

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

BRUNO ZAMBRANO DEGAN

**ANÁLISE E MODELAGEM DE VIBRAÇÕES AUTO-EXCITADAS NO
PROCESSO DE TORNEAMENTO DE LIGAS DE TITÂNIO POR
ELEMENTOS FINITOS**

SÃO CARLOS
2023

BRUNO ZAMBRANO DEGAN

**ANÁLISE E MODELAGEM DE VIBRAÇÕES AUTO-EXCITADAS NO
PROCESSO DE TORNEAMENTO DE LIGAS DE TITÂNIO POR
ELEMENTOS FINITOS**

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. Sidney Bruce
Shiki

SÃO CARLOS
2023



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 22/2023/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNO ZAMBRANO DEGAN

ANALISE E MODELAGEM DE VIBRAÇÕES AUTO-EXCITADAS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE LIGAS DE TITÂNIO POR ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 13 de abril de 2023

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	Luis Antonio Oliveira Araujo
Membro da Banca 2	Adailton Gomes Pereira



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 13/04/2023, às 09:27, 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 **Luis Antonio Oliveira Araujo, Docente**, em 13/04/2023, às 09:30, 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 **1003183** e o código CRC **5C1C0A57**.

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Documento assinado digitalmente



ADAILTON GOMES PEREIRA
Data: 13/04/2023 09:39:46-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram ao longo de minha trajetória acadêmica.

Ao meu orientador Sidney Bruce Shiki, por fornecer inspiração e apoio para a realização desse projeto.

À minha família, por sempre me incentivar e apoiar em todos os momentos. Meu pai Emerson, minha mãe Andréa, e irmã Beatriz.

Aos amigos que compartilharam momentos de aprendizado e parceria, em especial ao Leonardo Almelin, Giovanni de Almeida, Rafael Bueno e Pedro Capasciuti, que facilitaram essa jornada.

À equipe de extensão Dragão Branco Aerodesign e todos os seus membros, que me permitiram desenvolver experiências profissionais e amizades que levarei para a vida.

Por fim, agradeço à minha namorada Leandra Tajiri, por todo o companheirismo e apoio.

RESUMO

Um parâmetro crítico em processos de usinagem é a qualidade superficial final da peça usinada, diretamente relacionada com vibrações auto-excitadas que surgem nesses processos devido à interação entre ferramenta de corte e superfície, prejudicando assim a rugosidade final obtida e intensificando o desgaste da ferramenta de corte. Dessa forma, torna-se interessante a modelagem dessas vibrações para obtenção de faixas ideais de parâmetros de corte, especialmente profundidade de usinagem e rotação, garantindo melhor produtividade sem prejuízo à qualidade superficial das peças usinadas. No presente trabalho é proposto, através do método dos elementos finitos, a modelagem das vibrações auto-excitadas no processo de torneamento de ligas de titânio, visando a criação de diagramas de lóbulos de estabilidade através de funções de resposta em frequência e constantes de usinagem, de forma a avaliar o grau de influência de modos de vibração superiores sobre os diagramas de estabilidade e permitir uma integração entre o modelo de elementos finitos e um modelo para cálculo da estabilidade dos processos.

Palavras-chave: Diagramas de lóbulos de estabilidade. Vibrações auto-excitadas. Elementos Finitos. Torneamento.

ABSTRACT

A critical parameter in machining processes is the final surface quality of the machined component, which is directly related to self-excited vibrations that are present in these processes due to the interaction between cutting tool and surface, affecting the final roughness obtained and intensifying tool wear. Thus, it becomes interesting to model these vibrations in order to obtain ideal ranges of cutting parameters, especially depth of cut and rotation, ensuring better productivity while maintaining the surface quality of the machined parts. This work proposes, through the finite elements method, the modeling of self-excited vibrations in the turning process of titanium alloys, aiming the creation of stability lobe diagrams through frequency response functions and machining constants, in order to evaluate the influence of higher vibration modes on the stability diagrams, allowing an integration between the finite elements model and a model for calculating the stability of the machining processes.

Keywords: Stability Lobe Diagrams. Auto-Excited Vibrations. Finite Elements. Turning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença de fases entre duas revoluções	23
Figura 2 – Exemplo de Diagrama de Lóbulos de Estabilidade	24
Figura 3 – Fluxograma do processo	28
Figura 4 – Modelo 2D do porta-ferramenta	29
Figura 5 – Simplificação adotada para o porta-ferramenta	29
Figura 6 – Malha de Elementos Finitos	30
Figura 7 – Restrições e forças aplicadas	30
Figura 8 – Modos de Vibração do porta-ferramenta	31
Figura 9 – FRF x Ângulo de Fase	32
Figura 10 – Parte Real e Imaginária da FRF	33
Figura 11 – DLE simulado	34
Figura 12 – DLEs - Modos de vibração superiores	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências de Ressonância	31
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DLE	Diagrama de Lóbulos de Estabilidade
Ti-6Al-4V	Titânio 6 Alumínio 4 Vanádio
FRF	Função de Resposta em Frequência

LISTA DE SÍMBOLOS

T_M	Temperatura média de corte
V	Velocidade de corte
f	Avanço
a	Profundidade de corte
$h(t)$	Espessura dinâmica do cavaco
h_0	Espessura do cavaco desprezando vibrações
$y(t)$	Espessura de corte atual
$y(t - T)$	Espessura de corte na revolução anterior
$F_f(t)$	Força de corte no domínio do tempo
K_f	Constante de corte
m_y	Coefficiente de massa
c_y	Coefficiente de amortecimento
k_y	Coefficiente de rigidez
ζ	Razão de amortecimento
w_n	Frequência natural não amortecida [rad/s]
w_c	Frequência chatter [rad/s]
$G(w_c)$	Parte real da FRF
$H(w_c)$	Parte imaginária da FRF
a_{lim}	Profundidade limite de usinagem
T	Período de rotação
β	Diferença de fases
f_c	Frequência chatter [Hz]
ψ	Ângulo de fase [rad]
k	Número do lóbulo
n	Rotações por minuto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.1	Vibrações Mecânicas em Processos de Usinagem	21
1.2	Efeito de Parâmetros de Usinagem sobre a Temperatura de Corte	21
1.3	Vibrações Auto-excitadas no Torneamento de Titânio	22
1.4	Diagramas de Lóbulos de Estabilidade	23
2	MODELO PARA CÁLCULO DA ESTABILIDADE	27
2.1	Modelagem do Diagrama de Lóbulos de Estabilidade	27
2.2	Elementos Finitos	28
3	RESULTADOS	29
3.1	Análise Modal via Método dos Elementos Finitos	29
3.2	Função de Resposta em Frequência	32
3.3	Efeito dos Modos de Vibração Superiores no DLE	35
4	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Vibrações Mecânicas em Processos de Usinagem

Vibrações mecânicas em processos de usinagem dependem dos diversos componentes (porta-ferramenta, inserto, material usinado, etc.) e parâmetros do sistema (Velocidade de corte, profundidade de usinagem, rotação, etc.). Fatores que trazem complexidade ao sistema dinâmico e conseqüente dificuldade para simulações precisas sem dados experimentais. Nesse contexto, Quintana e Badosa (2009) e Siddhpura e Paurobally (2012) dividem as vibrações em três categorias:

- Vibrações livres;
- Vibrações forçadas;
- Vibrações auto-excitadas.

