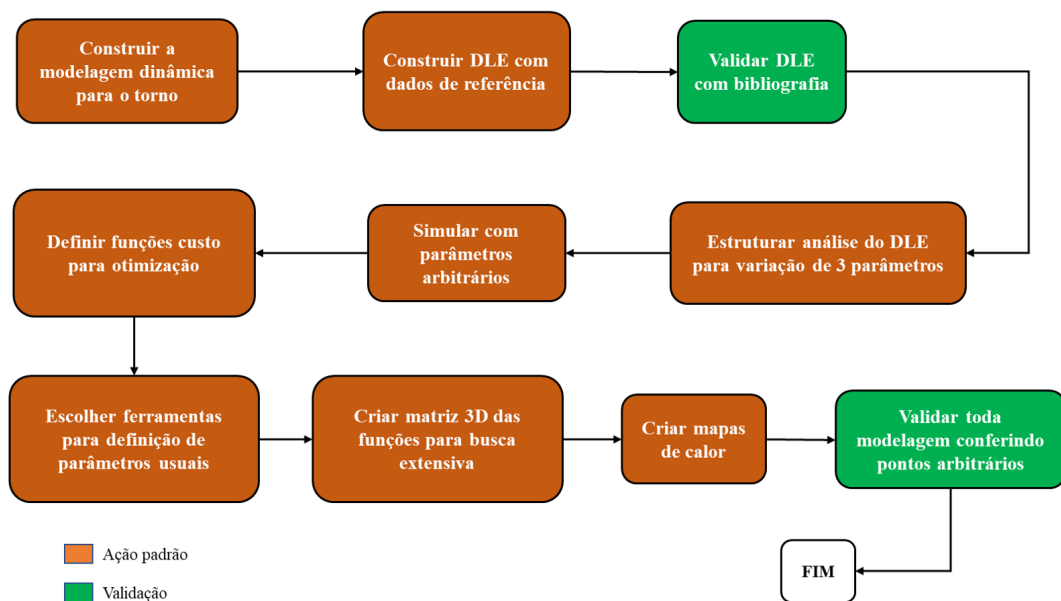
O presente estudo busca trazer uma abordagem mais práticas, aplicável ao dia-a-dia da indústria, dessa forma, uma otimização puramente matemática voltada aos parâmetros de usinagem mais comuns como velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem se mostra mais efetiva, porém sem demandar nenhuma análise de elementos finitos, apenas atrelada a informações mais básicas sobre a construção do torno em questão. Dessa forma, este capítulo aborda a visão necessária para que se possa construir tal abordagem, como ocorrerá no capítulo a seguir.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Introdução do capítulo

A fim de tornar mais visual e prático o processo descrito neste capítulo, bem como a validação final a ser tratada nos resultados, segue um organograma na Figura 11 esmiuçando o passo a passo adotado;

Figura 4 – Organograma do desenvolvimento.



Fonte: Autor (2022)

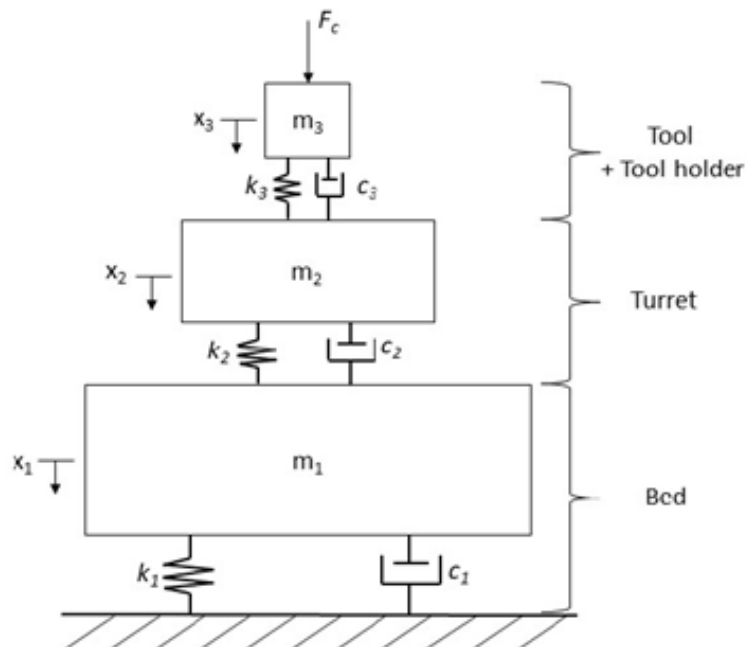
3.2 Modelagem

A modelagem dinâmica do sistema foi elaborada com um formato de seis graus de liberdade, visando simplificar o sistema sem a perda de informações relevantes, além disso, essa abordagem permitirá uma compreensão do impacto de simplificações no resultado final, uma vez que não possui a complexidade de simulações envolvendo séries de Fourier.

A modelagem a ser abordada é similar a proposta por Saretti e Shiki (2019) como pode ser vista na Figura 5, uma vez que considera influência de três pontos essenciais no processo de torneamento: barramento, torre de usinagem e porta-ferramentas com ferramenta. Além disso, seu trabalho trouxe um contexto sobre a influência da estrutura do torno no comportamento do *chatter*, mas inspirados nos estudos promovidos por Jen e Magrab (1996), onde diferentes condições de amortecimento geram comportamentos vibratórios distintos, de acordo com a Tabela 1, tem-se os valores para uma consideração

rígida e outra flexível, sendo esta a de maior interesse por se aproximar mais do contexto prático.

Figura 5 – Modelo de torno com três graus de liberdade.



Fonte: Saretti e Shiki (2019)

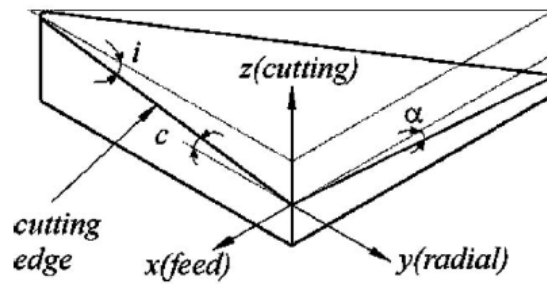
Tabela 1 – Propriedades físicas para diferentes estruturas do torno.

Condição	Flexível			Rígido		
	barramento	torre	ferramenta	barramento	torre	ferramenta
Propriedade física						
Massa [kg]	274	85	0.09	274	85	0.09
Coefficiente elástico [N/m]	4.58×10^8	2.1×10^7	2.3×10^6	4.58×10^9	2.18×10^8	2.3×10^6
Coefficiente de amortecimento [N.s/m]	4.58×10^2	2.1×10^1	2.3	4.58×10^3	2.1×10^2	2.3

Fonte: Fernandes (2021).

Foi possível, com esse modelo e considerações de um sistema flexível, obter uma modelagem com 3GDL, considerando para este caso, porém algumas modificações foram impostas, uma vez que somente o amortecimento vertical não seria robusto o suficiente para descrever com precisão a resposta dinâmica durante o processo. Utilizando como base a análise de uma ferramenta de torneamento padrão de Budak e Ozlu (2007) como mostrada na Figura 6.

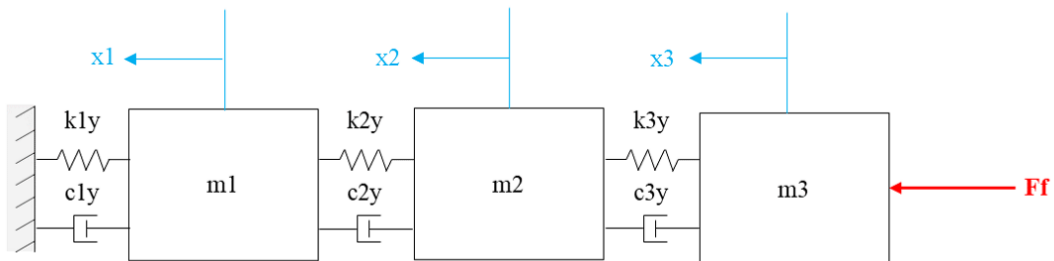
Figura 6 – Ferramenta de torneamento genérica.



Fonte: Budak e Ozlu (2007)

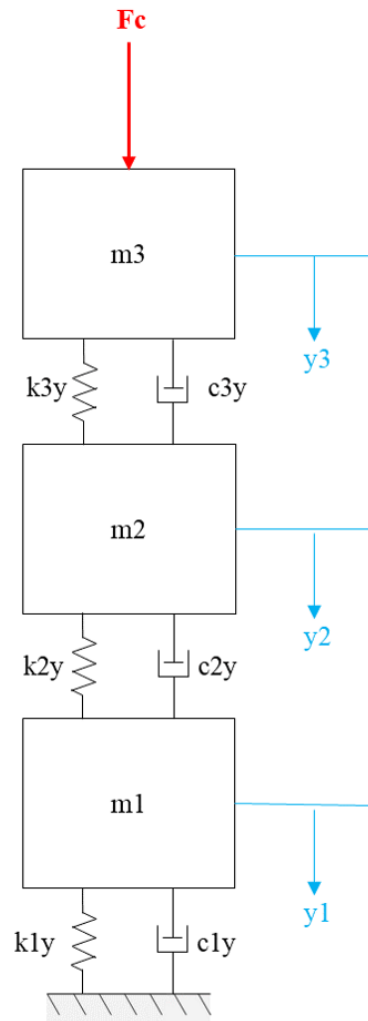
Mudou-se então o problema para uma modelagem de 6GDL em duas direções ortogonais, como proposto por Fernandes (2021), simplificando forças axiais presentes no processo e considerando apenas as forças presentes no plano de trabalho do torneamento externo advindas da restrição de posicionamento imposta e que surgem como resposta do sistema, como pode ser visto na Figura 7 e 8, onde tem-se a contribuição isolada em cada direção, considerando o mesmo comportamento dinâmico mostrado na Tabela 1 em ambas as direções.

Figura 7 – Modelo de torno com seis graus de liberdade (direção do avanço).



Fonte: Adaptado de Fernandes (2021)

Figura 8 – Modelo de torno com seis graus de liberdade (direção do corte).



Fonte: Adaptado de Fernandes (2021)

Em posse do esquemático acima proposto, descreveu-se o sistema através de uma equação diferencial para um sistema massa-mola-amortecedor como na Equação 1. Sendo F a força empregada na direção de interesse em Newtons, m a massa do componente de análise em quilogramas, x o deslocamento na direção de interesse em metros, k a constante de mola referente a rigidez do sistema em Newtons por metro e c a constante de amortecimento referente ao sistema em Newton segundo por metro.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_f \quad (1)$$

Obteve-se com o formato padrão proposto, todas as equações diferenciais do sistema de seis graus de liberdade, como disposto nas Equações de 2a a 2f.

$$m_1\ddot{x}_1(t) + c_{x1}\dot{x}_1(t) + k_{x1}x_1(t) - c_{x1}\dot{x}_2(t) - k_{x1}x_2(t) = F_f(t) \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} & -c_{x1}\dot{x}_1(t) - k_{x1}x_1(t) + m_2\ddot{x}_2(t) + (c_{x1} + c_{x2})\dot{x}_2(t) + (k_{x1} + k_{x2})x_2(t) \\ & - c_{x2}\dot{x}_3(t) - k_{x2}x_3(t) = 0 \end{aligned} \quad (2b)$$

$$-c_{x2}\dot{x}_2(t) - k_{x2}x_2(t) + m_3\ddot{x}_3(t) + (c_{x2} + c_{x3})\dot{x}_3(t) + (k_{x2} + k_{x3})x_3(t) = 0 \quad (2c)$$

$$m_1\ddot{y}_1(t) + c_{y1}\dot{y}_1(t) + k_{y1}y_1(t) - c_{y1}\dot{y}_2(t) - k_{y1}y_2(t) = F_c(t) \quad (2d)$$

$$\begin{aligned} & -c_{y1}\dot{y}_1(t) - k_{y1}y_1(t) + m_2\ddot{y}_2(t) + (c_{y1} + c_{y2})\dot{y}_2(t) + (k_{y1} + k_{y2})y_2(t) \\ & - c_{y2}\dot{y}_3(t) - k_{y2}y_3(t) = 0 \end{aligned} \quad (2e)$$

$$-c_{y2}\dot{y}_2(t) - k_{y2}y_2(t) + m_3\ddot{y}_3(t) + (c_{y2} + c_{y3})\dot{y}_3(t) + (k_{y2} + k_{y3})y_3(t) = 0 \quad (2f)$$

Em posse de todas as equações foi possível aplicar Laplace em todas e manipulá-las de modo a obtê-las no domínio da frequência em apenas segundo grau como mostrados nas Equações de 3a a 3f.

Obteve-se com o formato padrão proposto, todas as equações diferenciais do sistema de seis graus de liberdade, como disposto nas Equações de 2a a 2f.

$$m_1 s^2 x_1(s) + c_{x1} s x_1(s) + k_{x1}x_1(s) - c_{x1} s x_2(s) - k_{x1}x_2(s) = F_f(s) \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} & -c_{x1} s x_1(s) - k_{x1}x_1(s) + m_2 s^2 x_2(s) + (c_{x1} + c_{x2}) s x_2(s) + (k_{x1} + k_{x2})x_2(s) \\ & - c_{x2} s x_3(s) - k_{x2}x_3(s) = 0 \end{aligned} \quad (3b)$$

$$-c_{x2} s x_2(s) - k_{x2}x_2(s) + m_3 s^2 x_3(s) + (c_{x2} + c_{x3}) s x_3(s) + (k_{x2} + k_{x3})x_3(s) = 0 \quad (3c)$$

$$m_1 s^2 y_1(s) + c_{y1} s y_1(s) + k_{y1}y_1(s) - c_{y1} s y_2(s) - k_{y1}y_2(s) = F_c(s) \quad (3d)$$

$$\begin{aligned} & -c_{y1} s y_1(s) - k_{y1}y_1(s) + m_2 s^2 y_2(s) + (c_{y1} + c_{y2}) s y_2(s) + (k_{y1} + k_{y2})y_2(s) \\ & - c_{y2} y_3(s) - k_{y2}y_3(s) = 0 \end{aligned} \quad (3e)$$

$$-c_{y2} s y_2(s) - k_{y2} y_2(s) + m_3 s^2 y_3(s) + (c_{y2} + c_{y3}) s y_3(s) + (k_{y2} + k_{y3}) y_3(s) = 0 \quad (3f)$$

Agrupando as equações de modo a tornar mais simples a visualização dos graus de liberdade e já às trazendo para a nomenclatura adotada por Budak e Ozlu (2007), uma vez que a linguagem se torna comum para a modelagem do *chatter*, tem-se então as Equações de 4a a 4f.

$$(m_1 s^2 + c_{x1} s + k_{x1}) x_1(s) - (c_{x1} s + k_{x1}) x_2(s) = G_{x11} x_1(s) - G_{x12} x_2(s) = F_f(s) \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} & - (c_{x1} s + k_{x1}) x_1(s) + (m_2 s^2 + (c_{x1} + c_{x2}) s + k_{x1} + k_{x2}) x_2(s) \\ & - (c_{x2} s - k_{x2}) x_3(s) = -G_{x12} x_1(s) + G_{x22} x_2(s) - G_{x23} x_3(s) = 0 \end{aligned} \quad (4b)$$

$$-(c_{x2} s + k_{x2}) x_2(s) + (m_3 s^2 + (c_{x2} + c_{x3}) s + k_{x2} + k_{x3}) x_3(s) = G_{x23} x_2(s) - G_{x33} x_3(s) = 0 \quad (4c)$$

$$(m_1 s^2 + c_{y1} s + k_{y1}) y_1(s) - (c_{y1} s + k_{y1}) y_2(s) = G_{y11} y_1(s) - G_{y12} y_2(s) = F_c(s) \quad (4d)$$

$$\begin{aligned} & - (c_{y1} s + k_{y1}) y_1(s) + (m_2 s^2 + (c_{y1} + c_{y2}) s + k_{y1} + k_{y2}) y_2(s) \\ & - (c_{y2} s - k_{y2}) y_3(s) = -G_{y12} y_1(s) + G_{y22} y_2(s) - G_{y23} y_3(s) = 0 \end{aligned} \quad (4e)$$

$$-(c_{y2} s + k_{y2}) y_2(s) + (m_3 s^2 + (c_{y2} + c_{y3}) s + k_{y2} + k_{y3}) y_3(s) = G_{y23} y_2(s) - G_{y33} y_3(s) = 0 \quad (4f)$$

Como próximo passo, uniu-se as variáveis de forma a obter uma correlação entre elas com visto nas Equações de 5a a 5f, permitindo a obtenção da força em função apenas dos deslocamentos x_1 e y_1 como pode ser visto nas Equações de 6a e 6b a seguir.

$$x_3(s) = \frac{G_{x23}(s)}{G_{x33}(s)} x_2(s) \quad (5a)$$

$$x_2(s) = \frac{G_{x33}(s) G_{x12}(s)}{G_{x22}(s) G_{x33}(s) - G_{x23}^2(s)} x_1(s) \quad (5b)$$

$$x_3(s) = \frac{G_{x23}(s) G_{x12}(s)}{G_{x22}(s) G_{x33}(s) - G_{x23}^2(s)} x_1(s) \quad (5c)$$

$$y_3(s) = \frac{G_{y23}(s)}{G_{y33}(s)} y_2(s) \quad (5d)$$

$$y_2(s) = \frac{G_{y33}(s) G_{y12}(s)}{G_{y22}(s) G_{y33}(s) - G_{y23}^2(s)} y_1(s) \quad (5e)$$

$$y_3(s) = \frac{G_{y23}(s) G_{y12}(s)}{G_{y22}(s) G_{y33}(s) - G_{y23}^2(s)} y_1(s) \quad (5f)$$

$$F_f(s) = \frac{G_{x1}(s) (G_{x22}(s) G_{x33}(s) - G_{x23}^2(s)) - G_{x33}(s) G_{x12}^2(s)}{G_{x22}(s) G_{x33}(s) - G_{x23}^2(s)} x_1(s) \quad (6a)$$

$$F_c(s) = \frac{G_{y1}(s) (G_{y22}(s) G_{y33}(s) - G_{y23}^2(s)) - G_{y33}(s) G_{y12}^2(s)}{G_{y22}(s) G_{y33}(s) - G_{y23}^2(s)} y_1(s) \quad (6b)$$

Com a presente configuração é possível obter a função de transferência do deslocamento x_1 na direção x considerando a massa m_1 com relação a componente da força F_f como mostrado na Equação 7, de maneira análoga tem-se para a direção x na Equação 8.

