

**REINALDO CLEMENTE FORTES**

**IDENTIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO DE ARESTA  
POSTIÇA DE CORTE NO CORTE ORTOGONAL DO  
AÇO ABNT 1050 POR MEIO DE SINAIS DE  
VIBRAÇÃO E PRESSÃO SONORA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2025

**REINALDO CLEMENTE FORTES**

**IDENTIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO DE ARESTA POSTIÇA DE CORTE  
NO CORTE ORTOGONAL DO AÇO ABNT 1050 POR MEIO DE SINAIS  
DE VIBRAÇÃO E PRESSÃO SONORA**

Tese apresentada ao programa de pós  
graduação em Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de **DOUTOR EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: Materiais e Processos de  
Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Coorientador: Prof. Dr Gustavo Paulinelli Guimarães

**UBERLÂNDIA**

**2025**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F738 Fortes, Reinaldo Clemente, 1987-  
2025 Identificação da formação de aresta postiça de corte no corte  
ortogonal do aço ABNT 1050 por meio de sinais de vibração e  
pressão sonora [recurso eletrônico] / Reinaldo Clemente Fortes. -  
2025.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.  
Coorientador: Gustavo Paulinelli Guimarães.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-  
graduação em Engenharia Mecânica.  
Modo de acesso: Internet.  
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.628>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Márcio Bacci da ,1964-,  
(Orient.). II. Guimarães, Gustavo Paulinelli ,1977-, (Coorient.). III.  
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4282 - [www.posmecanica.ufu.com.br](http://www.posmecanica.ufu.com.br) - [secposmec@mecanica.ufu.br](mailto:secposmec@mecanica.ufu.br)



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, número 408, PPGEM				
Data:	29 de setembro de 2025	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	12123EMC011				
Nome do Discente:	Reinaldo Clemente Fortes				
Título do Trabalho:	IDENTIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO DE ARESTA POSTIÇA DE CORTE NO CORTE ORTOGONAL DO AÇO ABNT 1050 POR MEIO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E PRESSÃO SONORA				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	-				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte - FEMEC/UFU; Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura - UFSCar; Prof. Dr. Adriano Todorovic Fabro - UnB; Prof. Dr. Igor Cezar Pereira - UFOP; Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - UFOP, coorientador do candidato e Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Marcio Bacci da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação

interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Adriano Todorovic Fabro, Usuário Externo**, em 29/09/2025, às 17:03, 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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/09/2025, às 17:03, 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 **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/09/2025, às 17:07, 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 **Carlos Eiji Hirata Ventura, Usuário Externo**, em 29/09/2025, às 17:08, 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 **Marcus Antonio Viana Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/09/2025, às 17:12, 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 **Igor Cézar Pereira, Usuário Externo**, em 30/09/2025, às 10:29, 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 **Gustavo Paulinelli Guimarães, Usuário Externo**, em 01/10/2025, às 09:58, 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://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6659781** e o código CRC **A00B9E29**.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder força, saúde e sabedoria ao longo de toda esta jornada.

Aos meus pais, Marlúcia Silva Fortes e Ronaldo Anacleto Fortes (*in memoriam*), pelo amor incondicional e pelos valores que me ensinaram.

Ao meu orientador, professor Dr. Márcio Bacci da Silva, meu orientador, pelos ensinamentos, confiança, conselhos, paciência e constante disponibilidade. Sua orientação firme e dedicada foi determinante para a concretização deste trabalho. Muito obrigado!

Ao meu co-orientador, professor Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães da Universidade Federal de Ouro Preto, pelos ensinamentos, incentivo, paciência, disponibilidade e valiosas contribuições ao longo desta jornada. Muito obrigado!

Ao professor Dr. Igor Cézar Pereira da Universidade Federal de Ouro Preto, por acreditar no trabalho desde o início, pelos ensinamentos valiosos, conselhos, apoio contínuo e contribuição decisiva ao longo da minha formação. Sem sua ajuda, a realização deste doutorado não teria sido possível. Muito obrigado!