Vibrações livres são definidas por uma excitação momentânea, com resposta transiente curta e posterior dissipação da energia mecânica, por exemplo no primeiro contato entre ferramenta e peça na usinagem. Vibrações forçadas são ocasionadas por fontes de excitação periódicas ou não, que fazem com que o sistema oscile na mesma frequência de excitação, podendo ser causadas por um desalinhamento ou a própria vibração do motor.

Por fim, vibrações auto-excitadas surgem em função dos próprios parâmetros do sistema, e se caracterizam por levar o sistema à instabilidade crescente, sendo assim a categoria mais crítica de vibração. No torneamento, ocorre especialmente pelo contato entre ferramenta de corte e peça em duas revoluções subsequentes (ALTINTAS, 2012). O presente trabalho possui foco principal nas vibrações auto-excitadas, melhor exemplificadas nos tópicos seguintes.

1.2 Efeito de Parâmetros de Usinagem sobre a Temperatura de Corte

Quando um material sofre deformação elástica, parte da energia do processo é utilizada para aumentar a energia de deformação, que é recuperada quando a carga é retirada. Porém, no caso das deformações plásticas, a maior parte da energia utilizada no cisalhamento é convertida em calor. Esse é o caso de processos de usinagem, que consomem praticamente toda a energia na forma de deformações plásticas e atrito, gerando assim uma nova superfície, trazendo como consequência a alta conversão em calor. (GHOSH; MALLIK, 1986)

Segundo Beddoes e Bibby (1999), diferentes temperaturas durante a usinagem podem influenciar o produto final de diversas maneiras, incluindo:

- Alterações de propriedades da superfície usinada;

- Efeitos indesejados na precisão dimensional;
- Desgaste prematuro de ferramentas de corte.

A dureza e condutividade térmica do material usinado e da ferramenta de corte influenciam diretamente a temperatura máxima alcançada durante a usinagem, bem como sua distribuição. Além disso, o aumento da velocidade de corte (V), avanço (f) e profundidade de usinagem (a) causam aumento de temperatura de usinagem (T_M), segundo a relação expressa pela Equação 1, dadas as constantes x , y e z (sendo $x > y > z$):

$$T_M \propto V^x \cdot f^y \cdot a^z \quad (1)$$

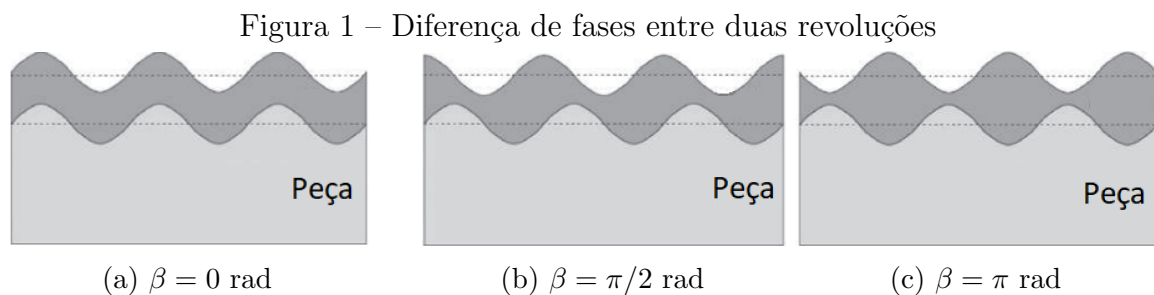
A equação nos permite inferir que um aumento na taxa de remoção de material tem como consequência o aumento da temperatura de corte, sendo principalmente influenciada pela velocidade de corte e avanço. Isso prejudica diretamente o desgaste e vida útil da ferramenta de corte, em menor escala para a usinagem de materiais com menor resistência e ponto de fusão, como o alumínio e o magnésio, porém de maneira considerável para materiais mais resistentes, como o ferro fundido, aço, níquel e especialmente ligas de titânio, tornando a seleção eficaz de parâmetros de usinagem mandatória para que a ferramenta de corte seja preservada de maneira eficiente (WRIGHT; TRENT, 2000).

1.3 Vibrações Auto-excitadas no Torneamento de Titânio

O titânio é um material de difícil processamento, devido à alta resistência em elevadas temperaturas, baixa condutividade térmica, módulo de elasticidade relativamente baixo quando comparado a outros aços de resistência mecânica similar e alta reatividade química (EZUGWU; WANG, 1997). Por conta dessas propriedades, a usinagem desse tipo de material apresenta algumas dificuldades enfrentadas, dentre elas estão: formação de alta tensão térmica no material, segmentação do cavaco e principalmente vibrações auto-excitadas, (PERVAIZ et al., 2019). Por conta da baixa condutividade térmica, a usinagem de titânio implica em alta temperatura de corte, que acaba sendo conduzida para a ferramenta de corte. Essa se configura como uma das principais causas de desgaste de ferramentas na usinagem desse tipo de material, pois cerca de 80% do calor gerado é conduzido para a ferramenta (PRAMANIK, 2014). Para evitar o desgaste prematuro da ferramenta, a velocidade de corte e o avanço são limitados, restando apenas a profundidade de usinagem para tentar aumentar a produtividade. No entanto, aumentar esse parâmetro deixa o processo muito suscetível ao surgimento de vibrações *chatter* (CHIAPPINI et al., 2014).