$$\frac{x_1(s)}{F_f(s)} = G_{xx}(s) = \frac{G_{x22}(s) G_{x33}(s) - G_{x23}^2(s)}{G_{x1}(s) (G_{x22}(s) G_{x33}(s) - G_{x23}^2(s)) - G_{x33}(s) G_{x12}^2(s)} \quad (7)$$

$$\frac{y_1(s)}{F_c(s)} = G_{yy}(s) = \frac{G_{y22}(s) G_{y33}(s) - G_{y23}^2(s)}{G_{y1}(s) (G_{y22}(s) G_{y33}(s) - G_{y23}^2(s)) - G_{y33}(s) G_{y12}^2(s)} \quad (8)$$

Considerando que o domínio s é composto por uma composição de uma parte real e uma parte imaginária, segundo Fernandes (2021), é possível realizar a análise de estabilidade apenas considerando o domínio da frequência. Utilizando as considerações das Equações 9a e 9b, podemos simplificar ainda mais as funções já obtidas, algo importante para a elaboração dos diagramas de lóbulos.

$$s = \sigma + i\omega \quad (9a)$$

$$\forall \sigma > 0 \implies \textit{instabilidade}$$

$$\forall \sigma = 0 \implies \textit{limite} \quad (9b)$$

$$\forall \sigma < 0 \implies \textit{estabilidade}$$

Assumindo-se então que a parte real será zero, uma vez que a região de interesse é o limite de estabilidade que irá formar o lóbulo para o conjunto de parâmetros a ser definidos, pode-se simplificar as equações descritas anteriormente, obtendo as funções de transferência das Equações 10 e 11, onde cada um dos termos é esmiuçado nas Equações de 12a a 12j.

$$G_{xx}(i\omega_c) = \frac{G_{x22}(i\omega_c) G_{x33}(i\omega_c) - G_{x23}^2(i\omega_c)}{G_{x1}(i\omega_c) (G_{x22}(i\omega_c) G_{x33}(i\omega_c) - G_{x23}^2(i\omega_c)) - G_{x33}(i\omega_c) G_{x12}^2(i\omega_c)} \quad (10)$$

$$G_{yy}(i\omega_c) = \frac{G_{y22}(i\omega_c) G_{y33}(i\omega_c) - G_{y23}^2(i\omega_c)}{G_{y1}(i\omega_c) (G_{y22}(i\omega_c) G_{y33}(i\omega_c) - G_{y23}^2(i\omega_c)) - G_{y33}(i\omega_c) G_{y12}^2(i\omega_c)} \quad (11)$$

$$G_{x11}(i\omega_c) = -m_1 \omega_c^2 + k_{x1} + i(c_{x1} \omega_c) \quad (12a)$$

$$G_{x12}(i\omega_c) = k_{x1} + i(c_{x1} \omega_c) \quad (12b)$$

$$G_{x22}(i\omega_c) = -m_2 \omega_c^2 + k_{x1} + k_{x2} + i((c_{x1} + c_{x2}) \omega_c) \quad (12c)$$

$$G_{x23}(i\omega_c) = k_{x2} + i(c_{x2} \omega_c) \quad (12d)$$

$$G_{x33}(i\omega_c) = -m_3 \omega_c^2 + k_{x2} + k_{x3} + i((c_{x2} + c_{x3}) \omega_c) \quad (12e)$$

$$G_{y11}(i\omega_c) = -m_1 \omega_c^2 + k_{y1} + i(c_{y1} \omega_c) \quad (12f)$$

$$G_{y12}(i\omega_c) = k_{y1} + i(c_{y1} \omega_c) \quad (12g)$$

$$G_{y22}(i\omega_c) = -m_2 \omega_c^2 + k_{y1} + k_{y2} + i((c_{y1} + c_{y2}) \omega_c) \quad (12h)$$

$$G_{y23}(i\omega_c) = k_{y2} + i(c_{y2} \omega_c) \quad (12i)$$

$$G_{y33}(i\omega_c) = -m_3 \omega_c^2 + k_{y2} + k_{y3} + i((c_{y2} + c_{y3}) \omega_c) \quad (12j)$$

3.3 Construção do diagrama de lóbulos

O método dos diagramas de lóbulos de estabilidade é o que de fato será relevante para alimentar a otimização, uma vez que é um reflexo direto do comportamento do *chatter* no sistema, sendo possível por ele analisar para cada uma das combinações distintas de parâmetros, se há estabilidade ou não, ou seja, se o par profundidade de usinagem e rotação se encontram abaixo ou acima do valor limite (a_{lim}). Para tal, é preciso desenvolver o equacionamento descrito a seguir, utilizando como base as funções de transferência obtidas na seção anterior, toda a construção matemática será desenvolvida no software MATLAB 2019a.

Primeiramente, para variáveis não obtidas por cálculo diretamente, bibliografias com desenvolvimento experimental de torneamento foram utilizadas, de forma a obter resultados condizentes com o comportamento real, sendo possível utilizar esta modelagem para o processo de otimização. Como base para tal, considerou-se os estudos de Gandia (2020) e Fernandes (2021), os valores obtidos são referentes a geometria da ferramenta de corte (ψ), construção dinâmica do torno (F_f e F_c) e diâmetro da peça de trabalho (uma vez que impacta na velocidade de corte), seguem os valores adotados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros retirados da bibliografia

Parâmetro	Valor	Unidade
ψ	$\frac{\pi}{4}$	[-]
D	6	[mm]
F_f	35	[N]
F_c	98	[N]

Fonte: Autor (2022).

Tais considerações serão relevantes para a construção que se segue, principalmente para a construção das variáveis K_f e K_c , seu formato pode ser visto a seguir nas Equações 13 e 14, respectivamente.

$$K_f = \frac{F_f}{a_p f} \quad (13)$$

$$K_c = \frac{F_c}{a_p f} \quad (14)$$

Segundo Budak e Ozlu (2007) em seus estudos de estabilidade, é possível descrever a força dinâmica de corte mediante a Equação 15, onde F é o vetor de forças em Newtons, ω_c é a frequência de vibração do sistema em radianos por segundo, t é o tempo em segundos, a é a profundidade de usinagem em milímetros, A é a matriz de coeficientes direcionais dada pela Equação 16 em Newtons por metro quadrado e G é a matriz de transferência do

torno em metros por Newtons, demonstrada na Equação 17. Vale ressaltar, que o presente modelo trata de uma simplificação onde descarta-se a influência do atrito proveniente do processo de cisalhamento do cavaco.

$$Fe^{i\omega_c t} = a(1 - e^{i\omega_c t})[A][G(i\omega_c)]Fe^{i\omega_c t} \quad (15)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\cos(\psi) & \text{sen}(\psi) \\ \text{sen}(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_f \\ K_c \end{bmatrix} [1 - \tan(\psi)] \quad (16)$$

$$[G(i\omega_c)] = \begin{bmatrix} G_{xx} & 0 \\ 0 & G_{yy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

De maneira complementar Fernandes (2021) mostra que realizando uma análise de equação característica é possível obter as relações propostas nas Equações 18, 19, 20, 21, 22 e 23, onde cada valor de k imposto, que representa o número de ondas em um período, gera valores de rotação n [rpm] e profundidade limite a_{lim} [mm], gerando assim o diagrama de lóbulos desejado. Sendo λ o autovalor do sistema e τ o período de oscilação em segundos

$$\lambda = \frac{-\cos(\psi)}{G_{xx}(K_f \cos^2(\psi) - K_c \text{sen}(\psi) \cos(\psi)) + G_{yy}(K_f \text{sen}^2(\psi) + F_c \text{sen}(\psi) \cos(\psi))} \quad (18)$$

$$a_{lim} = -\frac{1}{2} \lambda_R (1 - \kappa) \quad (19)$$

$$\kappa = \frac{\lambda_I}{\lambda_R} = \frac{\text{sen}(\omega_c \tau)}{1 - \cos(\omega_c \tau)} \quad (20)$$

$$\epsilon = \pi - 2 \tan^{-1} \kappa \quad (21)$$

$$\tau = \frac{\epsilon + 2k\pi}{\omega_c} \quad (22)$$

$$n = \frac{60}{\tau} \quad (23)$$

A partir deste ponto, se faz necessário entender quais parâmetros influenciam a modelagem do diagrama de lóbulos, uma vez que são pontos de suma importância para a compreensão da otimização. Durante a modelagem matemática é necessário impor faixas de ensaio (método iterativo) para cinco variáveis: a_p , v_c , f , k e ω_c . Todas elas geram diferentes impactos na elaboração do diagrama de lóbulos, que são:

- a_p , v_c e f - Impactam diretamente no autovalor mostrado na Equação 18, uma vez que são utilizados para construir as variáveis K_f e K_c como pode ser visto nas Equações 14 e 13.
- k - Impacta na construção do DLE como um todo, uma vez que para cada k imposto teremos pares de a_{lim} e n , gerando diferentes lóbulos para cada um dos valores, permitindo a análise gráfica e numérica da estabilidade.
- ω_c - Impacta em toda a modelagem por ser a faixa de frequência observada, sendo a variável onde a modelagem dinâmica gira em torno.

Desenvolveu-se então o primeiro diagrama de lóbulos no software matemático com o intuito de validar a modelagem, para os valores impostos utilizou-se uma faixa de valores similar a utilizada por Fernandes (2021), uma vez que seria capaz de fornecer uma boa base para comparação. Tem-se a seguir na Tabela 3 os valores únicos utilizados para a_p , v_c e f , bem como as faixas de valores com os respectivos incrementos para ω_c e k .

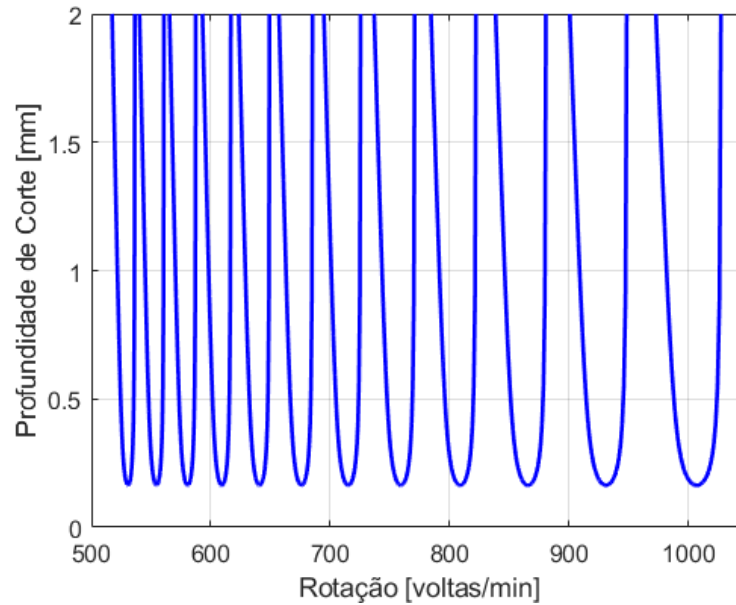
Tabela 3 – Valores utilizados para gerar o primeiro diagrama de lóbulos

Parâmetro	Valor com incremento	Unidade
v_c	12,25	$[\frac{m}{min}]$
a_p	0,25	[mm]
f	0,079	$[\frac{mm}{volta}]$
ω_c	500:1:2000	$[\frac{rad}{s}]$
k	12:1:23	[-]

Fonte: Autor (2022).

Pôde-se então gerar o diagrama de lóbulos baseado nos valores estabelecidos como visto na Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Diagrama de lóbulos para o conjunto de parâmetros arbitrário



Fonte: Autor (2022).

3.4 Otimização

Para a otimização muitas estratégias foram cogitadas, porém o foco deste estudo está na averiguação teórica da melhor combinação dos parâmetros mais relevantes no contexto de usinagem industrial, dessa forma, a estratégia adotada foi a de busca extensiva, sendo iterada para cada uma das combinações de variáveis o seu desempenho baseado em funções custo relacionadas a aspectos importantes para a fabricação.

A construção será dividida em três subseções, uma vez que tornará mais claro o racional adotado até chegar à melhor combinação de variáveis e a análise dos contornos

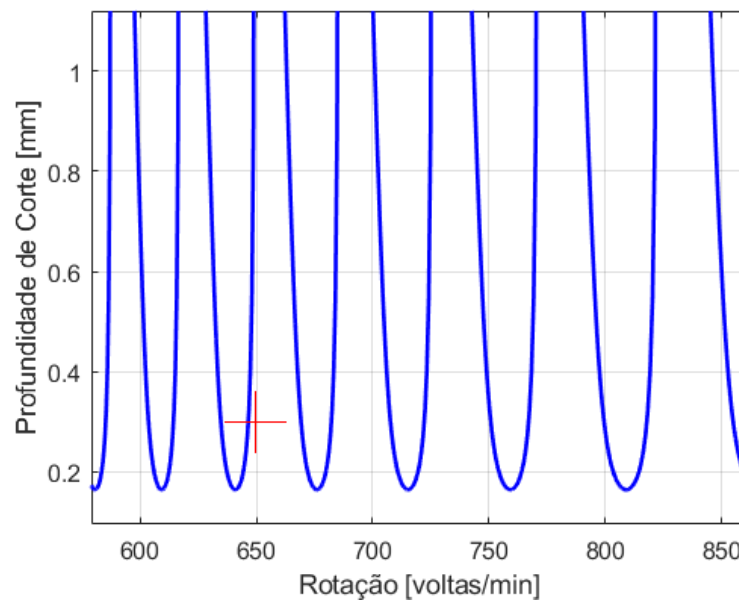
3.4.1 Interpretação matemática da estabilidade

Para o desenvolvimento da busca extensiva o foco inicial foi construir a análise matemática para um conjunto de parâmetros, uma vez que a lógica se estenderia perante a variação dos mesmos, sendo necessário apenas alguns ajustes. Primeiramente definiu-se a rotação de interesse, dado que este é um dos componentes do par ordenado que precisa ser observado do DLE, que se trata de um gráfico a_p versus RPM, para tal, utilizou-se da Equação 24 mostrada a seguir e proposta por Machado *et al.* (2009).

$$n = \frac{v_c 1000}{\pi D} \quad (24)$$

Em posse da rotação de interesse desenvolveu-se então uma comparação direta de valores. Para a rotação definida foi possível obter um a_{lim} respectivo por meio do DLE gerado (apresentado na Figura 9), este valor representa diretamente o limite de estabilidade, onde qualquer profundidade de usinagem menor ou igual a ele está em região de estabilidade, vide a Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de lóbulos com indicação do ponto de interesse para comparação visual



Fonte: Autor (2022).

Valendo-se da lógica gráfica e a traduzindo para valores, definiu-se uma metodologia binária simples, onde as profundidades de corte acima do limite na rotação de interesse, seriam zerada, bem como a variável de otimização de modo que se tornassem inelegíveis para a análise das funções custo por já estarem fora da região de interesse, enquanto as profundidades iguais ou inferiores ao limite seriam armazenados para a análise de otimização.

Com a análise para uma combinação em mãos, construiu-se então um novo código com laços de repetição variando os parâmetros chave que outrora fixou-se, criando toda as permutações possíveis entre eles. Para esta construção, optou-se por *ranges* arbitrários, baseados nos mesmos valores utilizados inicialmente, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Faixa de valores imposta arbitrariamente para auxiliar na construção da otimização.

Parâmetro	Valor com incremento	Unidade
v_c	12,25:1:17,25	$\left[\frac{m}{min}\right]$
a_p	0,2:0,1:2	[mm]
f	0,07:0,01:0,20	$\left[\frac{mm}{volta}\right]$

Fonte: Autor (2022).

A relevância desta abordagem consiste em fazer a busca extensiva em todas as combinações possíveis dos parâmetros, onde comparou-se todas as profundidades baseado no DLE gerado para o conjunto de $(a_p, v_c$ e $f)$ em questão e definiu-se e o valor poderia ser utilizado nas funções custo.

3.4.2 Funções custo

Para a construção das funções custo fez-se necessária a análise de quais são os fenômenos relevantes no processo de usinagem e encontrar equações que descrevessem adequadamente os mesmos, além de utilizarem os parâmetros de interesse. Optou-se então por focar em dois aspectos muito relevantes no contexto industrial: produtividade e acabamento superficial, ambos capazes de descrever boa parte das preocupações durante a engenharia de fabricação de qualquer peça que será produzida em escala.

Enquanto à produtividade, alguns fatores como tempo de setup, cálculo de sobremetal e até mesmo programação de trajetória (considerando máquinas CNC) seriam pontos a serem considerados, entretanto são variáveis externas ao processo em si, não envolvendo os parâmetros de interesse. Portanto decidiu-se utilizar como referência para produtividade a taxa de material removido, descrita em diversas bibliografias assim como por Ferraresi (1970) e disposta na Equação 25 a seguir.

$$Q = a_p v_c f \quad (25)$$

A análise para acabamento superficial é mais complexa, uma vez que há diversas abordagens, algumas completamente teóricas, onde o processo abordado tem grande impacto em sua formulação, contemplando até considerações empíricas onde diversos ensaios são realizados. Devido ao foco do presente estudos ser uma análise teórica, optou-se pela ótica do acabamento superficial máximo teórico, com sua formulação dada pela Equação 25, uma abordagem apresentada por Machado *et al.* (2009) que permite definir um limite máximo, desta forma, pode-se considerar que quaisquer valores apresentados nesta função custo serão, na pior das hipóteses, igual ao valor obtido.

$$Rt = \frac{f^2}{8 R_e} \quad (26)$$

O ponto onde as funções se diferem está nas variáveis necessárias, uma vez que para o acabamento superficial faz-se necessário adotar um raio de ponta para a ferramenta. Dado isso, focou-se em escolher uma ferramenta genérica que tenha uma atuação em operações de torneamento e que possua características interessantes para processo de acabamento, a escolhida foi a pastilha TR-DC1308S01020F 7015, disponibilizada pela fabricante Sandvik (2022), uma vez que se enquadra no tipo de operação, acabamento e material da peça de trabalho.

Utilizou-se também dos dados técnicos da pastilha para a correção das faixas arbitrárias adotadas inicialmente, uma vez que o fabricante faz recomendações baseado em experimentação, tornando a otimização mais próxima do contexto prático. Segue na Figura 11 os valores adotados.

Figura 11 – Faixas reais adotadas para desenvolvimento da otimização

H	ap 0.15 mm(0.07-0.4) fn 0.14 mm/r(0.07-0.27) vc 180 m/min(195-160)
---	--

Fonte: Sandvik (2022).