Ao meu colega de trabalho, Marconi Cosme Silva, pelo apoio e incentivo, tanto na realização dos ensaios quanto na busca pela concretização deste sonho. Muito obrigado!

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), à Escola de Minas, ao Laboratório de Usinagem e ao Laboratório de Acústica, Vibrações e Sistemas Inteligentes (LAViSI), pelo suporte, infraestrutura e oportunidades concedidas ao longo deste projeto.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e de Usinagem Convencional (LUC), pelo acolhimento, estrutura e colaboração fundamentais ao desenvolvimento desta pesquisa.

Às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelo apoio financeiro que viabilizou a execução deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização desta tese. A cada palavra de incentivo, gesto de apoio ou colaboração técnica, deixo aqui o meu sincero agradecimento.

**FORTES, R. C. Identificação da formação de aresta postiça de corte no corte ortogonal do aço ABNT 1050 por meio de sinais de vibração e pressão sonora.** 2025, 154 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – MG

## RESUMO

Este trabalho propôs e validou uma metodologia experimental para a identificação da formação da aresta postiça de corte (APC), fenômeno recorrente na usinagem que compromete a qualidade superficial das peças e a vida útil da ferramenta. A investigação baseou-se na análise de fragmentos aderidos à superfície lisa e à extremidade do cavaco, gerados em ensaios de corte ortogonal no aço ABNT 1050. A abordagem combinou a análise microestrutural dos cavacos com sinais dinâmicos de vibração (eixos Y e Z) e de pressão sonora (PS), permitindo a correlação entre os eventos físicos do processo e a formação ou o desprendimento da APC. Um corpo de prova especial foi projetado para melhor observação do fenômeno, com início de corte suavizado e comprimento útil limitado, favorecendo o controle da geração de cavacos. A análise de microdureza confirmou a formação da APC, registrando aumento de 18% no corpo do cavaco em relação ao material em estado de fornecimento e de até 80% nas regiões com APC. A maioria dos fragmentos apresentou comprimento entre 0,1 mm e 0,4 mm, representando 75% das ocorrências nos ensaios com uma seção transversal e 92% nos ensaios com três seções. A análise espectral dos sinais revelou o fenômeno do silêncio, interpretado como a interrupção momentânea do corte causada pelo desprendimento da APC, perceptível sobretudo no eixo Z. A coincidência entre as posições dos fragmentos e os sinais de silêncio foi, em média, de 65% no eixo Z (com picos de 83%) e de 47% no eixo Y (com picos de 71%). O sinal de NPS não foi eficaz na análise pontual. A Análise de Componentes Principais (PCA) não apresentou resultados satisfatórios para a identificação direta da APC, devido à baixa variabilidade entre os sinais. Em contrapartida, a Transformada Contínua de Wavelet (CWT) demonstrou elevada acurácia, com média de coincidência de 84% no eixo Z, 72% no eixo Y e 80% no NPS. Assim, a metodologia proposta revelou-se eficaz, acessível e promissora para o monitoramento da APC, contribuindo para o avanço do controle de qualidade em processos de usinagem.

---

Palavras chave: *Aresta postiça de corte; Corte ortogonal; Sinais de vibrações; Nineis de pressão sonora; Análise de cavacos; Transformada contínua de Wavelet; Monitoramento de processos de usinagem.*

**FORTES, R. C. Identification of Built-Up Edge Formation in the Orthogonal Cutting of AISI 1050 Steel Through Vibration and Sound Pressure Signals.** 2025, 154 s. Doctoral thesis, Federal University of Uberlandia – MG.