Nos processos de torneamento, componentes como o eixo, o mandril, o contraponto e o porta-ferramentas podem contribuir para a flexibilidade que leva ao *chatter*. Esse fenômeno se caracteriza pela interação da ferramenta de corte com ondulações na superfície

da peça provenientes das revoluções anteriores da própria usinagem, de forma que a espessura do cavaco possa variar de forma exponencial quando a frequência de oscilação se aproxima de uma frequência de ressonância do sistema, consequentemente aumentando as forças de corte e resultando em qualidades superficiais ruins. Por isso, o *chatter* é o tipo de vibração mais prejudicial para a segurança e qualidade das operações de usinagem (ALTINTAS, 2012). A Figura 1 apresenta o efeito da diferença de fases entre revoluções, prejudicial para o tipo de vibração em questão devido à alta variação da espessura do cavaco.



Fonte: Adaptado de Quintana e Ciurana (2011)

Nesse contexto, buscam-se estratégias para mitigar os efeitos do *chatter* em diversas literaturas, podendo ser divididas em quatro diferentes tipos de abordagens (MUNOA et al., 2016):

- Garantir um processo estável através da correta seleção de parâmetros de corte;
- Gerar perturbações regenerativas através de ferramentas com geometrias especiais e passos variáveis, ou variando a rotação da máquina;
- Aumentar a rigidez dos elementos, de forma a evitar frequências de ressonância.
- Aumentar o amortecimento do processo, utilizando técnicas de controle ativo ou passivo.

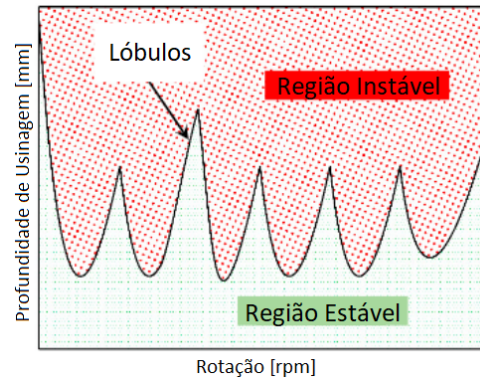
O presente trabalho tem foco na primeira abordagem, através da análise dos Diagramas de Lóbulos de Estabilidade (DLE's), forma convencional de seleção de parâmetros de corte, melhor exemplificada nas seções seguintes.

1.4 Diagramas de Lóbulos de Estabilidade

Pelos fatores apresentados na seção 1.3, no torneamento de ligas de titânio é importante selecionar bem os parâmetros de corte, especialmente a profundidade de usinagem. Para isso, podem ser utilizados os Diagramas de Lóbulos de Estabilidade, que são construídos através de modelos matemáticos alimentados com constantes de usinagem e funções de resposta em frequência do sistema, que dependem da geometria da ferramenta e

parâmetros do processo (MUNOA et al., 2016). Em geral, esse tipo de diagrama apresenta um gráfico de profundidade de usinagem por rotação, definindo os limites entre zonas de corte estáveis e instáveis, de forma a facilitar a seleção desses parâmetros de corte (QUINTANA; BADOSA, 2009). Um exemplo de DLE é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Exemplo de Diagrama de Lóbulos de Estabilidade



Fonte: Adaptado de Paliwal e Babu (2020)

O Diagrama de Lóbulos de Estabilidade é uma das formas mais convencionais e simples de seleção de parâmetros de corte na usinagem, porém, possui a desvantagem de perder precisão matemática em caso de alterações da ferramenta de corte, máquina e material usinado, obrigando que o cálculo seja refeito para cada nova combinação desses parâmetros. Por isso, muitos trabalhos atuais buscam formas de simplificar e automatizar a criação desse diagrama. Yue (2006) buscou implementar um método analítico de criação de DLE's através de planilhas com base nos parâmetros de usinagem, mas não conseguiu considerar alguns fatores importantes, como variação nas direções de força de corte, corte por múltiplos insertos e variações na espessura do cavaco da entrada até a saída da ferramenta de corte. Li, Wang e Shi (2017) propuseram um método de obter os DLE's através das funções de resposta em frequência do sistema, acelerando o tempo de cálculo em relação ao analítico convencional e obtendo resultados similares, através de um método simplificado de análise modal com apenas um grau de liberdade. Friedrich, Hinze e Renner (2017) apresentaram uma outra forma de se obter os DLE's, que consiste na realização de diversas medições dos sinais de aceleração em processos de usinagem, e posterior criação de algoritmos que buscam reproduzir os resultados analíticos de forma preditiva, alcançando resultados aprovados pelos autores com base em coeficientes de confiabilidade que dependem do número de ensaios similares ao desejado, mas com resultados imprecisos para novos parâmetros não ensaiados, com base na comparação visual dos DLEs simulados e experimentais.

Nesse contexto, torna-se relevante a modelagem em elementos finitos de um porta-ferramenta no torneamento de ligas de titânio, buscando uma integração entre essa metodologia com um modelo de cálculo da estabilidade do processo através das funções de resposta em frequência e de constantes de usinagem, além de analisar o grau de influência de

modos de vibração superiores sobre a estabilidade. Para efeitos de comparação, estudando o controle passivo do *chatter* através da aplicação do *shunt* piezoelétrico, Pereira (2022) desenvolveu ensaios experimentais do torneamento da liga Ti-6Al-4V, visando a obtenção dos parâmetros modais e FRF's do porta-ferramenta, utilizando um martelo de impacto instrumentado, acelerômetro e placa de aquisição. Os parâmetros obtidos foram utilizados para posterior criação dos Diagramas de Lóbulos de Estabilidade do sistema. De forma similar, Chiaradia (2021) utilizou a metodologia apresentada por Altintas (2012) para gerar DLE's e verificar condições de usinagem mais eficientes para o torneamento com uso de materiais piezoelétricos associados aos circuitos *shunt*.