Por fim, para as funções custos serem aplicáveis, foi necessário realizar uma parametrização de forma a tornar igual a contribuição de ambas e estabelecer um limite máximo para a nota, que foi que foi 1 para o caso perfeito (impossível para efeitos práticos).

Fez-se necessário também, considerar o peso de ambas as variáveis, uma vez que um processo pode priorizar mais qualidade superficial do que produtividade e vice-versa, dessa forma, estipulou-se uma igual importância em ambas para efeito de construção, sendo sua variação um tópico relevante para ser abordado na sequência. Tem-se então as Equações 27 e 28, que representam a função custo de produtividade e acabamento superficial, respectivamente.

$$Q_{otm} = \frac{Q - Q_{min}}{\Delta Q} = \frac{a_p v_c v_f}{a_{p_{max}} v_{c_{max}} f_{max}} \quad (27)$$

$$Rt_{otm} = \frac{Rt_{max} - Rt}{\Delta Rt} = \frac{f_{max}^2 - f^2}{f_{max}^2 - f_{min}^2} \quad (28)$$

Faz-se necessário então a união de ambas na equação de otimização geral com foco na maximização do valor, onde haverão dois casos, o que a nota assumirá valor nulo mediante a ocorrência de chatter (comparação direta entre profundidades para a mesma rotação) e o caso onde é elegível e há a ponderação das funções custo, como expresso na Equação 29.

$$\begin{cases} \text{se } a_p \geq a_{lim(n1)}, \phi_{MAX} = 0 \\ \text{se } a_p < a_{lim(n1)}, \phi_{MAX} = (P_1 Q_{otm}) + (P_2 R_{otm}) \end{cases} \quad (29)$$

Por fim, com o equacionamento pronto, montou-se uma matriz tridimensional, armazenando as "notas" atribuídas a cada uma das combinações de parâmetros, sendo que para aquelas que já estavam em instabilidade a profundidade de usinagem foi zerada, tornando-as inelegíveis para a otimização. Em posse da matriz bastou varre-la buscando o maior número, sendo que a posição dele dentro da mesma, indicaria a combinação de parâmetros o geraram, sendo linha as velocidades de corte, coluna as profundidade de usinagem e a profundidade os avanços.

3.4.3 Mapas de cor

A análise que se sucedeu é de caráter extremamente matemático, não havendo, para a estratégia de busca extensiva adotada, uma forma gráfica de observar a construção dos resultados. Dessa forma, utilizou-se mapas de cor com o intuito de tornar visual o comportamento próximo ao valor de interesse e a relação dos parâmetros tanto no espectro de estabilidade, quanto no espectro da otimização em si.

A limitação presente na visualização de uma mapa de cor se apresentava no fato deste método operar apenas com variações em duas dimensões. A solução adotada foi então a construção dos gráficos baseado em pares de variáveis, ou seja, fixou-se o valor de uma das variáveis e a imagem gerada nada mais é que um "corte" da matriz tridimensional, desse modo foi possível compreender a influência de cada um na otimização, bem como nas lacunas de instabilidade.

Os gráficos gerados foram feitos com incrementos na faixa de três casas decimais, o que demandou maior capacidade computacional, mas permitiu uma análise mais discretizada e criteriosa dos parâmetros em si. Tais imagens serão apresentadas na seção de resultados, uma vez que haverá discussão acerca da validade do que foi obtido e suas correlações.

4 RESULTADOS

Para avaliação dos resultados, deliberou-se que três observações seriam necessárias para validar e compreender completamente a ocorrência do fenômeno de *chatter*. O primeiro ponto foi considerar três diferentes pastilhas para a aplicação, sendo duas para acabamento (operação mais comum para trabalho com aço endurecido) e uma para aplicações intermediárias, sendo que para o material da peça de trabalho, não há grande oferta de pastilhas voltadas exclusivamente para o desbaste (fato oriundo das forças necessárias para tal operação), dessa forma, foi possível entender o impacto de diferentes faixas dos parâmetros centrais.

As pastilhas escolhidas foram todas da fabricante Sandvik (2022), uma vez que fornece as faixas recomendadas de atuação de cada uma. Considerou-se também, para simplificação do sistema, que a montagem no torno seria exatamente igual ao conjunto proposto por Fernandes (2021), uma vez que as pastilhas escolhidas permitem essa configuração considerando um respectivo porta-ferramenta e os ângulos de montagem não foram as variáveis focais deste estudo.

Segue na Tabela 5 o código de cada uma das pastilhas, bem como o intervalo recomendado para os parâmetros.

Tabela 5 – Dados das ferramentas utilizadas para simulação.

Nomenclatura	Código	v_c [m/min]	ap [mm]	f [mm/volta]
Acabamento 1	TR-DC1308S01020F 7015	(160 - 195)	(0,07 - 0,4)	(0,07 - 0,27)
Acabamento 2	TCGW110202T01020F 7525	(130 - 145)	(0,04 - 0,1)	(0,04 - 0,13)
Intermediária	RCGW1204MUED 7014	(220 - 290)	(0,15 - 1,8)	(0,07 - 0,57)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O segundo ponto foi realizar uma validação dos mapas de cor obtidos, pegando pontos em regiões de estabilidade e instabilidade e gerando o DLE de ambos, sendo possível verificar que o mapa de cor reflete o verdadeiro comportamento. O terceiro ponto é a efetiva avaliação dos mapas de cor para combinações de parâmetros em torno do ponto ótimo, estes que podem ser vistos na Tabela 6

Tabela 6 – Melhor combinação de parâmetros para cada ferramenta.

Pastilha	v_c [m/min]	a_p [mm]	f [mm/volta]	Nota da otimização (0 à 1)
Acabamento 1	195	0,4	0,13	0,644
Acabamento 2	145	0,1	0,124	0,524
Intermediária	290	1,8	0,28	0,629

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Em relação ao último aspecto, a estratégia adotada para contornar a limitação da apresentação em duas dimensões foi analisar os parâmetros em pares e com o intuito de agregar mais robustez, sendo que para cada dupla avaliada cinco posições foram observadas, a posição sobre o ponto ótimo e quatro posições adjacentes, no caso de pontos ótimos com valores maiores e menores analisou-se as duas posições posteriores e duas anteriores, já para os casos em que o ponto ótimo foi o maior valor, gerou-se os mapas para as quatro posições anteriores. Adotou-se também para estas considerações que a distância de posições entre os mapas seria de dois passos, uma vez que o incremento adotado é muito pequeno, não gerando diferença significativa do valor e conseqüentemente não sendo conclusivo analiticamente.

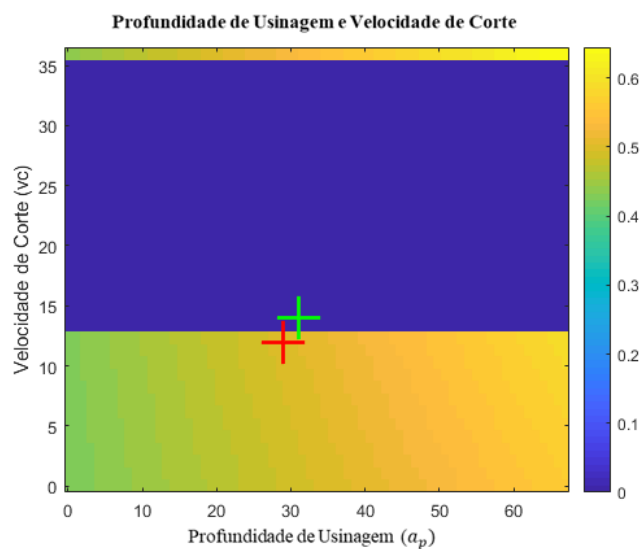
Para finalizar a análise dos resultados, serão estão abordados os valores dos pontos ótimos obtidos para cada uma das ferramentas e considerações acerca dos mesmos com a finalidade de debater a sobre a otimização e todas as definições feitas ao longo deste estudo.

4.1 Validação

Este tópico é de extrema importância e primeiramente definiu-se de maneira aleatória dois pontos nos mapas de cor sobre o ponto ótimo, sendo que um está na região de estabilidade (aplicável para a otimização), enquanto o outro está na região de instabilidade. Com o intuito de facilitar as considerações, o ponto em região de instabilidade, ou seja, com valor 0 na nota atribuída, será marcado com o alvo de cor verde, enquanto o na região estável, com o alvo de cor vermelha, como pode ser observado nas Figuras 12, 13 e 14. Seguem os cenários encontrados para cada uma das ferramentas.

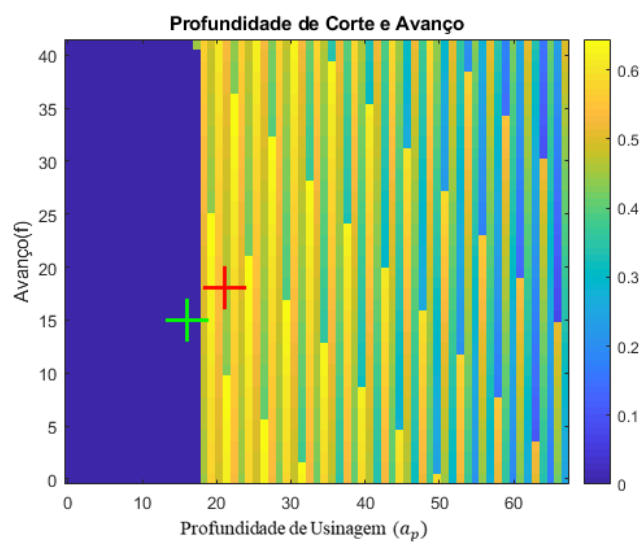
4.1.1 Ferramenta de acabamento 1 (TR-DC1308S01020F 7015)

Figura 12 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (avanço fixo)



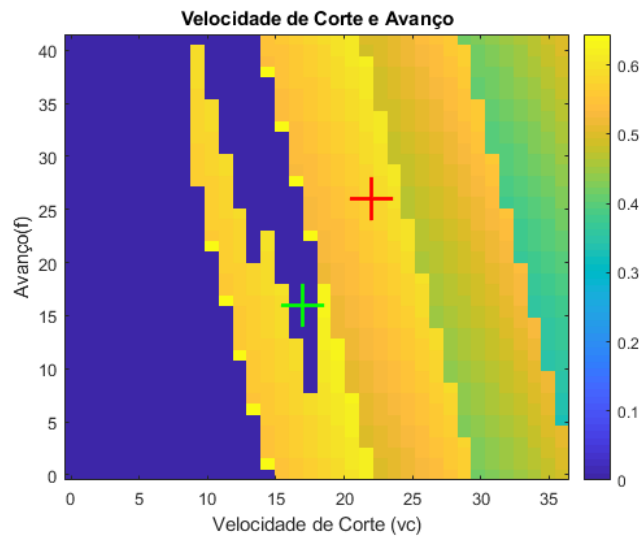
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 13 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (velocidade de corte fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

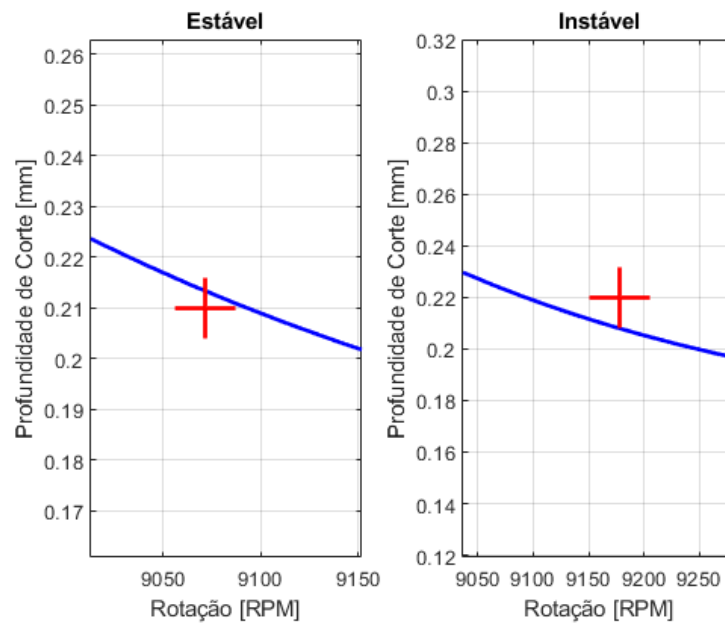
Figura 14 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (profundidade de usinagem fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

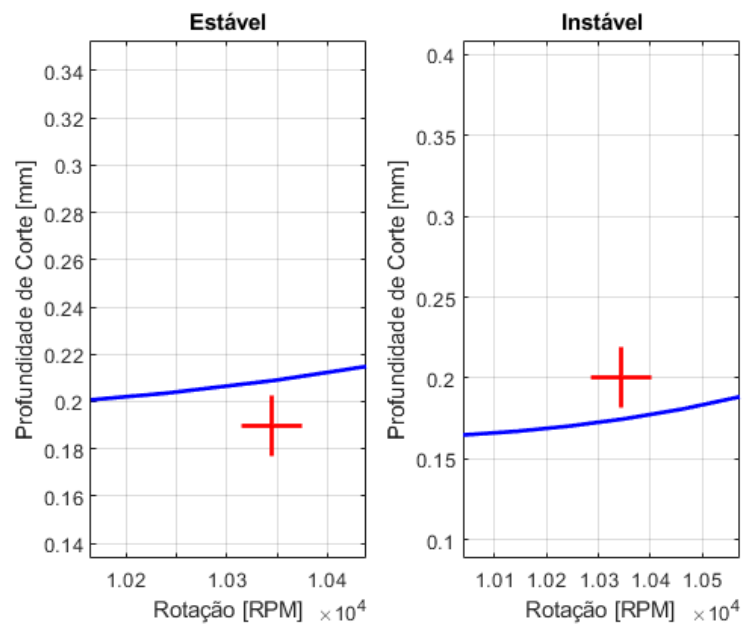
Uma vez que estipulou-se os pontos gerou-se o DLE para cada um deles, sendo que as Figuras 15, 16 e 17 referem-se às Figuras 12, 13 e 14, respectivamente.

Figura 15 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (avanço fixo)



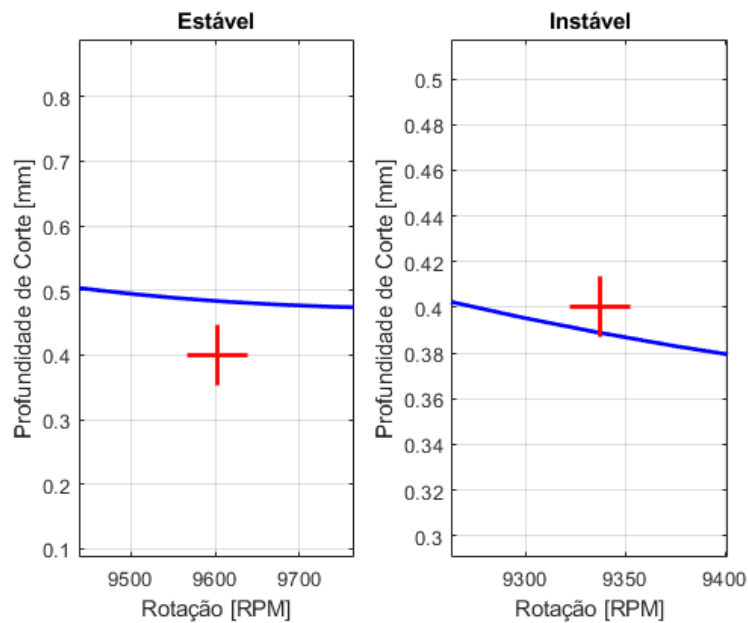
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 16 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (velocidade de corte fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

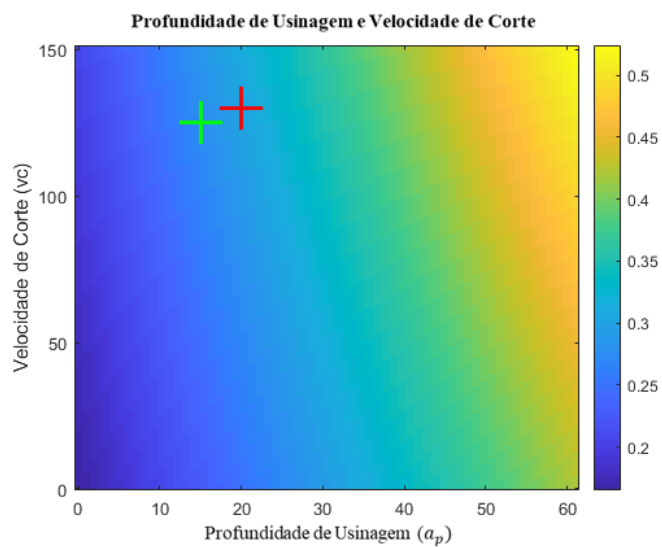
Figura 17 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (profundidade de usinagem fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

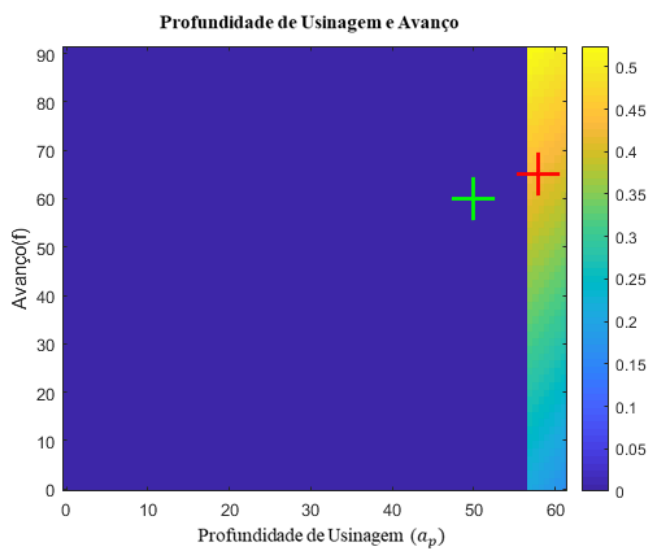
4.1.2 Ferramenta de acabamento 2 (TCGW110202T01020F 7525)

Figura 18 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (avanço fixo)