## ABSTRACT

This study proposed and validated an experimental methodology for identifying the formation of the built-up edge (BUE), a recurrent phenomenon in machining that compromises the surface quality of workpieces and reduces tool life. The investigation was based on the analysis of fragments adhered to the smooth surface and tip of the chip, generated in orthogonal cutting tests on AISI 1050 steel. The approach combined the microstructural analysis of the chips with dynamic vibration signals (Y and Z axes) and sound pressure (SP) signals, allowing the correlation between the physical events of the process and the formation or detachment of the BUE. A special workpiece was designed to enhance the observation of the phenomenon, featuring a smooth cutting entry and a limited effective length to control chip generation. The microhardness analysis confirmed the formation of the BUE, showing an increase of 18% in the chip body compared to the as-received material and up to 80% in the regions containing BUE fragments. Most of the fragments exhibited lengths between 0.1 mm and 0.4 mm, representing 75% of occurrences in the tests with one cross-section and 92% in the tests with three sections. The spectral analysis of the signals revealed the “silence” phenomenon, interpreted as the momentary interruption of cutting caused by the detachment of the BUE, mainly observed in the Z-axis signals. The coincidence between the fragment positions and the silence events averaged 65% in the Z-axis (with peaks of 83%) and 47% in the Y-axis (with peaks of 71%). The SP signal was not effective for pointwise analysis. The Principal Component Analysis (PCA) did not yield satisfactory results for direct BUE identification due to the low variability among the signals. Conversely, the Continuous Wavelet Transform (CWT) demonstrated high accuracy, with an average coincidence of 84% in the Z-axis, 72% in the Y-axis, and 80% in the SP signal. Therefore, the proposed methodology proved to be effective, accessible, and promising for BUE monitoring, contributing to advances in quality control of machining processes.

---

Keywords: *Built-up edge; Orthogonal cutting; Vibration signals; Sound pressure levels; Chip analysis; Continuous Wavelet Transform; Machining process monitoring.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Torno horizontal universal e seus componentes. Fonte: CERVELIN, 2009.....	9
Figura 2 - Operações de corte ortogonal no torneamento. Fonte: FERRARESI, 1977.....	9
Figura 3 - Modelo geométrico de formação de cavaco no corte ortogonal de mergulho. Fonte: MACHADO et al., 2009.....	11
Figura 4 - Tipos de cavacos obtidos com o quick-stop. Fonte: TRENT, 2000 .....	13
Figura 5 - Classificação da forma do cavaco em usinagem dos metais. Fonte: Adaptado de ALTINTAS, 2000.....	14
Figura 6 - Detalhe da secção depois do Quick-stop do corte em alta velocidade, apresentando a zona de fluxo no aço carbono 0,1 %. Fonte: TRENT, 2000.....	16
Figura 7 - Detalhe da seção depois do Quick-stop da usinagem em baixa velocidade de corte, apresentando a aresta postiça de corte no aço 0,15% de carbono. Fonte: Adaptado de TRENT, 2000.....	17
Figura 8 - Efeito da velocidade de corte na amplitude de vibração durante a usinagem do alumínio 2024-T351 com avanço de 0,15 mm/volta. Fonte: Adaptado de FANG et al., 2010. ....	18
Figura 9 - Tabela de usinagem para a ferramenta de corte em metal duro na usinagem do aço de livre corte com baixo carbono. Fonte: Adaptado de TRENT, 2000 .....	19
Figura 10 - Esquema dos tipos de sinais com classificações e exemplos. Fonte: Adaptado de SANTOS, 2021.....	30
Figura 11 - Exemplos de análises no domínio do tempo e frequência.....	31
Figura 12 - Bandas de análise das transformadas de Fourier e <i>Wavelets</i> . Fonte: Adaptado de Machado, 2014 .....	32
Figura 13 - Transformada Discreta de <i>Wavelet</i> . Fonte: Misiti <i>apud</i> Alves, 2022 .....	33
Figura 14 - Famílias <i>Wavelet</i> .....	36
Figura 15 - Gráfico <i>scree</i> para análise por componentes principais. Fonte: Papandrea, et al. (2020). .....	40
Figura 16 - Corte ortogonal de mergulho em discos .....	44