2 MODELO PARA CÁLCULO DA ESTABILIDADE

2.1 Modelagem do Diagrama de Lóbulos de Estabilidade

Para a análise matemática do Diagrama de Lóbulos de Estabilidade, foi utilizada a metodologia apresentada por Altintas (2012), melhor exemplificada a seguir. A espessura dinâmica do cavaco ($h(t)$) pode ser obtida pela Equação 2:

$$h(t) = h_0 - [y(t) - y(t - T)] \quad (2)$$

sabendo que h_0 é a taxa de avanço da ferramenta, que também representa a espessura nominal do cavaco desprezando os fenômenos de vibrações, e $[y(t) - y(t - T)]$ a espessura dinâmica proveniente da oscilação momentânea e mais um período T da revolução anterior. Assumindo um sistema com um grau de liberdade, a equação de movimento do sistema pode ser expressa pela Equação 3, permitindo obter a força de corte no domínio do tempo $F_f(t)$:

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = F_f(t) = K_f a h(t) = K_f a \cdot [h_0 + y(t - T) - y(t)] \quad (3)$$

onde K_f é a constante de corte, a a largura de corte e m_y , c_y e k_y são os coeficientes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente. Ressalta-se que o método linear utilizado desconsidera eventuais fenômenos não lineares, como saltos da ferramenta que levam a força de corte para zero por um intervalo de tempo e amortecimentos do processo. Passando a Equação 3 para o domínio de Laplace, pode-se obter a função de transferência (FT) do sistema:

$$\Phi(s) = \frac{y(s)}{F_f(s)} = \frac{w_n^2}{k_y \cdot (s^2 + 2w_n \zeta s + w_n^2)} \quad (4)$$

considerando ζ a razão de amortecimento e w_n a frequência natural não amortecida, pode-se então obter a função de resposta em frequência do sistema (FRF), necessária para a criação do Diagrama de Lóbulos de Estabilidade. $G(w_c)$ representa a parte real e $H(w_c)$ a parte imaginária, sendo w_c a frequência de *chatter*:

$$G(w_c) = \frac{w_n^2 - w_c^2}{(w_n^2 - w_c^2)^2 + (2w_n \zeta)^2 \cdot w_c^2} \quad (5)$$

$$H(w_c) = \frac{-(2w_n \zeta)w_c}{(w_n^2 - w_c^2)^2 + (2w_n \zeta)^2 \cdot w_c^2} \quad (6)$$

Pela FRF, pode-se obter a profundidade limite de usinagem (a_{lim}), apresentada na equação 7:

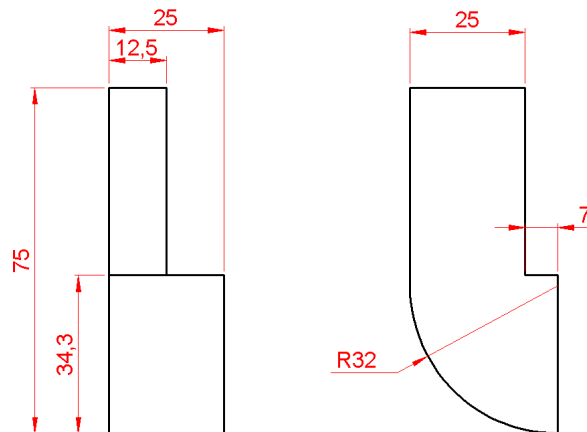
$$a_{lim} = \frac{-1}{2K_f G(w_c)} \quad (7)$$

3 RESULTADOS

3.1 Análise Modal via Método dos Elementos Finitos

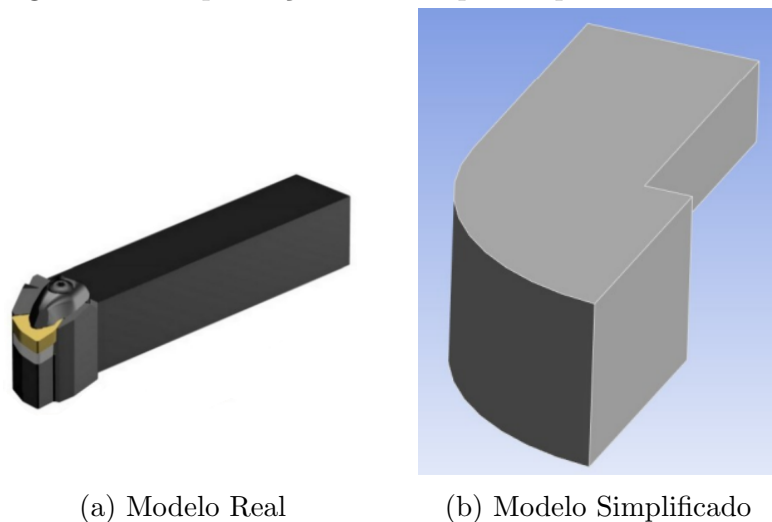
Inicialmente, é necessário simular o porta-ferramenta em elementos finitos, visando a obtenção de suas respectivas frequências de ressonância e função de resposta em frequência (FRF), que posteriormente são utilizadas para geração e análise dos diagramas de lóbulos de estabilidade. O modelo geométrico do porta-ferramenta foi criado no software ANSYS STUDENT 2021, com dimensões principais estimadas em 75 mm x 32 mm x 25 mm, similares às utilizadas em ensaios experimentais realizados no Laboratório de Processos de Fabricação do Núcleo de Laboratórios de Ensino de Engenharia (UFSCar) e apresentados por Pereira (2022). A configuração do porta-ferramenta está apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Modelo 2D do porta-ferramenta



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 5 – Simplificação adotada para o porta-ferramenta



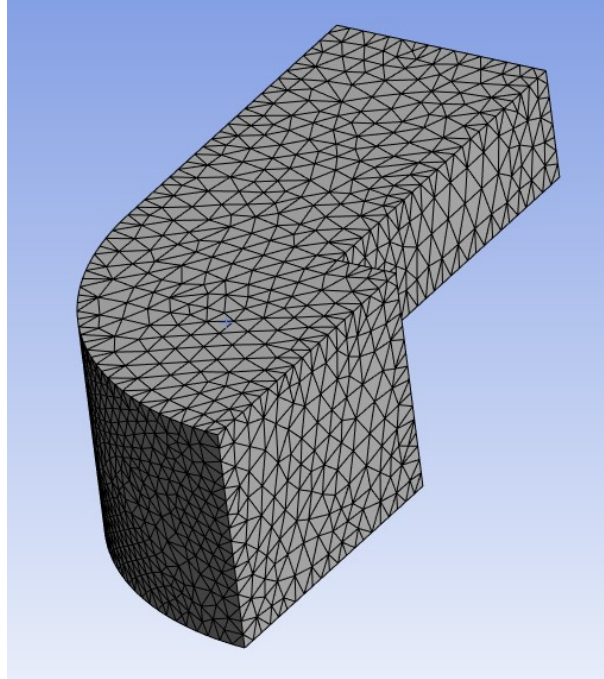
(a) Modelo Real

(b) Modelo Simplificado

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O modelo criado possui malha com elementos triangulares, totalizando 14841 nós e 8638 elementos, apresentados na Figura 6.