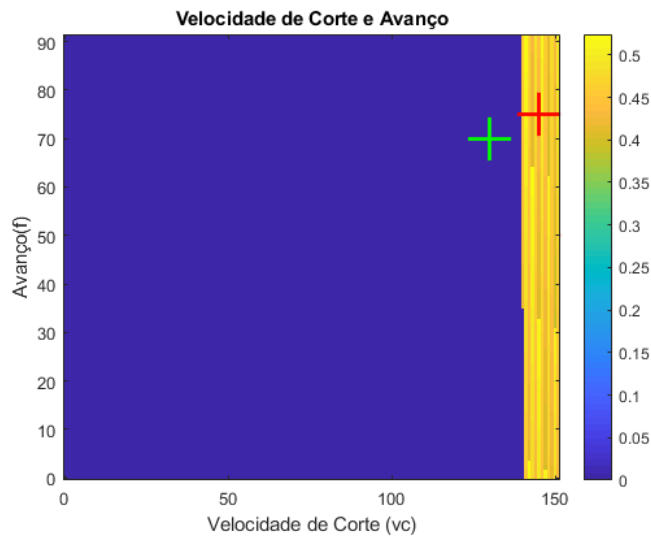
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 19 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (velocidade de corte fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

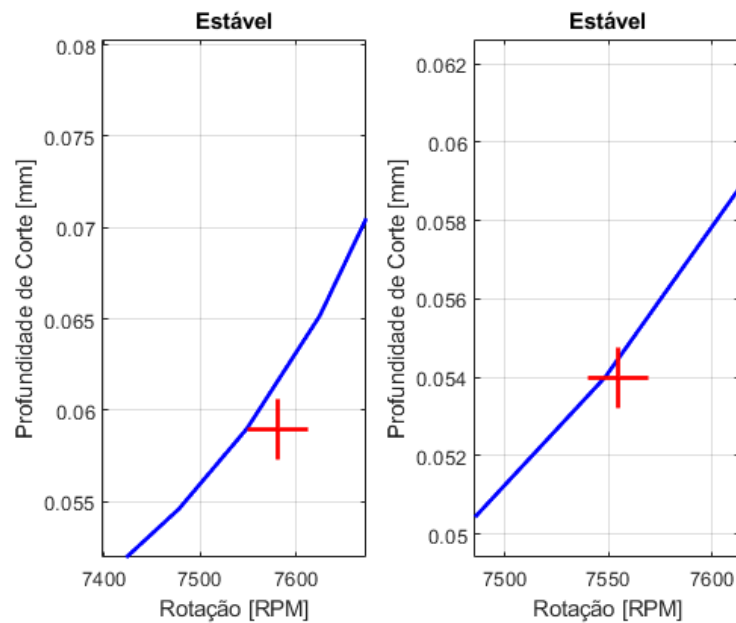
Figura 20 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (profundidade de usinagem fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

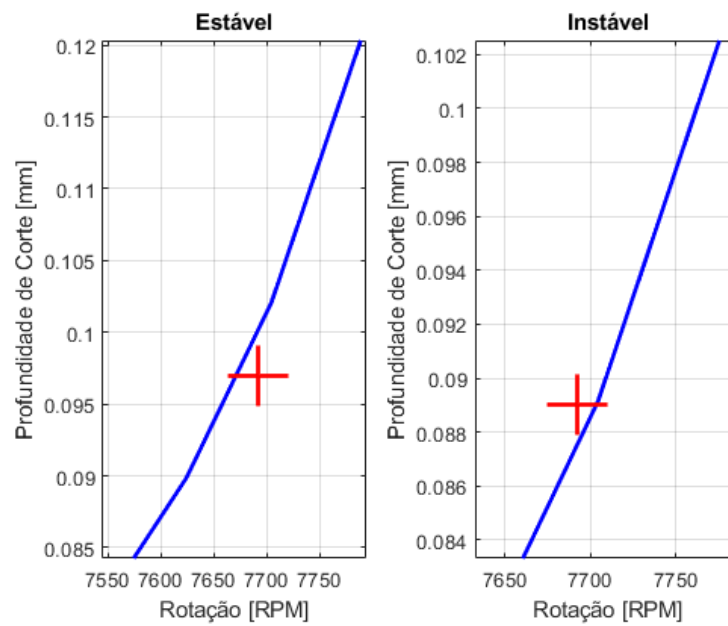
Uma vez que estipulou-se os pontos gerou-se o DLE para cada um deles, sendo que as Figuras 21, 22 e 23 referem-se às Figuras 18, 19 e 20, respectivamente.

Figura 21 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (avanço fixo)



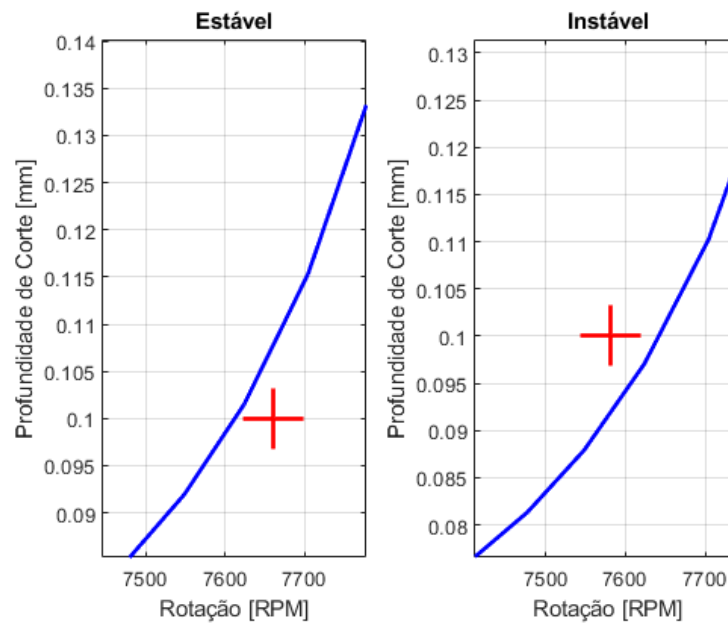
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 22 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (velocidade de corte fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

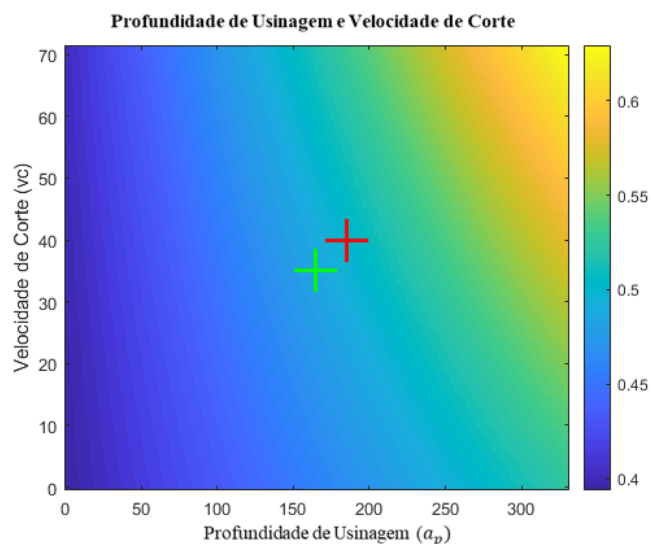
Figura 23 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (profundidade de usinagem fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

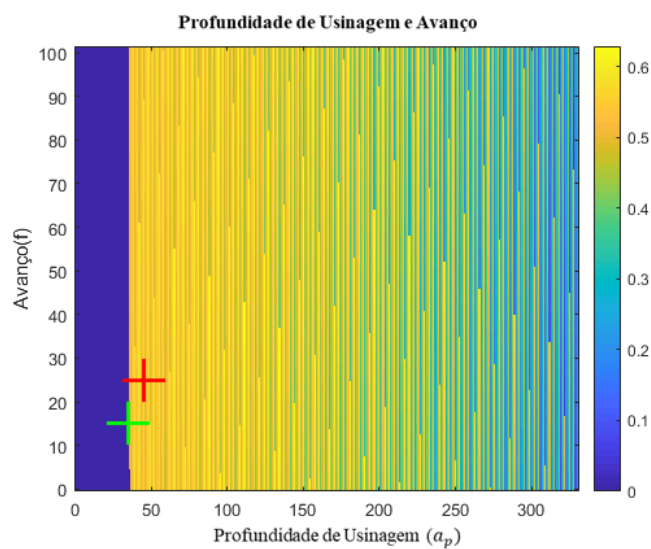
4.1.3 Ferramenta intermediária (RCGW1204MUED 7014)

Figura 24 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (avanço fixo)



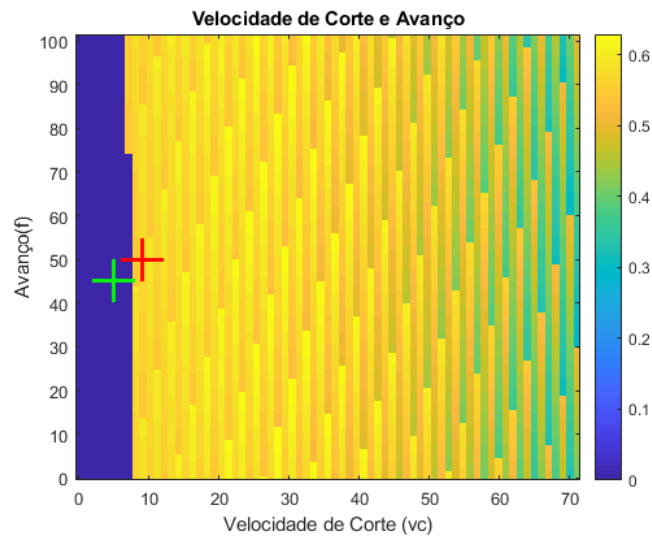
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 25 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (velocidade de corte fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

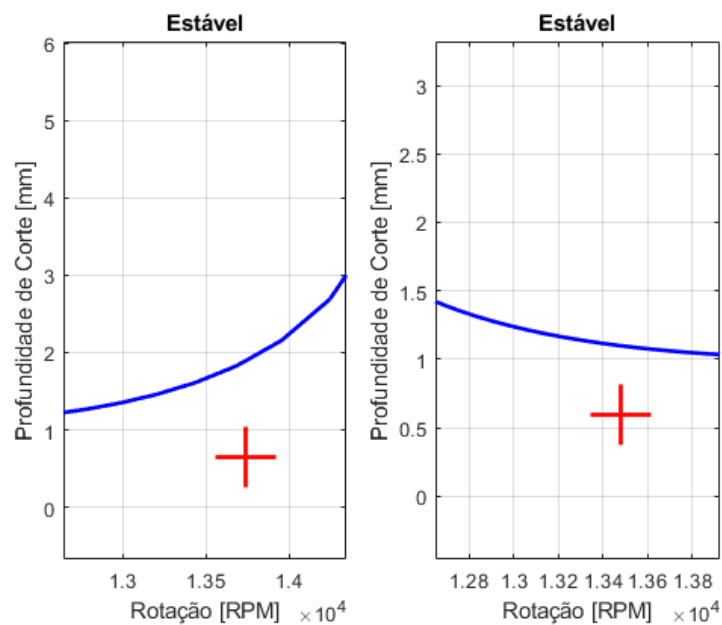
Figura 26 – Pontos escolhidos para validação do mapa de cor (profundidade de usinagem fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

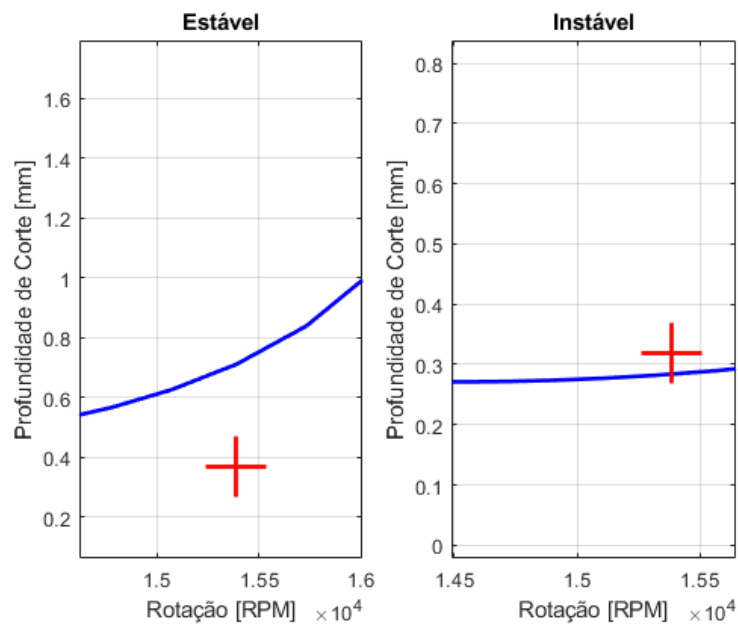
Uma vez que estipulou-se os pontos gerou-se o DLE para cada um deles, sendo que as Figuras 27, 28 e 29 referem-se às Figuras 24, 25 e 26, respectivamente.

Figura 27 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (avanço fixo)



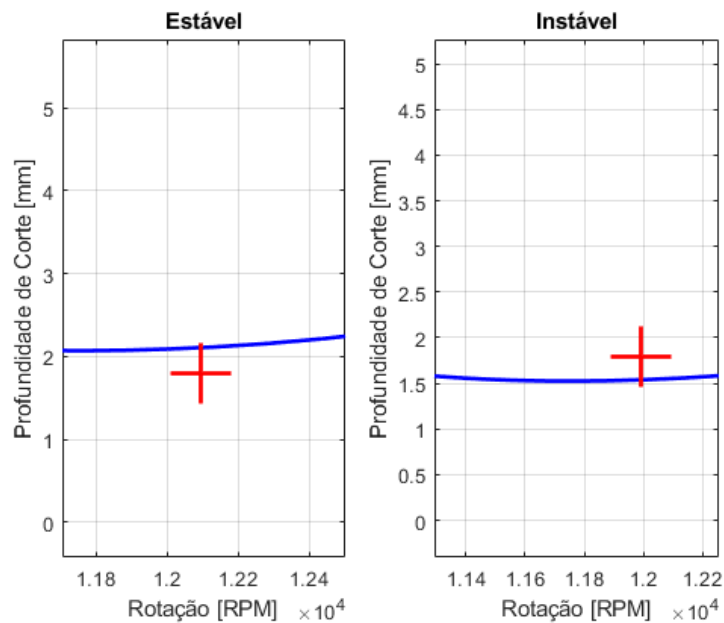
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 28 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (velocidade de corte fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 29 – Diagrama de Lóbulos de Estabilidade dos pontos estipulados (profundidade de usinagem fixa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.1.4 Considerações

Pode-se concluir que os mapas de cor são representativos para descrever a ocorrência de chatter no processo, uma vez que gerados os DLEs, todos os pontos foram coerentes

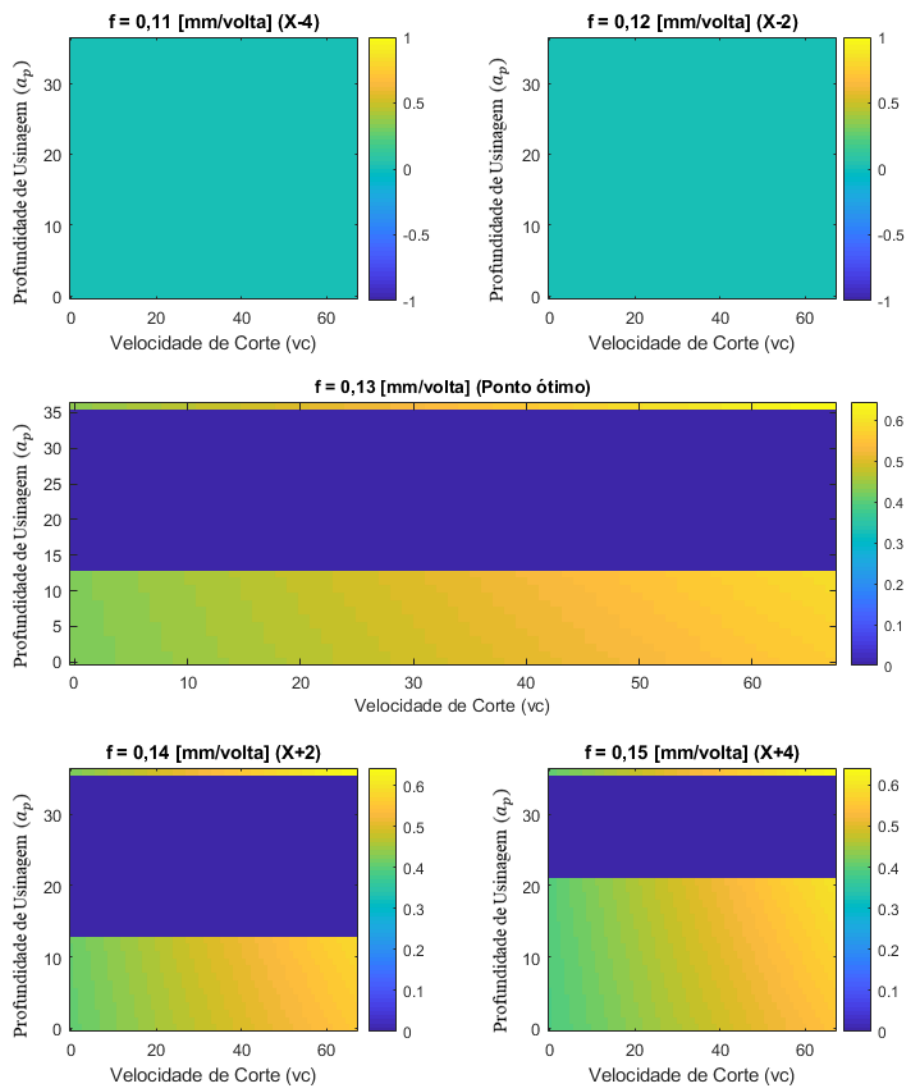
com o posicionamento esperado e todas as vezes muito próximos ao lóbulo, indicando uma suscetibilidade a mudar seu comportamento, algo que reforça a necessidade destas observações.

Sendo assim, foi possível seguir com a discussão e analisar os mapas de cor e discorrer sobre seu comportamento.

4.2 Profundidade de corte *versus* Velocidade de corte

Conforme introduzido no início deste capítulo, o intuito neste tópico é analisar através dos mapas de cor o comportamento da estabilidade ao longo da variação dos parâmetros. Seguem os resultados obtidos para cada uma das ferramentas simuladas.