Figura 17 - Desenho do corpo de prova utilizado no estudo para identificação da APC, destacando o detalhe do design destinado à limitação do comprimento do cavaco (a); Corpo de prova confeccionado em aço ABNT 1050 (b).....	45
Figura 18 - Ângulos da ferramenta de corte em metal duro.....	46
Figura 19 - Torno CNC ROMI Centur 30D .....	46
Figura 20 - Montagem do experimento e posicionamento dos sensores .....	47
Figura 21 - Esquema de montagem do sistema de aquisição de dados .....	48
Figura 22 - Detalhe do acionamento do <i>trigger</i> no início e término do corte no sinal de vibrações.....	49
Figura 23 - (a) Cavaco retido na ferramenta após ensaio a 40 m/min. (b) Cavaco em formato espiral obtido em ensaio a 30 m/min .....	51
Figura 24 - Cavaco obtido a 50 m/min com ampliação de 100x – Microestrutura .....	52
Figura 25 - Vista lateral do cavaco com a predefinição das seções a serem analisadas.....	53
Figura 26 - Ensaio de impacto na ferramenta fixada no suporte – Direção do eixo Z .....	55
Figura 27 - Representação dos sinais nos domínios do tempo e da frequência - Ensaio 10 – vc: 50 m/min, fn: 0,2 mm/volta – df: 1 Hz .....	56
Figura 28 - Exemplo dos intervalos avaliados em torno da APC identificada no cavaco.....	57
Figura 29 - Representação dos intervalos no domínio do tempo correspondentes à APC e às regiões adjacentes.....	58
Figura 30 - (a) Comparaçao dos espectros nas regiões próximas à posição da APC, sem aplicação de zero <i>padding</i> . (b) Com aplicação de zero <i>padding</i> .....	59
Figura 31 - Exemplo de sinal de aceleração com 2600 amostras. Detalhe para o formato da onda original, sem interpolação.....	63
Figura 32 - Interpolação do sinal de aceleração com 2600 amostras para 436800 amostras. Detalhe para a forma da onda após a inserção de zeros entre os dados originais. .....	64
Figura 33 - Sinal de aceleração interpolado após aplicação de filtro digital passa-baixa. Detalhe para a forma da onda resultante, preservando o perfil do sinal original.....	64

Figura 34 - Decimação do sinal de aceleração após interpolação e aplicação de filtro digital. Detalhe para a forma da onda resultante, ajustada ao tamanho do vetor de referência.....	65
Figura 35 - (a) Aplicação pontual da <i>Wavelet-mãe</i> em uma posição aleatória do sinal, com o sinal original e a <i>Wavelet-mãe</i> ampliada. (b) Aplicação da CWT em 92 intervalos do sinal original.....	67
Figura 36 - (a) Aplicação da <i>Wavelet Morlet</i> a um sinal de aceleração. (b) Aplicação da <i>Wavelet Chapéu Mexicano</i> ao mesmo ponto do sinal.....	68
Figura 37 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 3: $v_c$ : 30 m/min e $f_n$ : 0,1 mm/volta. ....	70
Figura 38 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 5: $v_c$ : 30 m/min e $f_n$ : 0,2 mm/volta. ....	70
Figura 39 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 8: $v_c$ : 50 m/min e $f_n$ : 0,1 mm/volta. ....	71
Figura 40 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 12: $v_c$ : 50 m/min e $f_n$ : 0,2 mm/volta. ....	71
Figura 41 - (a) Superfície inferior de um cavaco sem presença de APC; (b) Extremidade final do cavaco sem APC aderida. Imagens referentes ao Ensaio 13, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 100 m/min e avanço ( $f_n$ ) de 0,2 mm/volta. ....	71
Figura 42 - Imagens da extremidade final dos cavacos obtidos nos Ensaios 16 a 23 - Ampliação 50X .....	72
Figura 43 - Curva velocidade de corte pela força de corte no torneamento cilíndrico externo do aço ABNT 1050.....	74
Figura 44 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 3, com seis fragmentos de APC na superfície inferior. Ampliação de 50X.....	75
Figura 45 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 5, com dois fragmentos de APC na superfície inferior. Ampliação de 50X.....	76