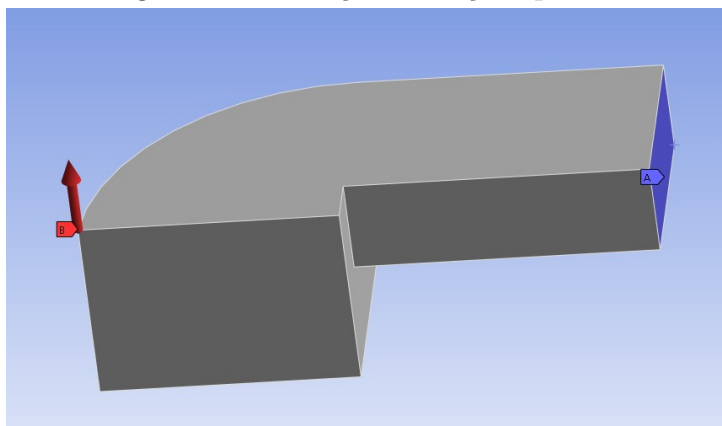
Figura 6 – Malha de Elementos Finitos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As restrições e forças foram selecionadas de forma a simular o processo de torneamento em questão, que sugere um engaste na base do porta-ferramenta, com aplicação de força de corte na região do inserto de usinagem, conforme representado na Figura 7.

Figura 7 – Restrições e forças aplicadas



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

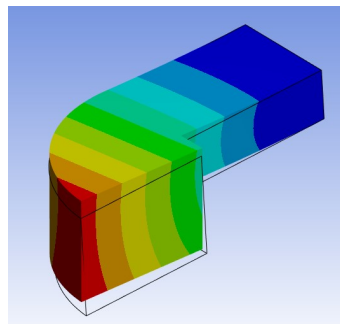
Através da função de Análise Modal do software, foi possível obter as primeiras 6 frequências de ressonância do modelo engastado, além de seus respectivos modos de vibração. Os resultados da análise modal estão apresentados na Tabela 1 e Figura 8.

Tabela 1 – Frequências de Ressonância

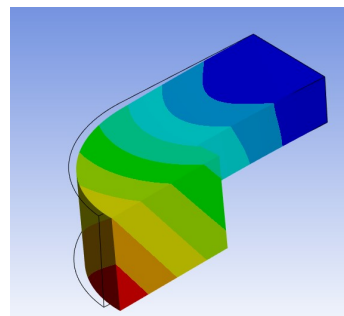
Modo	Frequência [Hz]
1.	1252,8
2.	2285,6
3.	4549,8
4.	7413,7
5.	11062
6.	14420

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

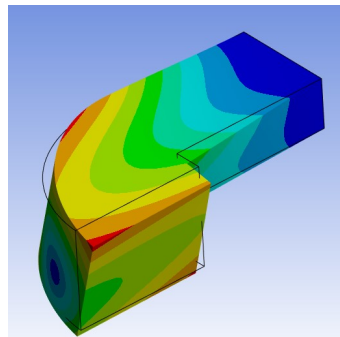
Figura 8 – Modos de Vibração do porta-ferramenta