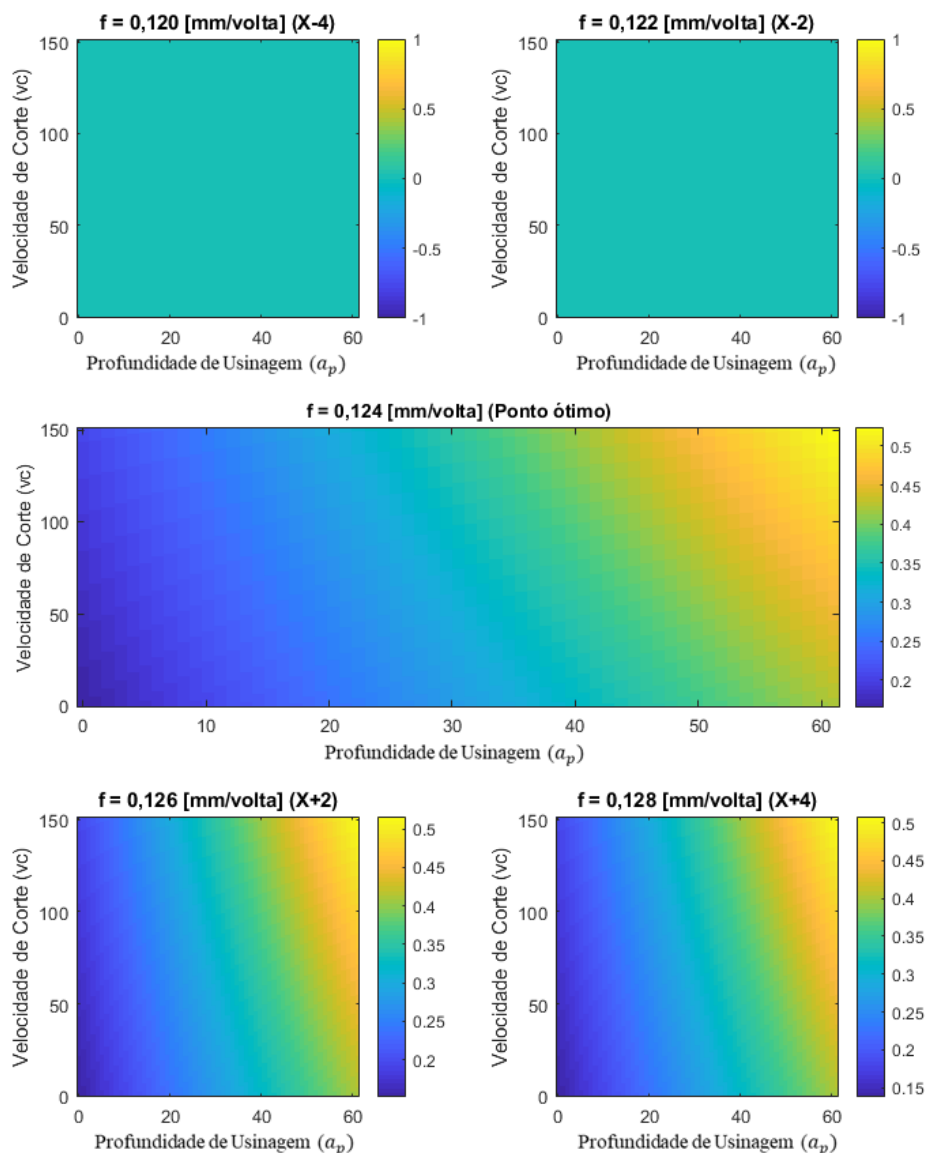
Figura 30 – Mapas de cor com avanço fixo - Ferramenta de acabamento 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Na figura acima é possível observar um comportamento muito relevante primeiramente do avanço, uma vez que ele gera instabilidade nas combinações anteriores ao ponto ótimo, bem como a profundidade de usinagem que cria uma faixa de instabilidade que pode ser facilmente observada, tornando aplicáveis somente os maiores valores possíveis da faixa e a maior parte dos valores mais baixos, o que é negativo no quesito de otimização de volume de cavaco removido.

Figura 31 – Mapas de cor com avanço fixo - Ferramenta de acabamento 2

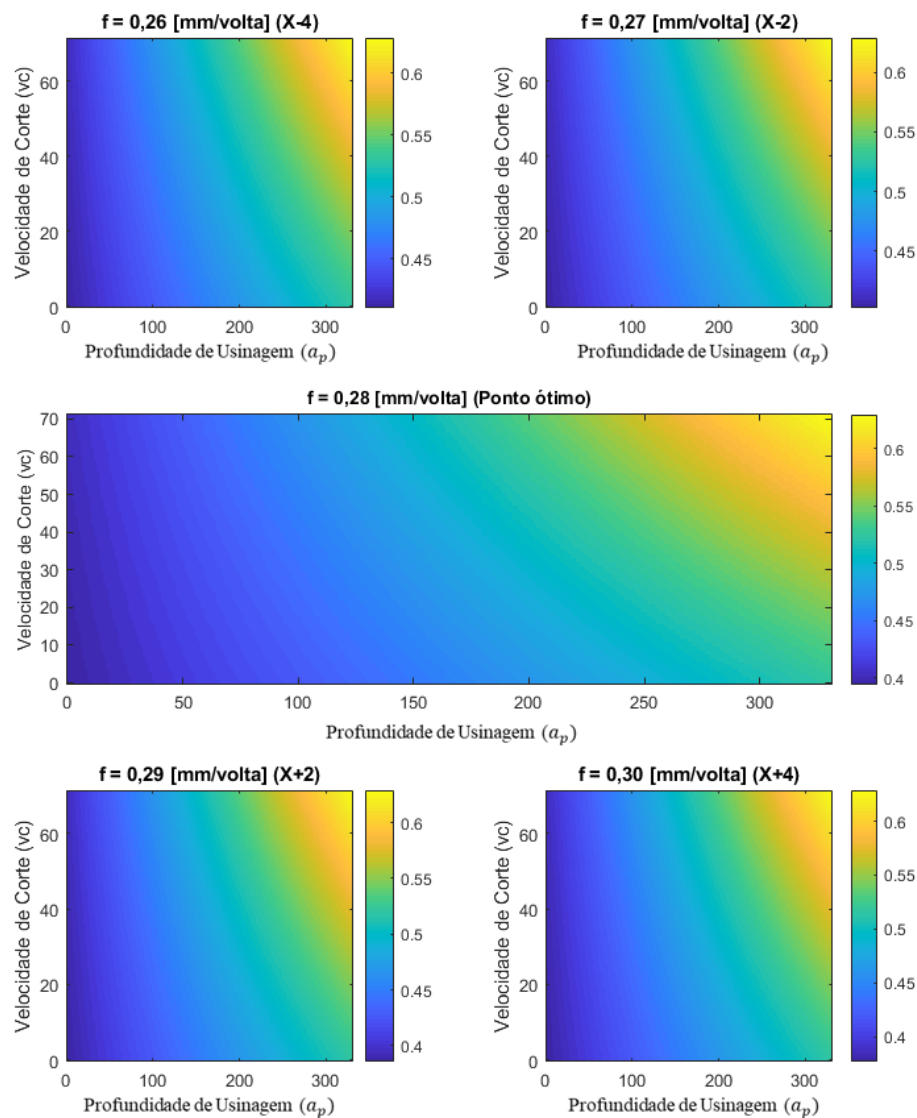


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Na Figura 31, temos uma visão mais ampla do que a já observada na validação, nesta faixa não fica clara a interferência da profundidade de usinagem, provavelmente

causada pela faixa escolhida abaixo da ferramenta anterior, porém se destaca novamente a interferência extremamente relevante do avanço, zerando os valores anteriores ao ponto ótimo.

Figura 32 – Mapas de cor com avanço fixo - Ferramenta intermediária



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Neste conjunto de mapas fica evidente que atingiu-se uma faixa muito interessante de aplicação, uma vez que não há restrições de instabilidade, mesmo com o dobro de avanço, o que geraria maiores forças de corte no sistema, se apresentando como um resultado contraintuitivo, mas justificável pela complexidade intrínseca do *chatter*.

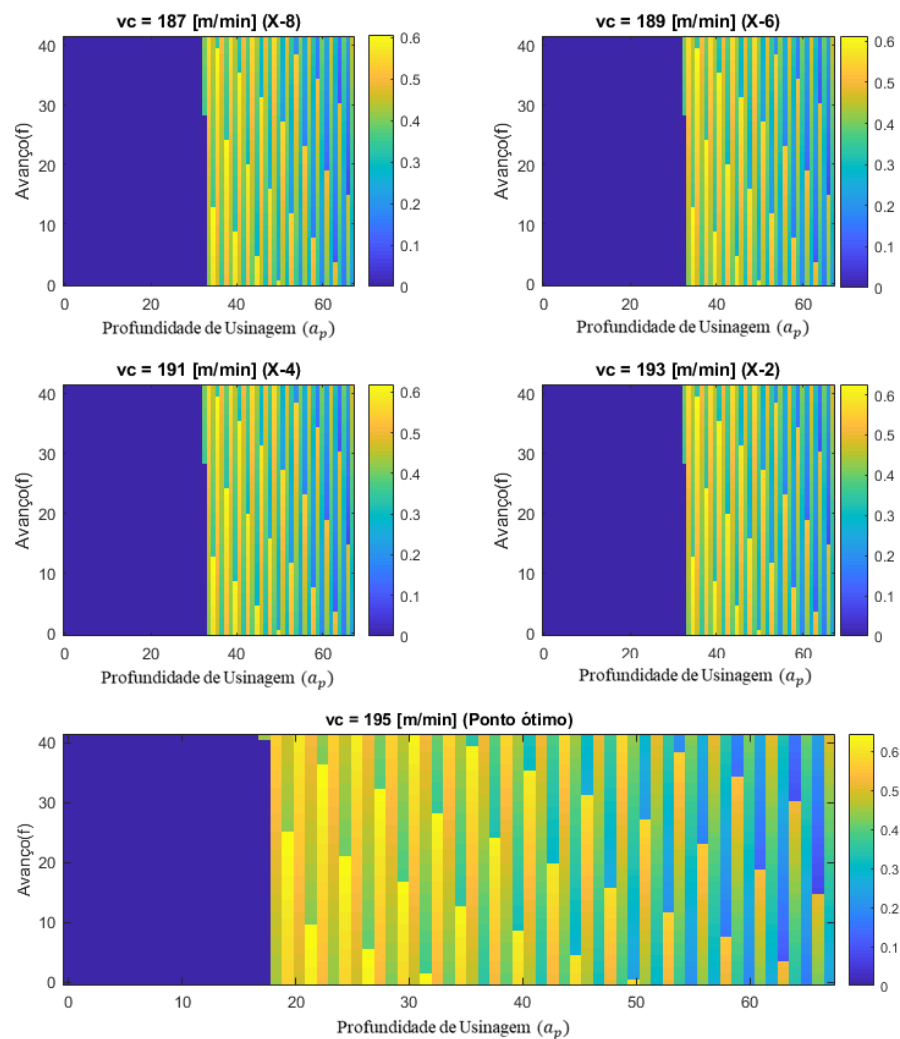
No geral, nesta primeira etapa de visualização, é possível concluir que profundidades de corte em faixas de acabamento tendem a gerar instabilidades, principalmente

quando operada em faixas decimais, sendo que centesimais não geraram impacto significativo, enquanto isso baixos avanços de mostraram mais impactantes na estabilidade.

4.3 Profundidade de corte *versus* Avanço

De forma similar à seção anterior, seguem os mapas de cor com a velocidade de corte fixa e suas respectivas considerações.

Figura 33 – Mapas de cor com velocidade de corte fixa - Ferramenta de acabamento 2

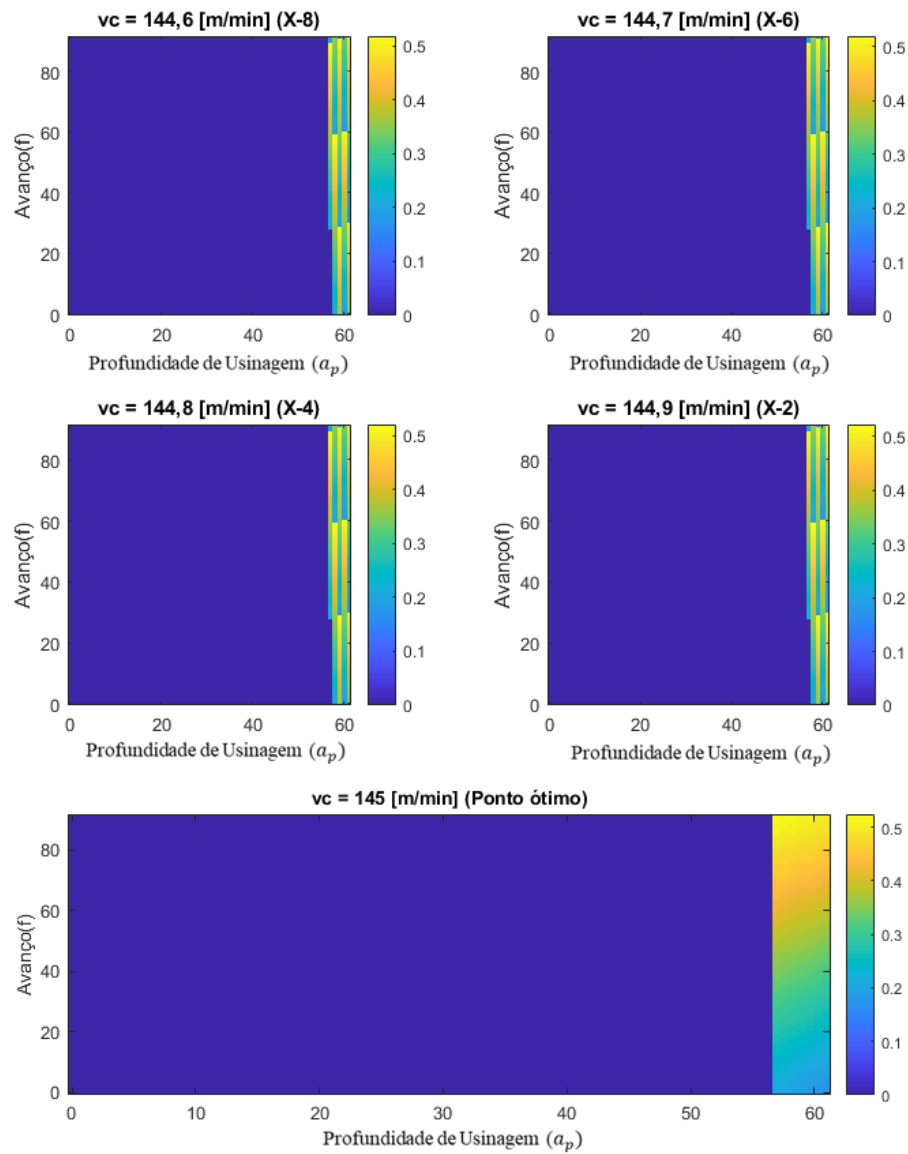


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Como esperado, apresentando coerência com a Figura 30, não é possível notar grande influência da variação da velocidade de corte nesta primeira ferramenta, sendo somente sobre o ponto ótimo a mudança da faixa de instabilidade que se torna mais curta.

Em contrapartida, a profundidade de usinagem é visivelmente relevante para alteração, novamente de maneira muito coerente com o que já havia sido observado.

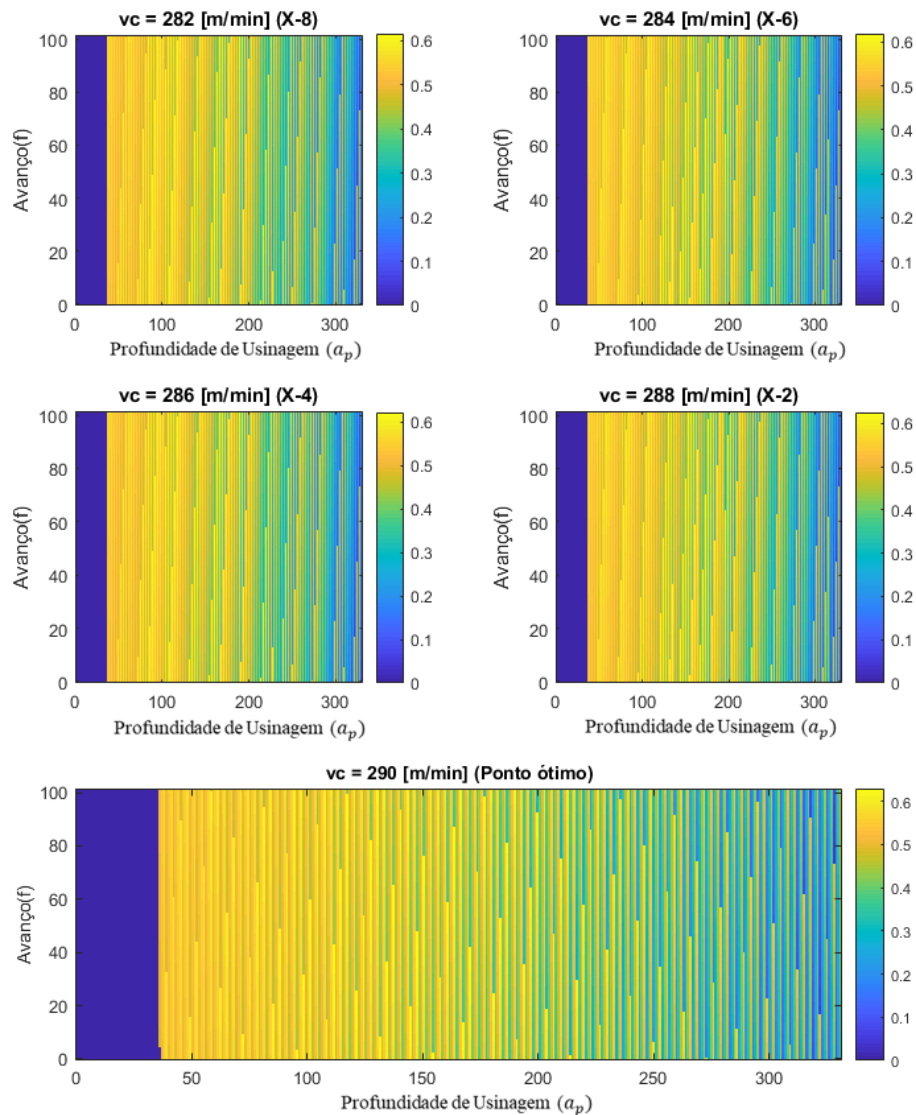
Figura 34 – Mapas de cor com velocidade de corte fixa - Ferramenta de acabamento 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O comportamento observado para esta segunda ferramenta de acabamento é muito similar a anterior, distinguindo apenas pela faixa de profundidades de corte, uma vez que não há estabilidade para a maioria das combinações observadas nesta visão 2D.