Figura 46 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 8, com dez fragmentos de APC na superfície inferior. Ampliação de 50X.....	76
Figura 47 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 12, com oito fragmentos de APC distribuídos na superfície inferior. Ampliação de 50X. ....	76
Figura 48 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 13, sem presença de fragmentos de APC na superfície inferior ou na extremidade final. Ampliação de 50X. ....	76
Figura 49 - Gráfico da variação da microdureza no material ABNT 1050 da peça, no corpo do cavaco e na APC.....	77
Figura 50 - Distribuição do comprimento dos fragmentos de APCs encontradas em cada ensaio de 1 a 12.....	79
Figura 51 - Concentração dos comprimentos das arestas postiças de corte considerando todos os ensaios de 1 a 12 .....	80
Figura 52 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo - Ensaio 1 .....	82
Figura 53 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 1 .....	82
Figura 54 - Scores das CP1 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 1 .....	83
Figura 55 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP3 – Domínio do tempo - Ensaio 1 .....	83
Figura 56 - Scores das CP2 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 1 .....	83
Figura 57 - Contribuição de cada variável original para as CP2 e CP3 – Domínio do tempo - Ensaio 1 .....	83
Figura 58 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo - Ensaio 9 .....	83
Figura 59 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 9 .....	83
Figura 60 - Scores das CP1 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 9 .....	84
Figura 61 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 9 .....	84
Figura 62 - Scores das CP2 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 9 .....	84

Figura 63 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 9 .....	84
Figura 64 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo - Ensaio 14.....	85
Figura 65 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 14 .....	85
Figura 66 - Scores das CP1 x CP2 no domínio da frequência - Ensaio 1 – Eixo Y .....	85
Figura 67 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio da frequência - Ensaio 1 .....	85
Figura 68 - Scores das CP1 x CP2 no domínio da frequência - Ensaio 9 – Eixo Z .....	86
Figura 69 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio da frequência - Ensaio 9 .....	86
Figura 70 - Scores das CP1 x CP2 no domínio da frequência - Ensaio 14 - PS.....	86
Figura 71 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio da frequência - Ensaio 14 .....	86
Figura 72 - <i>Scores</i> das CP1 x CP2 no domínio do tempo – Eixo Z .....	88
Figura 73 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo – Eixo Z	88
Figura 74 - <i>Scores</i> das CP1 x CP2 no domínio do tempo – Eixo Y .....	88
Figura 75 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo – Eixo Y	88
Figura 76 - <i>Scores</i> das CP1 x CP2 no domínio do tempo – PS .....	88
Figura 77 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo – PS .....	88
Figura 78 - FRF do ensaio de impacto na montagem da ferramenta e seu suporte, com balanço de 40 mm. ....	89
Figura 79 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 2, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC. ....	90
Figura 80 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 6, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC. ....	91
Figura 81 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 2, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC. ....	91