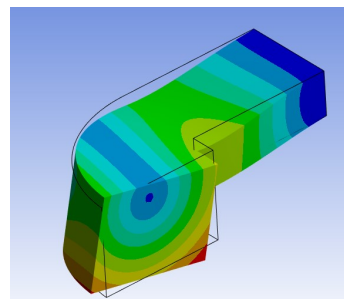
(a) Modo 1: 1252,8 Hz
Flexão Vertical



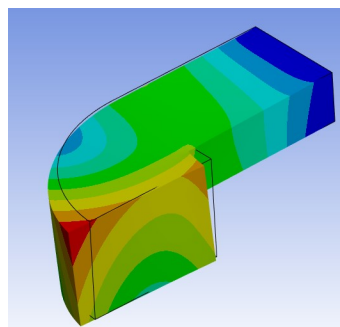
(b) Modo 2: 2285,6 Hz
Flexão Horizontal



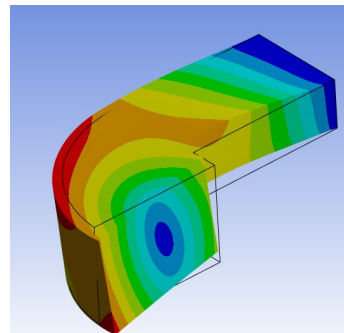
(c) Modo 3: 4549,8 Hz
Torção



(d) Modo 4: 7413,7 Hz
Flexão Vertical



(e) Modo 5: 11062 Hz
Sentido Axial



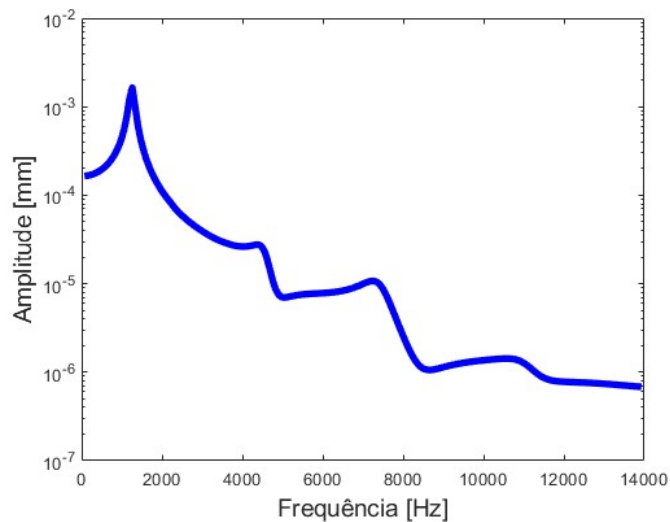
(f) Modo 6: 14420 Hz
Flexão Horizontal

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

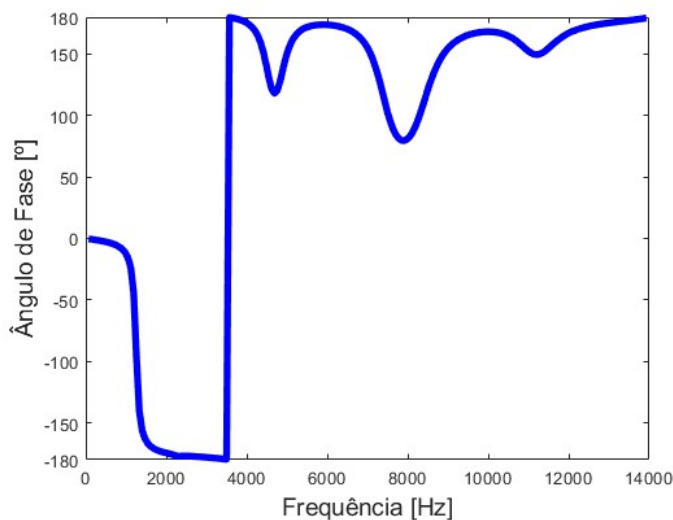
3.2 Função de Resposta em Frequência

Após a análise modal, a função de resposta em frequência (FRF) pode ser obtida através da análise de resposta harmônica do sistema quando submetido a uma força de 1 N na extremidade do porta-ferramenta, na direção de corte. A razão de amortecimento e constante de corte foram estimadas para a usinagem de titânio Ti-6Al-4V, segundo Rao e Fah (2011), Pereira (2022) e informações do catálogo da Sandvik (2011). Os valores utilizados foram 0,0205 e 1700 MPa, respectivamente. A FRF simulada obtida está apresentada na Figura 9, com o eixo x representando frequência em Hz, e eixo y a amplitude. Bem como os respectivos ângulos de fase.

Figura 9 – FRF x Ângulo de Fase



(a) FRF



(b) Ângulo de fase

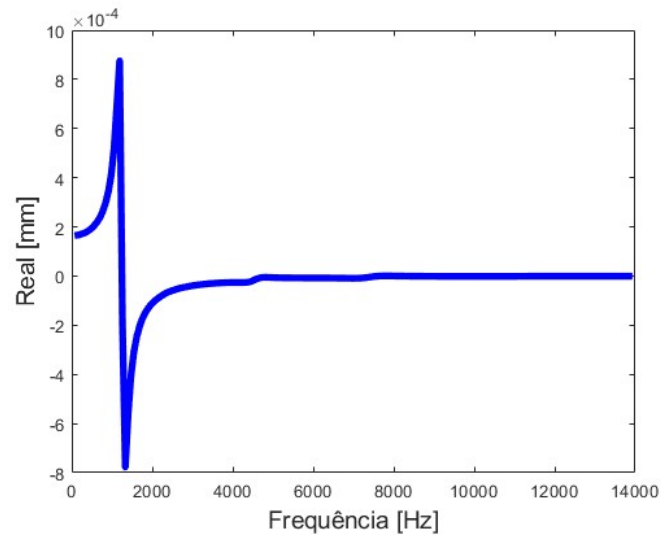
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

É possível observar os picos de frequências de ressonância, com a frequência

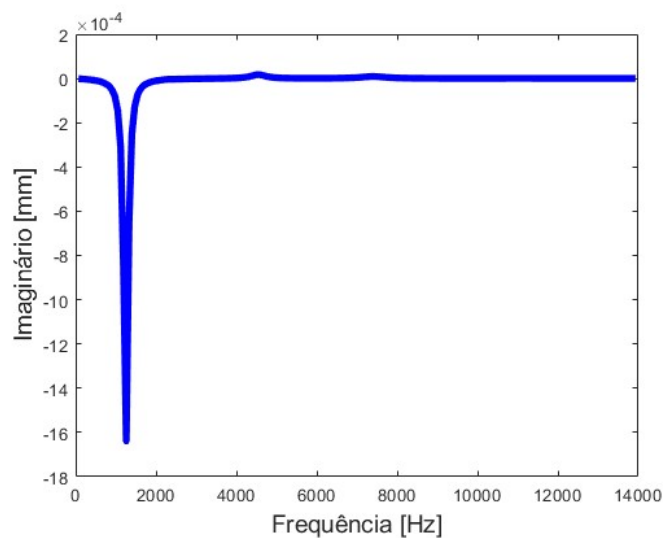
dominante no primeiro modo de vibração, em aproximadamente 1253 Hz, representando a flexão vertical no sentido de aplicação da força de corte.

Para obtenção dos diagramas de lóbulos de estabilidade, utiliza-se a parte real negativa da FRF ($G(w_c)$), cuja representação gráfica é apresentada na Figura 10, juntamente com a parte imaginária ($H(w_c)$).