Figura 35 – Mapas de cor com velocidade de corte fixa - Ferramenta intermediária



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

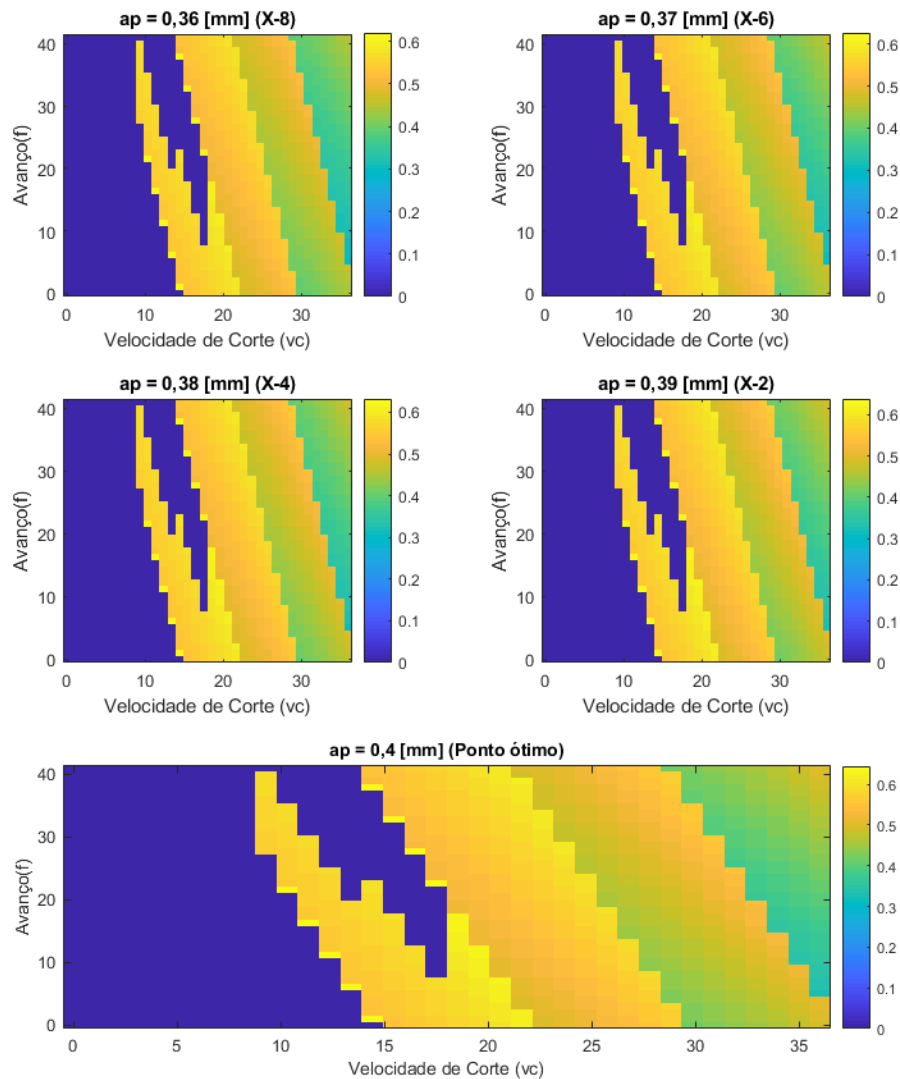
Ainda mantendo a falta de interferência da velocidade de corte, mas de maneira inversa a observada na Figura 34, temos na ferramenta intermediária estabilidade para a maioria das combinações com diferentes profundidades de corte.

Em suma, neste par de parâmetros é muito evidente a neutralidade da velocidade de corte para o fator de estabilidade, sendo ela responsável por trazer o ponto ótimo para um dos extremos, uma vez que torno elegíveis todos os valores de velocidades impostas. É importante frisar neste tópico, que apesar das diferenças de faixas de velocidade de corte propostas entre as ferramentas, elas ainda residem em valores consideravelmente altos, sendo que é muito comum na bibliografia a associação da ocorrência do chatter com baixas velocidades, dessa forma, é um resultado dentro do esperado de forma controlada.

4.4 Velocidade de corte *versus* Avanço

Analogamente ao apresentado nas sessões prévias, seguem os mapas de cor com a profundidade de usinagem fixa.

Figura 36 – Mapas de cor com profundidade de usinagem fixa - Ferramenta de acabamento 2

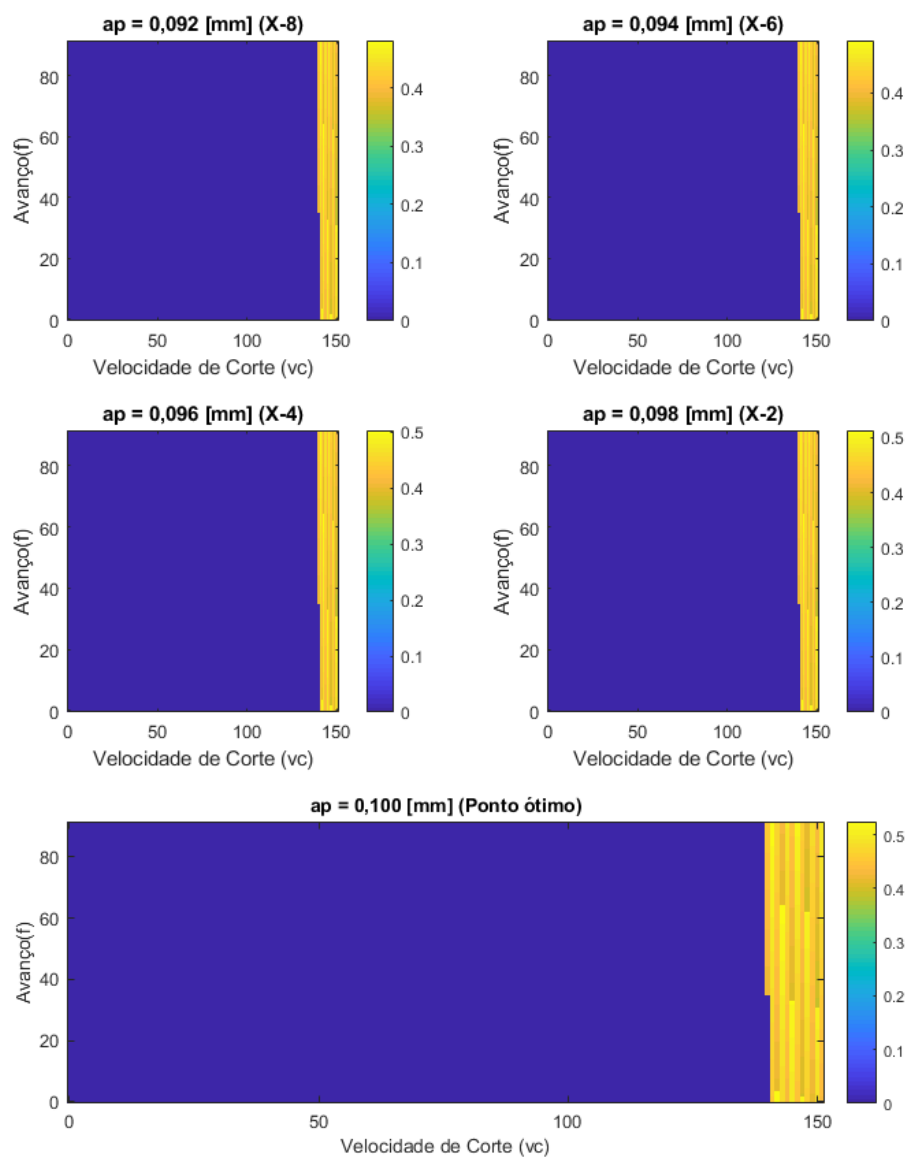


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A Figura 36 apresenta um comportamento muito interessante, ao contrário de todos os outros mapas de cor observados que mostravam um comportamento mais linear somente com pequenos saltos, esse apresenta um perfil de instabilidade mais angular e complexa, deixando claro que não haverá somente regiões bem definidas nas simulações possíveis.

No geral, observa-se que o a instabilidade estará sempre atrelada ao par de parâmetros, evidenciando a dificuldade da análise isolada dos mesmos e conseqüentemente, a falta de confiabilidade nas conclusões tomadas sem uma simulação de cada caso, como proposto o presente estudo.

Figura 37 – Mapas de cor com profundidade de usinagem fixa - Ferramenta de acabamento 2

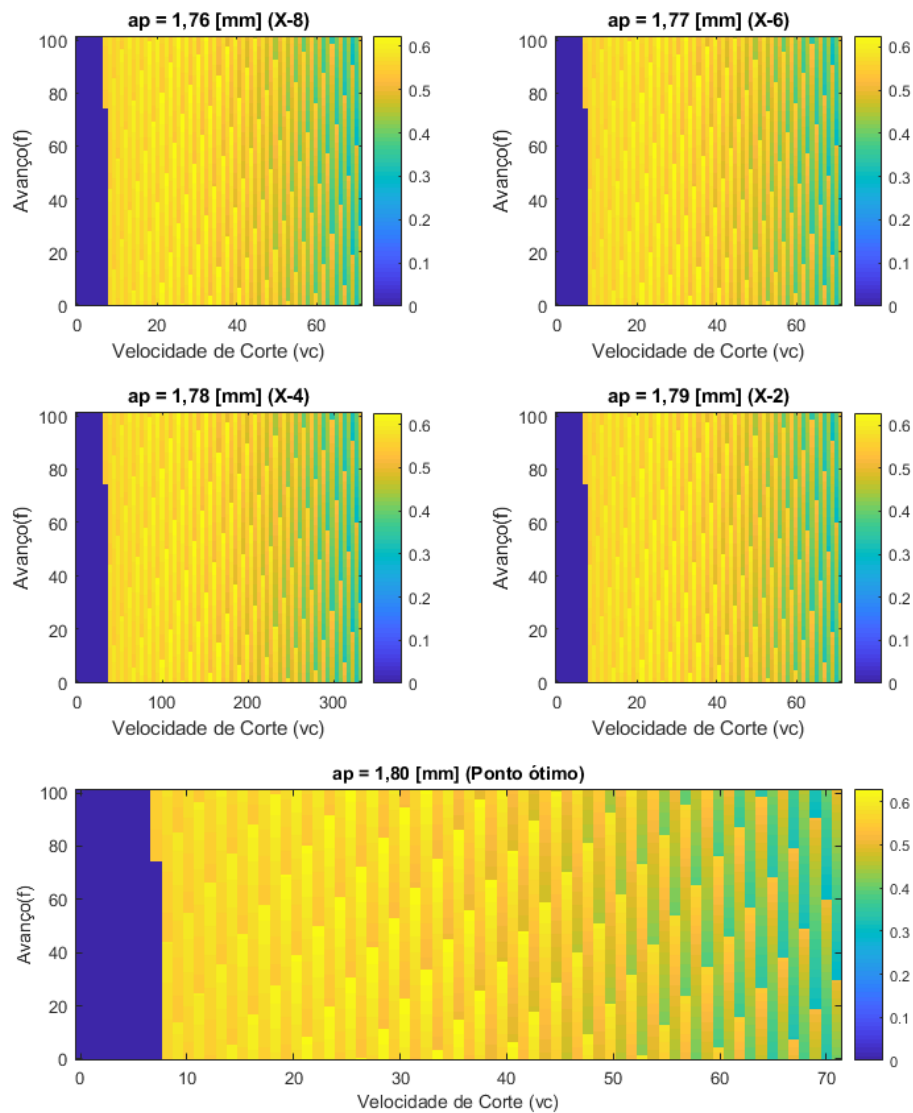


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Similar ao observado com a velocidade de corte constante, é possível observar que há uma pequena faixa de combinações, principalmente com as altas velocidades de corte, onde há de fato a estabilidade, o que convém para a maximização de volume de material

removido. Enquanto ao avanço, não há percepção clara do seu impacto por este ângulo.

Figura 38 – Mapas de cor com profundidade de usinagem fixa - Ferramenta intermediária



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

As Figuras 37 e 38, são um ótimo exemplo da necessidade de visualizar os três pares possíveis de variáveis, pois ao contrário do abordado na seção anterior, é visível em toda a faixa simulada o impacto da velocidade de corte, algo que não é evidente quando ela está fixa próxima ao ponto ótimo, pois ele está no maior valor e coincidentemente só revela a área de estabilidade.

4.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os resultados e as discussões recorrentes. Foi possível observar a dificuldade na escolha de faixa de parâmetros isoladamente, ao contrário do objetivo inicial deste estudo, se faz necessária a análise sempre em conjunto, uma vez que os DLEs são extremamente sensíveis às variações e nem sempre temos pontos estáveis necessariamente distantes do limite de estabilidade. Comprovou-se então o valor de uma busca extensiva para o contexto prático, pois dá robustez para a engenharia de manufatura para considerar todos os fatores relevantes sem perder o *chatter* de vista.

Por fim, um conjunto de considerações sobre o efeito de cada um dos parâmetros observados são possíveis:

- Avanço - se mostrou o fator mais relevante para a estabilidade e para a otimização, pois gera grandes regiões de instabilidade por si só e tem seus valores ótimos formados pelos extremos das faixas. Valores menores apresentaram maior estabilidade, o que está ligado ao contato entre ferramenta e peça que é muito maior com o acréscimo do avanço, gerando uma aplicação de forças mais constante, o que é menos propício para o surgimento do *chatter*
- Profundidade de corte - Este já apresenta um resultado menos intuitivo, uma vez que maiores regiões de instabilidade foram observadas em valores menores (acabamento) o que pode ser reflexo novamente da menor superfície de contato e forças do processo quando em acabamento, sendo um contexto ideal ao surgimento de um fenômeno vibratório.
- Velocidade de corte - Se mostrou muito relevante na combinação com o avanço, criando perfis não lineares de instabilidade, o que é essencial de ser observado e reforça a necessidade deste estudo. Isoladamente a velocidade não apresentou grande relevância, criando sim regiões de instabilidade, mas não nos maiores valores da faixa, o que está muito atrelado ao fenômeno da ocorrência do *chatter* em baixas rotações dada a maior dificuldade no cisalhamento do cavaco e conseqüentemente a um perfil de forças com maior dispersão.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo possui como foco principal a análise de estabilidade e otimização dos parâmetros chave do processo de torneamento por meio de modelagem teórica com o intuito de dar fim prático no *setup* de máquinas operatrizes muito presentes no contexto fabril. A modelagem foi toda desenvolvida em MATLAB por meio de de uma modelagem dinâmica de seis graus de liberdade, a análise de estabilidade foi desenvolvida pelo método dos Diagramas de Lóbulos de Estabilidade e para a otimização as funções custos foram atreladas a fatores de volume de material removido e rugosidade superficial teórica, além disso, foram aplicadas no escopo de uma busca extensiva e com notas parametrizadas para averiguação uma a uma das combinações possíveis. Todo o desenvolvimento foi feito na consideração de uma peça de trabalho proposta por Gandia (2020), que se trata um corpo de prova de aço endurecido.

A modelagem dinâmica se mostrou suficiente para descrever os fenômenos envolvidos no processo, isso sem comprometer a capacidade computacional, o que deve ser ponderado quando busca-se uma aplicação prática, é capaz também de ser incrementada mediante levantamentos empíricos de variáveis, o que no presente estudo foram fixados mediante à bibliografia adotada.

Enquanto à elaboração dos Diagramas de Lóbulos de Estabilidade, a modelagem se mostrou muito coerente, bem como sua transcrição de um formato completamente visual e gráfico para uma abordagem simplesmente matemática, conseguindo transportar a comparação unitária, normalmente desenvolvida, para uma análise numérica direta e em massa, permitindo o formato de busca extensiva sem comprometer a fidelidade do método.

Em relação a otimização, o resultado não se mostrou tão efetivo quanto desejado, uma vez que em todas as ferramentas apresentadas os pontos ótimos tem sua velocidade e profundidade de usinagem no valor máximo possível, isto é consistente em relação ao modelo do DLE, mas representa uma escolha incorreta das funções custo, uma vez que não reflete na totalidade a complexidade do processo de torneamento, onde sempre há o acréscimo de uma característica de interesse em detrimento de outra. Porém, considerando os fatores relevantes escolhidos, a otimização se mostrou consistente e válida, havendo apenas alguns pontos a serem sugeridos para futuros estudos.

Os resultados obtidos comprovam então a relevância de todos os parâmetros e principalmente de suas combinações, principalmente do avanço no contexto abordado e da velocidade quando em menores rotações, porém sempre se fazendo necessária a varredura das combinações possíveis para garantir a correta escolha. Por fim, é importante salientar que o presente estudo considerou condições específicas, sendo esperado resultados diferentes mediante a aplicação de materiais e condições distintas.

Concluiu-se que há viabilidade na construção de um modelo mais prático orientado

à busca extensiva que seja capaz de refletir a utilidade deste tipo de análise, bem como a possibilidade de uma simples implementação no contexto prático de operações de usinagem, obtendo então uma vantagem no chão de fábrica no momento de validação de conjuntos de parâmetros.

5.1 Trabalhos futuros

Para ampliar o estudo desse tema, trabalhos futuros podem ter foco em outros aspectos além dos apresentados nesse trabalho, tais como:

- Considerar diferentes configurações de torno, tanto no aspecto de valores de rigidez que podem torna-lo mais suscetível a ocorrência do *chatter*, quanto às constantes de forças empíricas F_f e F_r , uma vez que trazem um comportamento completamente distinto aos limites de estabilidade;
- Considerar diferentes peças de trabalho, tanto em diâmetro, quanto em material, uma vez que tem impacto direto na rigidez do processo e nas ferramentas a serem utilizadas, o que pode ser muito viável para analisar se há consistência nos comportamento observado nas faixas propostas neste estudo quando em diferentes aplicações;
- Construir mais funções custos a fim de priorizar outros fatores relevantes ao processo de torneamento, tais como: temperatura, potência demandada e desgaste de ferramenta.
- Trazer novas abordagens da modelagem dinâmica a fim de tornar o modelo cada vez mais fiel ao processo prático;
- Realizar testes empíricos para comprovação da validade da modelam.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E.; MIGUEL, B.; PIMENTEL, D. Financialization against industrialization: a regulationist approach of the brazilian paradox. **Revue de la régulation**, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.4000/regulation.9604>>.
- BOLLINGER, J. G.; GEIGER, G. Analysis of the static and dynamic behavior of lathe spindles. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 3, p. 193–209, 1964. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0020-7357\(64\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0020-7357(64)90010-1)>.
- BUDAK, E.; ALTINTAS, Y. Analytical prediction of chatter stability in milling—part i: General formulation. **Journal of Dynamic Systems**, v. 120, n. 1, p. 22–30, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2801317>>.
- BUDAK, E.; OZLU, E. Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations—part i: Model development. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 126, n. 4, p. 726–732, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2738118>>.
- FERNANDES, M. Análise de "chatter" no torneamento de aço endurecido utilizando o método de elaboração de diagramas de lóbulos de estabilidade. **Universidade Federal de São Carlos**, 2021.
- FERRARESI, D. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. [S.l.]: Editora Blucher, 1970. v. 1.
- GANDIA, G. Investigação experimental da influência de parâmetros de usinagem sobre a resistência mecânica de um aço ferramenta endurecido. **Universidade Federal de São Carlos**, n. 1, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14632>>.
- GARG D. P., . A. G. L. Structural vibration suppression via active/passive techniques. **Journal of Sound and Vibration**, v. 262, n. 3, p. 739–751, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0022-460x\(03\)00121-4](https://doi.org/10.1016/s0022-460x(03)00121-4)>.
- HADRABA, P.; HADAS, Z. Dynamic analysis of multispindle lathe. **International Conference Mechatronics**, p. 321–329, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-65960-2_40>.
- HAGOOD, N. W.; FLOTOW, A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. **Journal of Sound and Vibration**, v. 146, n. 2, p. 243–268, 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000300007>>.
- JEN, M. U.; MAGRAB, E. B. The dynamic interaction of the cutting process, workpiece, and lathe's structure in facing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 118, n. 3, p. 348, 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.2831036>>.
- LIU, H. *et al.* Nonlinear dynamic analysis of cnc lathe spindle-bearing system considering thermal effect. **Nonlinear Dyn**, v. 105, p. 131–166, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11071-021-06613-x>>.
- MACHADO, A. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. [S.l.]: EDGARD BLÜCHER LTDA, 2009. v. 1.

MINIS, I.; YANUSHEVSKY, R. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 115, n. 1, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2901633>>.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **Internacional Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 363–376, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>>.

QUINTANA, G. *et al.* Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 49, n. 3-4, p. 203–211, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.11.008>>.

SANDVIK, C. **Pastilha CoroTurn® TR para torneamento TR-DC1308S01020F 7015.** 2022. Url<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=TR-DC1308S01020F>

SARETTI, G. G.; SHIKI, S. B. Stability analysis on turning processes using a simplified 3-dof model. **International Congress os Mechanical Engineering**, v. 25, p. 20–25, 2019.

TYLER, W. G. Brazilian industrialization and industrial policies: A survey. **World Development**, v. 10-11, n. 4, p. 863–882, 1976. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0305-750X\(76\)90077-2](https://doi.org/10.1016/0305-750X(76)90077-2)>.

VENTER, G. S. Controle ativo e passivo para redução de *chatter* em processos de torneamento utilizando atuadores piezelétricos. **Universidade de São Paulo**, 2019.

YANG, Y.; MUÑOYA, J.; ALTINTAS, Y. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling. **Optimization of multiple tuned mass dampers to suppress machine tool chatter**, v. 50, n. 9, p. 834–842, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.04.011>>.

YUSOFF, A. R. *et al.* Literature review of optimization techniques for chatter supression in machining. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, n. 1, p. 47–61, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.15282/jmes.1.2011.5.0005>>.

Apêndices

APÊNDICE A – Código da construção dos DLEs e otimização

```

clc
clear all
close all

%% VARIÁVEIS
c = 45; %[Graus] - RETIRADO DO ESTUDO DO GANDIA
crad = deg2rad(c); %[rad]

% DADOS DO SARETTI
m1=0.09; %[kg]
kmolax1=2.3*10^6; %[N/m]
kmolay1=2.3*10^6; %[N/m]
cx1=2.3; %[N.s/m]
cy1=2.3; %[N.s/m]

m2=85; %[kg]
kmolax2=2.1*10^8; %[N/m]
kmolay2=2.1*10^7; %[N/m]
cx2=2.1*10^2; %[N.s/m]
cy2=2.1*10^1; %[N.s/m]

m3=274; %[kg]
kmolax3=4.58*10^9; %[N/m]
kmolay3=4.58*10^8; %[N/m]
cx3=4.58*10^2; %[N.s/m]
cy3=4.58*10^2; %[N.s/m]

omeganx1 = (kmolax1/m1)^(1/2); %[rad/s]
omegany1 = (kmolay1/m1)^(1/2); %[rad/s]
zetax1 = cx1/(2*m1*omeganx1);
zetay1 = cy1/(2*m1*omegany1);
Kx1 = kmolax1^(-1); %[m/N]
Ky1 = kmolay1^(-1); %[m/N]
omegadx1 = omeganx1*((1-(zetax1^2))^(1/2)); %[rad/s]
omegady1 = omegany1*((1-(zetay1^2))^(1/2)); %[rad/s]

omeganx2 = (kmolax2/m2)^(1/2); %[rad/s]
omegany2 = (kmolay2/m2)^(1/2); %[rad/s]
zetax2 = cx2/(2*m2*omeganx2);
zetay2 = cy2/(2*m2*omegany2);
Kx2 = kmolax2^(-1); %[m/N]
Ky2 = kmolay2^(-1); %[m/N]
omegadx2 = omeganx2*((1-(zetax2^2))^(1/2)); %[rad/s]

```

```
omegady2 = omegany2*((1-(zetay2^2))^(1/2)); %[rad/s]
```

```
omeganx3 = (kmolax3/m3)^(1/2); %[rad/s]
```

```
omegany3 = (kmolay3/m3)^(1/2); %[rad/s]
```

```
zetax3 = cx3/(2*m3*omeganx3);
```

```
zetay3 = cy3/(2*m3*omegany3);
```

```
Kx3 = kmolax3^(-1); %[m/N]
```

```
Ky3 = kmolay3^(-1); %[m/N]
```

```
omegadx3 = omeganx3*((1-(zetax3^2))^(1/2)); %[rad/s]
```

```
omegady3 = omegany3*((1-(zetay3^2))^(1/2)); %[rad/s]
```

```
omega=[0:1:10000]; %[rad/s]
```

```
%% FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA
```

```
for j=1:length(omega)
```

```
s(j)=1i*omega(j); %[rad/s]
```

```
Gx11(j) = (m1*(s(j)^2)+(cx1*s(j))+kmolax1); %[N/m]
```

```
Gx12(j) = (cx1*s(j))+kmolax1; %[N/m]
```

```
Gx22(j) = (m2*(s(j)^2)+((cx1+cx2)*s(j))+kmolax1 +kmolax2); %[N/m]
```

```
Gx23(j) = (cx2*s(j))+kmolax2; %[N/m]
```

```
Gx33(j) = (m3*(s(j)^2)+((cx2+cx3)*s(j))+kmolax2 +kmolax3); %[N/m]
```

```
Gy11(j) = (m1*(s(j)^2)+(cy1*s(j))+kmolay1); %[N/m]
```

```
Gy12(j) = (cy1*s(j))+kmolay1; %[N/m]
```

```
Gy22(j) = (m2*(s(j)^2)+((cy1+cy2)*s(j))+kmolay1 +kmolay2); %[N/m]
```

```
Gy23(j) = (cy2*s(j))+kmolay2; %[N/m]
```

```
Gy33(j) = (m3*(s(j)^2)+((cy2+cy3)*s(j))+kmolay2 +kmolay3); %[N/m]
```

```
Ftx23(j) = Gx23(j)/Gx33(j);
```

```
Fty23(j) = Gy23(j)/Gy33(j);
```

```
Ftx12(j) = Gx12(j)/(Gx22(j) - (Gx23(j)*Ftx23(j)));
```

```
Fty12(j) = Gy12(j)/(Gy22(j) - (Gy23(j)*Fty23(j)));
```

```
% APÊNDICE A. Código Octave para Obtenção dos Gráficos de Função de Transferência
```

```
GxxT1(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));
```

```
GyyT1(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]
```

```
GxxT2(j) = Kx1/((1-((omega(j)/omeganx1)^2))+1i*(2*zetax1*omega(j)/omeganx1));
```

```
GyyT2(j) = Ky1/((1-((omega(j)/omegany1)^2))+1i*(2*zetay1*omega(j)/omegany1)); %[m/N]
```

```
GxxT3(j) = 1/(Gx11(j) - Gx12(j)*Ftx12(j)); %[m/N]
```

```
GyyT3(j) = 1/(Gy11(j) - Gy12(j)*Fty12(j)); %[m/N]
```

```
GxxT4(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3)); %[m/N]
```

```
GyyT4(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]
```

```
GxxT5(j) = Kx1/((1-((omega(j)/omeganx1)^2))+1i*(2*zetax1*omega(j)/omeganx1)); %[m/N]
```

```
GyyT5(j) = Ky1/((1-((omega(j)/omegany1)^2))+1i*(2*zetay1*omega(j)/omegany1)); %[m/N]
```

```
Gxx(j) = 1/(Gx11(j) - Gx12(j)*Ftx12(j)); %[m/N]
```

```
Gyy(j) = 1/(Gy11(j) - Gy12(j)*Fty12(j)); %[m/N]
```

```
end
```

```
% DESCRIÇÃO DO SISTEMA
```

%CONDIÇÕES DEFINIDAS

Ff=35; *%[N] - Valores empíricos*

Fr=98; *%[N] - Valores empíricos*

D=6; *%mm - Corpo de prova*

%AUXILIARES DE INCREMENTO

aux2 = 1;

aux3 = 1;

aux4 = 1;

aux5 = 1;

%PESO E DADOS DA OTIMIZAÇÃO

p1 = 0.5;

p2 = 0.5;

re = 0.8; *%raio de ponta (SANDVIK)*

nmax=1000*195/(pi*D);

nmin=1000*160/(pi*D);

Qmax = 0.27*195*0.4*nmax;

Qmin = 0.07*160*0.07*nmin;

deltaQ = Qmax - Qmin;

hmax = ((0.27)^2)/(8*re);

hmin = ((0.07)^2)/(8*re);

deltah = hmax - hmin;

%% CONSTRUÇÃO DO DLE

omega=[1200:0.5:1400]; *%[rad/s]*

for f=0.07:0.005:0.27

for vc=160:1:195

for ap=0.07:0.005:0.4

 Kf = Ff/(f*ap); *%[N/m^2]*

 Kr = Fr/(f*ap); *%[N/m^2]*

 n1=1000*vc/(pi*D);

for k=1:1:15

for j=3:length(omega)

Gxx(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));

Gyy(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); *%[m/N]*

% Auto Valor

Lambda (j) = -cos(crad)/((Gxx(j))*((Kf*(cos(crad)^2))-Kr*sin(crad)*cos(crad)))+(Gyy(j))*((Kf*(sin(c

LambdaR (j) = real(Lambda(j));

LambdaI (j)= imag(Lambda(j));

kappa (j) = LambdaI(j)/LambdaR(j);

% Profundidade de Corte Máxima

blim(j)=-0.5*LambdaR(j)*(1+(kappa(j)^2))/1000;

```

% Rotação do eixo
phi(j)=atan(kappa(j));
eta(j)=pi()-(2*phi(j));
tau(j) =(eta(j)+(2*k*pi()))/omega(j);
n(j) = 60/tau(j);

% Filtragem de resultados
if blim(j)<0
blim(j) = 100;
end

% Medidor de distância n e n1
if abs(n1-n(j-1))<abs(n1-n(j-2))
    if abs(n1-n(j))>abs(n1-n(j-1))
        pos = j-1;
    end
end

end

%VARIAÇÃO DE K

% Formar vetor de blim para todo K
blimk(aux2) = blim(pos);
aux2 = aux2+1;

end

%VARIAÇÃO DE AP

% Formar vetor de blim para toda AP

blimap(aux3)= min(blimk);

if blimap(aux3)<ap
    allap(aux3) = 0;
else
    allap(aux3) = ap;
end

%Criar matriz para otimização
Q = ap*vc*f;
h = (f^2)/(8*re);

if allap(aux3)==0
    aux1=0;
else

```

```
    aux1=1;
end

otm(aux3) = (aux1*p1*((Q-Qmin)/deltaQ))+(aux1*p2*((hmax-h)/deltah));
aux3 = aux3+1;
aux2 = 1;
clear blimk aux1

end

OTM2D(aux4,:) = otm;
aux4 = aux4+1;
dim2 = aux3-1;
aux3 = 1;
clear blimap allap

end

OTM3D(:,:,aux5) = OTM2D;
aux5 = aux5+1;
dim1 = aux4-1;
dim3 = aux5-1;
aux4 = 1;

end

% OTIMIZAÇÃO - PONTOS PARA VALIDAÇÃO
best_value=max(max(max(OTM3D)))

for j=1:dim1
    for k=1:dim2
        for l=1:dim3
            if (OTM3D(j,k,l))==best_value
                bestap = k
                bestvc = j
                bestf = l
                break
            end
        end
    end
end

end

%GRÁFICO AP VERSUS VC
```

```
figure(1)
imagesc([0:dim2],[0:dim1],OTM3D(:,:,bestf))
axis xy
colorbar
hold on
plot(31,14,"g+","markersize",25,'linewidth',2)
hold on
plot(29,12,"r+","markersize",25,'linewidth',2)
title("Profundidade de Corte e Velocidade de Corte")
xlabel ('Profundidade de Corte (ap)');
ylabel ('Velocidade de Corte (vc)');
```

%GRÁFICO AP VERSUS F

```
OTMapf = reshape(OTM3D(bestvc, :, :), dim3, dim2);
figure(2)
imagesc([0:dim2],[0:dim3],OTMapf)
axis xy
colorbar
hold on
plot(16,15,"g+","markersize",25,'linewidth',2)
hold on
plot(21,18,"r+","markersize",25,'linewidth',2)
title("Profundidade de Corte e Avanço")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Profundidade de Corte (ap)');
```

%GRÁFICO VC VERSUS F

```
OTMvcf = reshape(OTM3D(:, bestap, :), dim3, dim1);
figure(3)
imagesc([0:dim1],[0:dim3],OTMvcf)
axis xy
colorbar
hold on
plot(17,16,"g+","markersize",25,'linewidth',2)
hold on
plot(22,26,"r+","markersize",25,'linewidth',2)
title("Velocidade de Corte e Avanço")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Velocidade de Corte (vc)');
```

%VALORES FINAIS

```
apin=0.07+0.005*(bestap-1)
fin=0.07+0.005*(bestf-1)
vcin=160+1*(bestvc-1)
```

```
bestap
bestvc
bestf

%% OTIMIZAÇÃO - ANÁLISE

% AVANÇO
figure(4)
bestf1 = bestf-4;
subplot(3,2,1)
imagesc([0:dim2],[0:dim1],OTM3D(:,:,bestf1))
axis xy
colorbar
title("f = 0,11 [mm/volta] (X-4)")
ylabel('Profundidade de Corte (ap)');
xlabel('Velocidade de Corte (vc)');

bestf2 = bestf-2;
subplot(3,2,2)
imagesc([0:dim2],[0:dim1],OTM3D(:,:,bestf2))
axis xy
colorbar
title("f = 0,12 [mm/volta] (X-2)")
ylabel('Profundidade de Corte (ap)');
xlabel('Velocidade de Corte (vc)');

subplot(3,2,3:4)
imagesc([0:dim2],[0:dim1],OTM3D(:,:,bestf))
axis xy
colorbar
title("f = 0,13 [mm/volta] (Ponto ótimo)")
ylabel('Profundidade de Corte (ap)');
xlabel('Velocidade de Corte (vc)');

bestf3 = bestf+2;
subplot(3,2,5)
imagesc([0:dim2],[0:dim1],OTM3D(:,:,bestf3))
axis xy
colorbar
title("f = 0,14 [mm/volta] (X+2)")
ylabel('Profundidade de Corte (ap)');
xlabel('Velocidade de Corte (vc)');

bestf4 = bestf+4;
subplot(3,2,6)
imagesc([0:dim2],[0:dim1],OTM3D(:,:,bestf4))
axis xy
```

```
colorbar
title("f = 0,15 [mm/volta] (X+4)")
ylabel ('Profundidade de Corte (ap)');
xlabel ('Velocidade de Corte (vc)');

%VELOCIDADE DE CORTE
figure(5)
OTMapf1 = reshape(OTM3D((bestvc-8),:,:),dim3,dim2);
subplot(3,2,1)
imagesc([0:dim2],[0:dim3],OTMapf1)
axis xy
colorbar
title("vc = 187 [m/min] (X-8)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Profundidade de Corte (ap)');

OTMapf2 = reshape(OTM3D((bestvc-6),:,:),dim3,dim2);
subplot(3,2,2)
imagesc([0:dim2],[0:dim3],OTMapf2)
axis xy
colorbar
title("vc = 189 [m/min] (X-6)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Profundidade de Corte (ap)');

OTMapf3 = reshape(OTM3D((bestvc-4),:,:),dim3,dim2);
subplot(3,2,3)
imagesc([0:dim2],[0:dim3],OTMapf3)
axis xy
colorbar
title("vc = 191 [m/min] (X-4)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Profundidade de Corte (ap)');

OTMapf4 = reshape(OTM3D((bestvc-2),:,:),dim3,dim2);
subplot(3,2,4)
imagesc([0:dim2],[0:dim3],OTMapf4)
axis xy
colorbar
title("vc = 193 [m/min] (X-2)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Profundidade de Corte (ap)');

subplot(3,2,5:6)
imagesc([0:dim2],[0:dim3],OTMapf)
axis xy
```



```
colorbar
title("vc = 195 [m/min] (Ponto ótimo)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Profundidade de Corte (ap)');

%PROFUNDIADE DE CORTE
figure(6)
OTMvcf1 = reshape(OTM3D(:,(bestap-8),:),dim3,dim1);
subplot(3,2,1)
imagesc([0:dim1],[0:dim3],OTMvcf1)
axis xy
colorbar
title("X-4")
title("ap = 0,36 [mm] (X-8)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Velocidade de Corte (vc)');

OTMvcf2 = reshape(OTM3D(:,(bestap-6),:),dim3,dim1);
subplot(3,2,2)
imagesc([0:dim1],[0:dim3],OTMvcf2)
axis xy
colorbar
title("ap = 0,37 [mm] (X-6)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Velocidade de Corte (vc)');

OTMvcf3 = reshape(OTM3D(:,(bestap-4),:),dim3,dim1);
subplot(3,2,3)
imagesc([0:dim1],[0:dim3],OTMvcf3)
axis xy
colorbar
title("ap = 0,38 [mm] (X-4)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Velocidade de Corte (vc)');

OTMvcf4 = reshape(OTM3D(:,(bestap-2),:),dim3,dim1);
subplot(3,2,4)
imagesc([0:dim1],[0:dim3],OTMvcf4)
axis xy
colorbar
title("ap = 0,39 [mm] (X-2)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Velocidade de Corte (vc)');

subplot(3,2,5:6)
```

```
imagesc([0:dim1],[0:dim3],OTMvcf)
axis xy
colorbar
title("ap = 0,4 [mm] (Ponto ótimo)")
ylabel ('Avanço(f)');
xlabel ('Velocidade de Corte (vc)');
```