Figura 10 – Parte Real e Imaginária da FRF



(a) Real



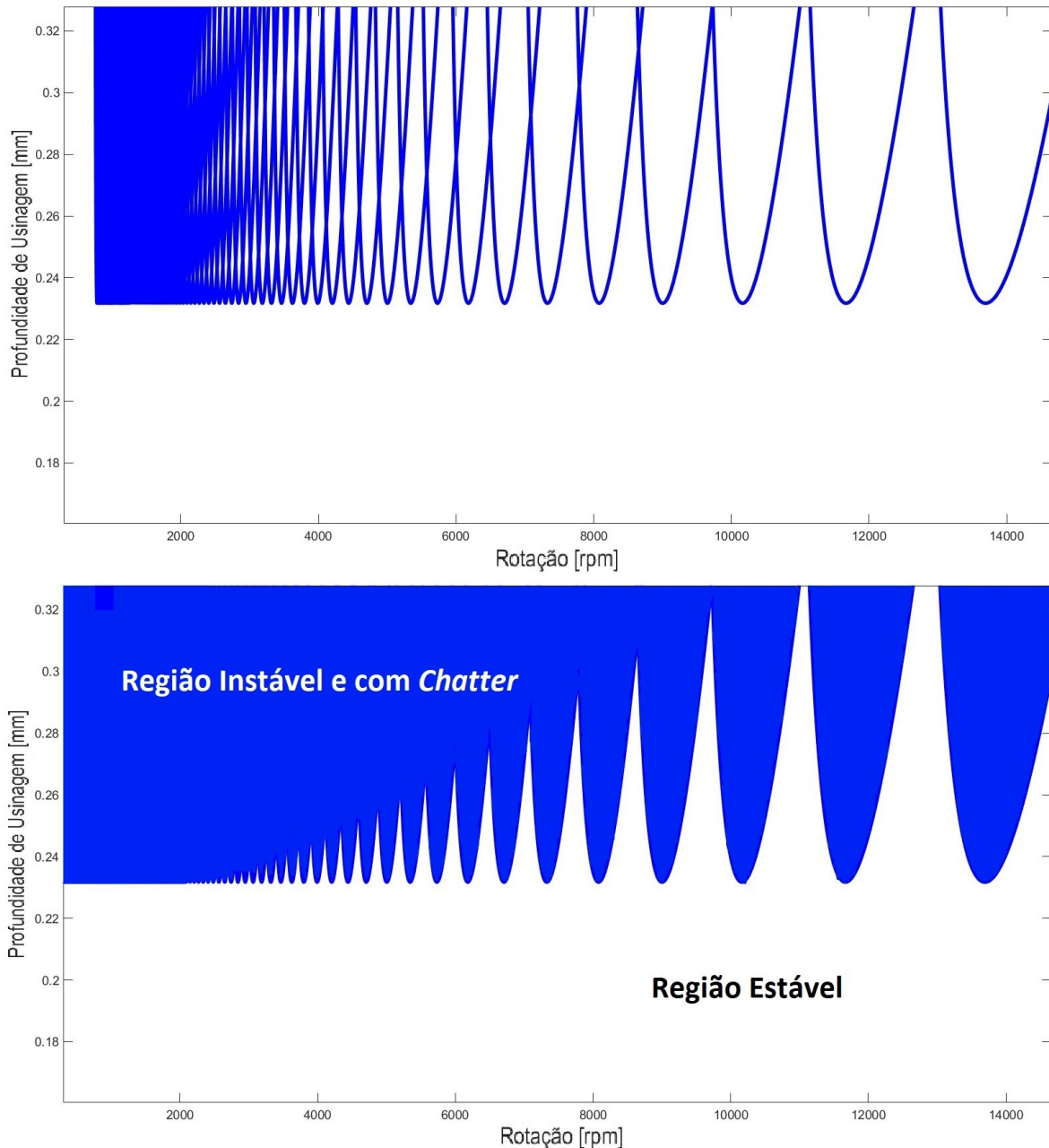
(b) Imaginário

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A análise da parte real da FRF apresenta valores negativos da função a partir da primeira frequência de ressonância (1253 Hz), com valores em módulo maiores justamente próximos a esse ponto. Essa característica torna o primeiro modo de vibração dominante na redução do limite de estabilidade absoluto, indicando previamente uma menor influência dos modos de vibração maiores no Diagrama de Lóbulos de Estabilidade.

Dessa forma, através das equações 7 e 9, podem ser estimados os lóbulos de estabilidade, que serão utilizados para definir o Diagrama de estabilidade do processo de torneamento de titânio, relacionando profundidade de corte limite (a_{lim}) e rotação (n). Os cálculos foram realizados em rotina do Matlab, permitindo a obtenção do Diagrama apresentado na Figura 11.

Figura 11 – DLE simulado



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O limite de estabilidade absoluto observado é de aproximadamente 0,23 mm, sendo esse um valor teórico limitante, abaixo do qual não serão observados os efeitos do *chatter*. Nota-se que para rotações mais altas, podem ser utilizadas profundidades de corte mais

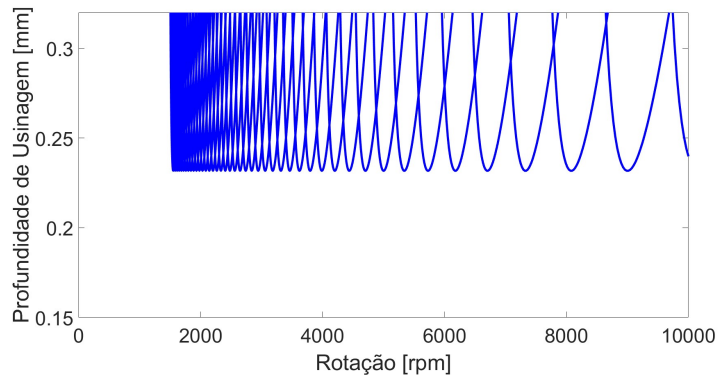
altas que o limite absoluto de estabilidade, desde que sejam selecionados pontos em regiões estáveis do DLE. Ao passo que para rotações mais baixas, os lóbulos tendem à linha limite, sendo essa predominante na definição da profundidade de corte.

3.3 Efeito dos Modos de Vibração Superiores no DLE

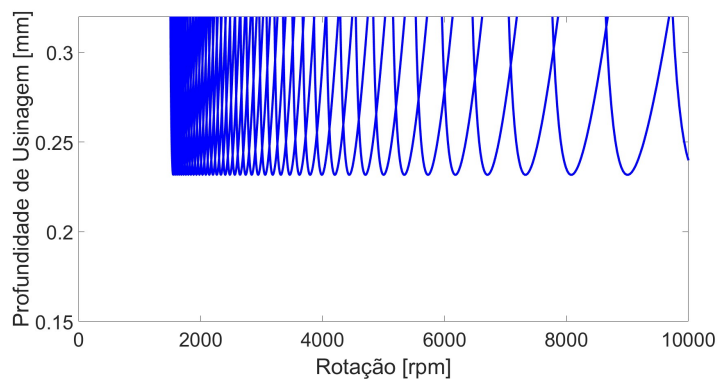
Tendo sido apresentado na Figura 11 o DLE com pontos próximos à frequência de ressonância dominante, referente ao primeiro modo de vibração de flexão vertical, torna-se interessante também analisar o grau de influência dos modos de vibração superiores sobre o DLE final simulado, de forma a garantir uma modelagem confiável do sistema.

Partindo da mesma análise de resposta harmônica e calculando os DLEs com uso das regiões de frequência que compreendam outros modos de vibração, pode ser obtida a Figura 12, que apresenta o cálculo para faixas que compreendem o modo dominante e mais 3 modos de vibração para exemplificação.

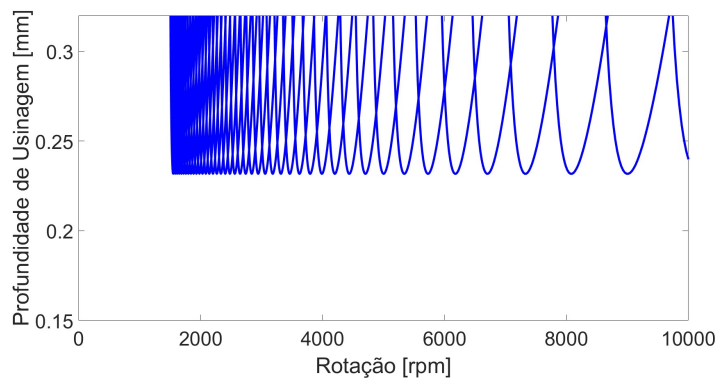
Figura 12 – DLEs - Modos de vibração superiores