APÊNDICE B – Código utilizado para validação da modelagem.

```

clc
clear all
close all

%% VARIÁVEIS
c = 45; %[Graus] - RETIRADO DO ESTUDO DO GANDIA
crad = deg2rad(c); %[rad]

m1=0.09; %[kg]
kmolax1=2.3*10^6; %[N/m]
kmolay1=2.3*10^6; %[N/m]
cx1=2.3; %[N.s/m]
cy1=2.3; %[N.s/m]

m2=85; %[kg]
kmolax2=2.1*10^8; %[N/m]
kmolay2=2.1*10^7; %[N/m]
cx2=2.1*10^2; %[N.s/m]
cy2=2.1*10^1; %[N.s/m]

m3=274; %[kg]
kmolax3=4.58*10^9; %[N/m]
kmolay3=4.58*10^8; %[N/m]
cx3=4.58*10^3; %[N.s/m]
cy3=4.58*10^2; %[N.s/m]

omeganx1 = (kmolax1/m1)^(1/2); %[rad/s]
omegany1 = (kmolay1/m1)^(1/2); %[rad/s]
zetax1 = cx1/(2*m1*omeganx1);
zetay1 = cy1/(2*m1*omegany1);
Kx1 = kmolax1^(-1); %[m/N]
Ky1 = kmolay1^(-1); %[m/N]
omegadx1 = omeganx1*((1-(zetax1^2))^(1/2)); %[rad/s]
omegady1 = omegany1*((1-(zetay1^2))^(1/2)); %[rad/s]

omeganx2 = (kmolax2/m2)^(1/2); %[rad/s]
omegany2 = (kmolay2/m2)^(1/2); %[rad/s]
zetax2 = cx2/(2*m2*omeganx2);
zetay2 = cy2/(2*m2*omegany2);
Kx2 = kmolax2^(-1); %[m/N]
Ky2 = kmolay2^(-1); %[m/N]
omegadx2 = omeganx2*((1-(zetax2^2))^(1/2)); %[rad/s]
omegady2 = omegany2*((1-(zetay2^2))^(1/2)); %[rad/s]

```

```

omeganx3 = (kmolax3/m3)^(1/2); %[rad/s]
omegany3 = (kmolay3/m3)^(1/2); %[rad/s]
zetax3 = cx3/(2*m3*omeganx3);
zetay3 = cy3/(2*m3*omegany3);
Kx3 = kmolax3^(-1); %[m/N]
Ky3 = kmolay3^(-1); %[m/N]
omegadx3 = omeganx3*((1-(zetax3^2))^(1/2)); %[rad/s]
omegady3 = omegany3*((1-(zetay3^2))^(1/2)); %[rad/s]
omega=[0:1:10000]; %[rad/s]

%% FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA
for j=1:length(omega)
s(j)=1i*omega(j); %[rad/s]
Gx11(j) = (m1*(s(j)^2)+(cx1*s(j))+kmolax1); %[N/m]
Gx12(j) = (cx1*s(j))+kmolax1; %[N/m]
Gx22(j) = (m2*(s(j)^2)+((cx1+cx2)*s(j))+kmolax1 +kmolax2); %[N/m]
Gx23(j) = (cx2*s(j))+kmolax2; %[N/m]
Gx33(j) = (m3*(s(j)^2)+((cx2+cx3)*s(j))+kmolax2 +kmolax3); %[N/m]
Gy11(j) = (m1*(s(j)^2)+(cy1*s(j))+kmolay1); %[N/m]
Gy12(j) = (cy1*s(j))+kmolay1; %[N/m]
Gy22(j) = (m2*(s(j)^2)+((cy1+cy2)*s(j))+kmolay1 +kmolay2); %[N/m]
Gy23(j) = (cy2*s(j))+kmolay2; %[N/m]
Gy33(j) = (m3*(s(j)^2)+((cy2+cy3)*s(j))+kmolay2 +kmolay3); %[N/m]
Ftx23(j) = Gx23(j)/Gx33(j);
Fty23(j) = Gy23(j)/Gy33(j);
Ftx12(j) = Gx12(j)/(Gx22(j) - (Gx23(j)*Ftx23(j)));
Fty12(j) = Gy12(j)/(Gy22(j) - (Gy23(j)*Fty23(j)));

% APÊNDICE A. Código Octave para Obtenção dos Gráficos de Função de Transferência
GxxT1(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));
GyyT1(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]
GxxT2(j) = Kx1/((1-((omega(j)/omeganx1)^2))+1i*(2*zetax1*omega(j)/omeganx1));
GyyT2(j) = Ky1/((1-((omega(j)/omegany1)^2))+1i*(2*zetay1*omega(j)/omegany1)); %[m/N]
GxxT3(j) = 1/(Gx11(j) - Gx12(j)*Ftx12(j)); %[m/N]
GyyT3(j) = 1/(Gy11(j) - Gy12(j)*Fty12(j)); %[m/N]
GxxT4(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3)); %[m/N]
GyyT4(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]
GxxT5(j) = Kx1/((1-((omega(j)/omeganx1)^2))+1i*(2*zetax1*omega(j)/omeganx1)); %[m/N]
GyyT5(j) = Ky1/((1-((omega(j)/omegany1)^2))+1i*(2*zetay1*omega(j)/omegany1)); %[m/N]
Gxx(j) = 1/(Gx11(j) - Gx12(j)*Ftx12(j)); %[m/N]
Gyy(j) = 1/(Gy11(j) - Gy12(j)*Fty12(j)); %[m/N]
end

%% DESCRIÇÃO DO SISTEMA

```

%CONDIÇÕES DEFINIDAS

Ff=35; *%[N] - Valores empíricos*

Fr=98; *%[N] - Valores empíricos*

D=6; *%mm - Corpo de prova*

*%% DLE APvsVC - PONTO 1**%VARIÁVEIS DO PROCESSO*

ap=(0.07+0.005*(29-1))*10⁻³; *%[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO*

f=(0.07+0.005*(13-1))*10⁻³; *%[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO*

vc=(160+1*(12-1)); *%[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO*

omega=[1200:0.05:1400]; *%[rad/s]*

%VALORES IMPACTADOS

Kf = Ff/(f*ap); *%[N/m²]*

Kr = Fr/(f*ap); *%[N/m²]*

n1=1000*vc/(pi*D); *%rpm - VALOR CHAVE*

for k=1:10

for j=1:length(omega)

Gxx(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)²))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));

Gyy(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)²))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); *%[m/N]*

% Auto Valor

Lambda (j) = -cos(crad)/((Gxx(j))*((Kf*(cos(crad)²))-Kr*sin(crad)*cos(crad)))+(Gyy(j))*((Kf*(sin(c

LambdaR (j) = real(Lambda(j));

LambdaI (j)= imag(Lambda(j));

kappa (j) = LambdaI(j)/LambdaR(j);

% Profundidade de Corte Máxima

blim(j)=-0.5*LambdaR(j)*(1+(kappa(j)²))*1000;

% Rotação do eixo

phi(j)=atan(kappa(j));

eta(j)=pi()-2*phi(j);

tau(j) =(eta(j)+(2*k*pi()))/omega(j);

n(j) = 60/tau(j);

if (blim(j)<0)&(blim(j-1)>0)

aux2 = blim(j-1);

aux3 = n(j-1);

end

if blim(j)<0

blim(j) = nan;

end

```

dist(j) = abs(n1-n(j));
end

aux1 = min(dist);
pos = find(dist==aux1);
n(pos)
blim(pos)

% Plot do DLE
figure(1)
subplot(1,2,1)
plot(n,blim,"b", "linewidth",2)
grid on
title("Estável")
xlabel ('Rotação [RPM]','fontsize',10);
ylabel ('Profundidade de Corte [mm]','fontsize',10);
set(gca,'FontSize',10)
hold on
plot(n1,(ap*1000),"r+", "markersize",30, 'linewidth',2)
hold on

end

%% DLE APvsVC - PONTO 2

%VARIÁVEIS DO PROCESSO
ap=(0.07+0.005*(31-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
f=(0.07+0.005*(13-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
vc=(160+1*(14-1)); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO

%VALORES IMPACTADOS
Kf = Ff/(f*ap); %[N/m^2]
Kr = Fr/(f*ap); %[N/m^2]
n1=1000*vc/(pi*D); %rpm - VALOR CHAVE

for k=1:10
for j=1:length(omega)
Gxx(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));
Gyy(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]

% Auto Valor
Lambda (j) = -cos(crad)/((Gxx(j)*((Kf*cos(crad)^2))-Kr*sin(crad)*cos(crad)))+(Gyy(j)*((Kf*(sin(c
LambdaR (j) = real(Lambda(j));
LambdaI (j)= imag(Lambda(j));
kappa (j) = LambdaI(j)/LambdaR(j);

```

```

% Profundidade de Corte Máxima
blim(j)=-0.5*LambdaR(j)*(1+(kappa(j)^2))*1000;

% Rotação do eixo
phi(j)=atan(kappa(j));
eta(j)=pi()-(2*phi(j));
tau(j) =(eta(j)+(2*k*pi()))/omega(j);
n(j) = 60/tau(j);

if (blim(j)<0)&(blim(j-1)>0)
aux2 = blim(j-1);
aux3 = n(j-1);
end

if blim(j)<0
blim(j) = nan;
end

dist(j) = abs(n1-n(j));
end

aux1 = min(dist);
pos = find(dist==aux1);
n(pos)
blim(pos)

% Plot do DLE
figure(1)
subplot(1,2,2)
plot(n,blim,"b", "linewidth",2)
grid on
title("Instável")
xlabel ('Rotação [RPM]','fontsize',10);
ylabel ('Profundidade de Corte [mm]','fontsize',10);
set(gca,'FontSize',10)
hold on
plot(n1,(ap*1000),"r+", "markersize",30, 'linewidth',2)
hold on

end

%% DLE FvsAP - PONTO 1

%VARIÁVEIS DO PROCESSO
ap=(0.07+0.005*(21-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
f=(0.07+0.005*(18-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO

```

```

vc=(160+1*(36-1)); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO

%VALORES IMPACTADOS
Kf = Ff/(f*ap); %[N/m^2]
Kr = Fr/(f*ap); %[N/m^2]
n1=1000*vc/(pi*D); %rpm - VALOR CHAVE

for k=1:10
for j=1:length(omega)
Gxx(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));
Gyy(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]

% Auto Valor
Lambda (j) = -cos(crad)/((Gxx(j))*((Kf*(cos(crad)^2))-Kr*sin(crad)*cos(crad)))+(Gyy(j))*((Kf*(sin(c
LambdaR (j) = real(Lambda(j));
LambdaI (j)= imag(Lambda(j));
kappa (j) = LambdaI(j)/LambdaR(j);

% Profundidade de Corte Máxima
blim(j)=-0.5*LambdaR(j)*(1+(kappa(j)^2))*1000;

% Rotação do eixo
phi(j)=atan(kappa(j));
eta(j)=pi()-(2*phi(j));
tau(j) =(eta(j)+(2*k*pi())/omega(j));
n(j) = 60/tau(j);

if (blim(j)<0)&(blim(j-1)>0)
aux2 = blim(j-1);
aux3 = n(j-1);
end

if blim(j)<0
blim(j) = nan;
end

dist(j) = abs(n1-n(j));
end

aux1 = min(dist);
pos = find(dist==aux1);
n(pos)
blim(pos)

% Plot do DLE
figure(2)

```



```

subplot(1,2,1)
plot(n,blim,"b", "linewidth",2)
grid on
title("Estável")
xlabel ('Rotação [RPM]','fontsize',10);
ylabel ('Profundidade de Corte [mm]','fontsize',10);
set(gca,'FontSize',10)
hold on
plot(n1,(ap*1000),"r+", "markersize",30, 'linewidth',2)
hold on

end

%% DLE FvsAP - PONTO 2

%VARIÁVEIS DO PROCESSO
ap=(0.07+0.005*(16-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
f=(0.07+0.005*(15-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
vc=(160+1*(36-1)); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO

%VALORES IMPACTADOS
Kf = Ff/(f*ap); %[N/m^2]
Kr = Fr/(f*ap); %[N/m^2]
n1=1000*vc/(pi*D); %rpm - VALOR CHAVE

for k=1:10
for j=1:length(omega)
Gxx(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));
Gyy(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]

% Auto Valor
Lambda (j) = -cos(crad)/((Gxx(j)*((Kf*(cos(crad)^2))-Kr*sin(crad)*cos(crad)))+(Gyy(j)*((Kf*(sin(c
LambdaR (j) = real(Lambda(j));
LambdaI (j)= imag(Lambda(j));
kappa (j) = LambdaI(j)/LambdaR(j);

% Profundidade de Corte Máxima
blim(j)=-0.5*LambdaR(j)*(1+(kappa(j)^2))*1000;

% Rotação do eixo
phi(j)=atan(kappa(j));
eta(j)=pi()-(2*phi(j));
tau(j) =(eta(j)+(2*k*pi()))/omega(j);
n(j) = 60/tau(j);

if (blim(j)<0)&(blim(j-1)>0)
aux2 = blim(j-1);

```

```

aux3 = n(j-1);
end

if blim(j)<0
blim(j) = nan;
end

dist(j) = abs(n1-n(j));
end

aux1 = min(dist);
pos = find(dist==aux1);
n(pos)
blim(pos)

% Plot do DLE
figure(2)
subplot(1,2,2)
plot(n,blim,"b", "linewidth",2)
grid on
title("Instável")
xlabel ('Rotação [RPM]','fontsize',10);
ylabel ('Profundidade de Corte [mm]','fontsize',10);
set(gca,'FontSize',10)
hold on
plot(n1,(ap*1000),"r+", "markersize",30,'linewidth',2)
hold on

end

%% DLE FvsVC - PONTO 1

%VARIÁVEIS DO PROCESSO
ap=(0.07+0.005*(67-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
f=(0.07+0.005*(26-1))*10^(-3); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
vc=(160+1*(22-1)); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO

%VALORES IMPACTADOS
Kf = Ff/(f*ap); %[N/m^2]
Kr = Fr/(f*ap); %[N/m^2]
n1=1000*vc/(pi*D); %rpm - VALOR CHAVE

for k=1:10
for j=1:length(omega)
Gxx(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)^2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));
Gyy(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)^2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]

```

```

% Auto Valor
Lambda (j) = -cos(crad)/((Gxx(j)*((Kf*(cos(crad)^2))-Kr*sin(crad)*cos(crad)))+(Gyy(j)*((Kf*(sin(c
LambdaR (j) = real(Lambda(j));
LambdaI (j)= imag(Lambda(j));
kappa (j) = LambdaI(j)/LambdaR(j);

% Profundidade de Corte Máxima
blim(j)=-0.5*LambdaR(j)*(1+(kappa(j)^2))*1000;

% Rotação do eixo
phi(j)=atan(kappa(j));
eta(j)=pi()-(2*phi(j));
tau(j) =(eta(j)+(2*k*pi())/omega(j));
n(j) = 60/tau(j);

if (blim(j)<0)&(blim(j-1)>0)
aux2 = blim(j-1);
aux3 = n(j-1);
end

if blim(j)<0
blim(j) = nan;
end

dist(j) = abs(n1-n(j));
end

aux1 = min(dist);
pos = find(dist==aux1);
n(pos)
blim(pos)

% Plot do DLE
figure(3)
subplot(1,2,1)
plot(n,blim,"b", "linewidth",2)
grid on
title("Estável")
xlabel ('Rotação [RPM]','fontsize',10);
ylabel ('Profundidade de Corte [mm]','fontsize',10);
set(gca,'FontSize',10)
hold on
plot(n1,(ap*1000),"r+", "markersize",30,'linewidth',2)
hold on

```

```
end
```

```
%% DLE FusVC - PONTO 2
```

```
%VARIÁVEIS DO PROCESSO
```

```
ap=(0.07+0.005*(67-1))*10-3; %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
```

```
f=(0.07+0.005*(16-1))*10-3; %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
```

```
vc=(160+1*(17-1)); %[m] - VALOR CHAVE DE PROCESSO
```

```
%VALORES IMPACTADOS
```

```
Kf = Ff/(f*ap); %[N/m2]
```

```
Kr = Fr/(f*ap); %[N/m2]
```

```
n1=1000*vc/(pi*D); %rpm - VALOR CHAVE
```

```
for k=1:10
```

```
for j=1:length(omega)
```

```
Gxx(j) = Kx3/((1-((omega(j)/omeganx3)2))+1i*(2*zetax3*omega(j)/omeganx3));
```

```
Gyy(j) = Ky3/((1-((omega(j)/omegany3)2))+1i*(2*zetay3*omega(j)/omegany3)); %[m/N]
```

```
% Auto Valor
```

```
Lambda (j) = -cos(crad)/((Gxx(j)*((Kf*(cos(crad)2))-Kr*sin(crad)*cos(crad)))+(Gyy(j)*((Kf*(sin(c
```

```
LambdaR (j) = real(Lambda(j));
```

```
LambdaI (j)= imag(Lambda(j));
```

```
kappa (j) = LambdaI(j)/LambdaR(j);
```

```
% Profundidade de Corte Máxima
```

```
blim(j)=-0.5*LambdaR(j)*(1+(kappa(j)2))*1000;
```

```
% Rotação do eixo
```

```
phi(j)=atan(kappa(j));
```

```
eta(j)=pi()-(2*phi(j));
```

```
tau(j) =(eta(j)+(2*k*pi()))/omega(j);
```

```
n(j) = 60/tau(j);
```

```
if (blim(j)<0)&(blim(j-1)>0)
```

```
aux2 = blim(j-1);
```

```
aux3 = n(j-1);
```

```
end
```

```
if blim(j)<0
```

```
blim(j) = nan;
```

```
end
```

```
dist(j) = abs(n1-n(j));
```

```
end
```

```
aux1 = min(dist);
```

```
pos = find(dist==aux1);
n(pos)
blim(pos)

% Plot do DLE
figure(3)
subplot(1,2,2)
plot(n,blim,"b", "linewidth",2)
grid on
title("Instável")
xlabel ('Rotação [RPM]','fontsize',10);
ylabel ('Profundidade de Corte [mm]','fontsize',10);
set(gca,'FontSize',10)
hold on
plot(n1,(ap*1000),"r+", "markersize",30,'linewidth',2)
hold on

end
```