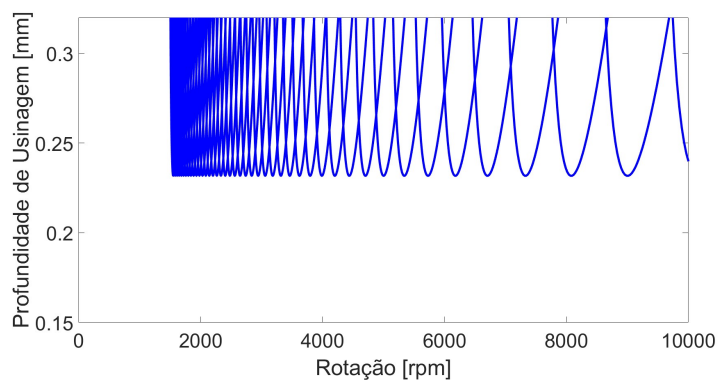
(a) Primeiro Modo



(b) Primeiro e segundo modo (1250 a 2300 Hz)



(c) Primeiro ao terceiro modo (1250 a 4600 Hz)



(d) Primeiro ao quarto modo (1250 a 7500 Hz)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como observado na Figura 12, variando a faixa de frequências de maneira a compreender modos de vibração superiores em conjunto com o modo dominante, foram obtidos diagramas de lóbulos de estabilidade com limites de estabilidade absolutos de 0,23 mm, similares aos obtidos para apenas o modo dominante (Figura 11), verificando assim pouca ou nenhuma influência dos modos superiores sobre o DLE utilizado para definir as zonas de estabilidade para o processo de usinagem em questão, dado que essa influência ocorre em pontos do diagrama cujas profundidades de usinagem limite possuem valores maiores, irrelevantes para a definição do limite de estabilidade absoluto do sistema. Isso pode ser explicado numericamente observando a Equação 7, que indica que os menores valores de profundidade de corte limite estão relacionados com os maiores valores em módulo da parte real negativa da FRF do sistema, fato que ocorre justamente no modo de vibração dominante, podendo ser observado na Figura 10.

4 CONCLUSÃO

Os resultados desenvolvidos ao longo do trabalho apresentaram numericamente e visualmente a integração entre a modelagem em elementos finitos e o modelo para cálculo da estabilidade de processos de torneamento, mostrando que se os parâmetros do modelo estiverem bem ajustados, é possível determinar um limite de estabilidade aproximado do real, facilitando e acelerando decisões em caso de necessidade de alteração de parâmetros ou ferramentas, já que testes práticos seriam necessários para todas as variáveis em questão.

Modos de vibração superiores apresentaram influência irrisória sobre o Diagrama de Lóbulos de Estabilidade simulado para o processo de torneamento de titânio Ti-6Al-4V, que é rígido principalmente pela frequência de ressonância dominante, já que os modos superiores não apresentaram tendência ao chatter, com limites de estabilidade absolutos bem altos e fora da realidade alcançável para o torneamento em questão. Dessa forma, para seleção de parâmetros, é válido aproximar para um sistema de um grau de liberdade para obtenção da Função de Resposta em Frequência.

Numericamente, a baixa influência dos modos de vibração superiores pode ser atribuída à parte real negativa da FRF analisada, que tende a valores bem baixos em módulo a partir do primeiro modo de vibração, aumentando assim a profundidade limite de usinagem calculada em geral, pois está presente no denominador da Equação 7. Sendo assim, a frequência de ressonância dominante sempre será a mais crítica para a ocorrência das vibrações auto-excitadas.

Para trabalhos futuros, torna-se interessante realizar testes práticos variando parâmetros de usinagem, matéria-prima e ferramentas, buscando comparações com o modelo desenvolvido de cálculo do DLE integrado ao método dos elementos finitos.

REFERÊNCIAS

- ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation Metal Cutting Mechanics Machine Tool Vibrations**. 2. ed. 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA: Cambridge University Press, 2012. ISBN 9780521172479.
- BEDDOES, J.; BIBBY, M. **Principles of metal manufacturing processes**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1999.
- CHIAPPINI, E. et al. On the mechanics of chip formation in ti-6al-4v turning with spindle speed variation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier**, v. 77, p. 16–26, 2014.
- CHIARADIA, J. V. Estudo numérico do controle passivo de vibrações em torneamento mecânico a partir de materiais piezoelétricos. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- EZUGWU, E.; WANG, Z. Titanium alloys and their machinability—a review. **Journal of materials processing technology, Elsevier**, v. 68, p. 262–274, 1997.
- FRIEDRICH, J.; HINZE, C.; RENNER, A. Estimation of stability lobe diagrams in milling with continuous learning algorithms. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 43, p. 124–134, 2017. ISSN 0736-5845. Special Issue: Extended Papers Selected from FAIM 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584515001155>>.
- GHOSH, A.; MALLIK, A. **Manufacturing Science**. [S.l.]: Ellis Horwood, 1986. (Ellis Horwood series in engineering science). ISBN 9780470203125.
- LI, Z.; WANG, Z.; SHI, X. Fast prediction of chatter stability lobe diagram for milling process using frequency response function or modal parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, p. 2603–2612, 2017. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9959-4>>.
- MUNOA, J. et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, p. 785–808, 2016.
- PALIWAL, V.; BABU, N. R. Prediction of stability lobe diagrams in high-speed milling by operational modal analysis. **Procedia Manufacturing**, v. 48, p. 283–293, 2020. ISSN 2351-9789. 48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920315018>>.
- PEREIRA, A. G. Aplicação do shunt piezoelétrico para controle passivo de chatter no processo de torneamento da liga ti-6al-4v eli. 2022. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- PERVAIZ, S. et al. Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (mql) based techniques. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Springer**, v. 6, p. 133–145, 2019.
- PRAMANIK, A. Problems and solutions in machining of titanium alloys. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer**, v. 70, p. 919–928, 2014.

QUINTANA, G.; BADOSA, G. Stability lobes diagram identification and surface roughness monitoring in milling processes. p. 113, 2009.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 51, n. 5, p. 363–376, 2011.

RAO, S. S.; FAH, Y. F. **Mechanical vibrations; 5th ed. in SI units**. Singapore: Prentice Hall, 2011. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/record/1398617>>.

SANDVIK. Application guide titanium. p. 55, 2011. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com>.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 61, p. 27–47, 2012. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695512000831>>.

WRIGHT, P.; TRENT, E. **Metal Cutting**. [S.l.]: Elsevier Science, 2000. ISBN 9780080511450.

YUE, J. Creating a stability lobe diagram. In: CITESEER. **Proceedings of the 2006 IJME-INTERTECH Conference**. [S.l.], 2006. p. 301–350.