Figura 82 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 11, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC. ....	92
Figura 83 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 13. ....	92
Figura 84 - Espectros obtidos a partir dos sinais adquiridos na direção do eixo Z - Ensaios 1 a 15. ....	93
Figura 85 - Espectros obtidos a partir dos sinais adquiridos na direção do eixo Y - Ensaios 1 a 15. ....	94
Figura 86 - Espectros obtidos a partir dos sinais de PS referentes aos Ensaios 1 a 15. ....	94
Figura 87 - Representação dos espectros em cascata na direção Y - Ensaios 1 a 15. ....	95
Figura 88 - Representação dos espectros em cascata na direção Z - Ensaios 1 a 15.....	96
Figura 89 - Representação dos espectros em cascata do sinal de PS - Ensaios 1 a 15.....	96
Figura 90 - Sinal no domínio do tempo do Ensaio 2, com posições dos fragmentos de APC e regiões sem fragmentos selecionadas para análise espectral. ....	98
Figura 91 - Sinal no domínio do tempo do Ensaio 11, com posições dos fragmentos de APC e regiões sem fragmentos selecionadas para análise espectral. ....	98
Figura 92 - Espectros (eixo Z) ao redor de fragmentos de APC e regiões sem APC – Ensaio 2. Zero <i>padding</i> – Resolução: 1 Hz. ....	100
Figura 93 - Espectros (eixo Z) ao redor dos fragmentos das APCs e regiões sem APC – Ensaio 11 - (vc: 50 m/min e fn: 0,2 mm/volta). Zero <i>padding</i> – Resolução: 1 Hz. ....	102
Figura 94 - Ilustração de um cavaco evidenciando bordas dos fragmentos de APC ao longo da superfície inferior. ....	103
Figura 95 - Imagens microestruturais do final do cavaco do Ensaio 6 (vc: 30 m/min e fn: 0,2 mm/volta) (a), Ensaio 9 (vc: 50 m/min e fn: 0,1 mm/volta) (b), Ensaio 11 (vc: 50 m/min e fn: 0,1 mm/volta) (c). ....	104
Figura 96 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 25 – vc: 20 [m/min], fn: 0,2 [mm/volta]. ....	107
Figura 97 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 26 – vc: 30 [m/min], fn: 0,2 [mm/volta]. ....	107

Figura 98 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 28 – $v_c$ : 40 [m/min], $f_n$ : 0,2 [mm/volta].....	108
Figura 99 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 30 – $v_c$ : 50 [m/min], $f_n$ : 0,2 [mm/volta].....	108
Figura 100 - Distribuição do comprimento dos fragmentos das APCs encontradas em cada ensaio de 24 a 31 .....	109
Figura 101 - Concentração dos comprimentos dos fragmentos de APCs considerando todos os ensaios de 24 a 31 .....	109
Figura 102 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c$ : 20 [m/min] e $f_n$ : 0,2 [mm/volta].....	113
Figura 103 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c$ : 20 [m/min] e $f_n$ : 0,2 [mm/volta].....	113
Figura 104 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c$ : 20 [m/min] e $f_n$ : 0,2 [mm/volta].....	114
Figura 105 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c$ : 20 [m/min] e $f_n$ : 0,2 [mm/volta].....	114
Figura 106 - Escalograma tridimensional obtido por meio da CWT aplicada ao sinal do eixo Z no Ensaio 2 – $v_c$ :30 m/min e $f_n$ : 0,1 mm/volta – df: 12 Hz.....	115
Figura 107 - Análise por CWT com corte na amplitude de 35,4 m/s <sup>2</sup> aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 2 na direção do eixo Z– $v_c$ :30 m/min e $f_n$ : 0,1 mm/volta – df: 12 Hz.....	116
Figura 108 - Análise por CWT com corte na amplitude de 11,3 m/s <sup>2</sup> aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 2 na direção de Y– $v_c$ :30 m/min e $f_n$ : 0,1 mm/volta – df: 12 Hz..	117
Figura 109 - Análise por CWT com corte na amplitude de 0,22 Pa aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 2 em PS– $v_c$ :30 m/min e $f_n$ : 0,1 mm/volta – df: 12 Hz.....	118
Figura 110 - Análise por CWT com corte na amplitude de 35,4 m/s <sup>2</sup> aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 13 no eixo Z– $v_c$ :100 m/min e $f_n$ : 0,2 mm/volta – df: 32 Hz.....	119
Figura 111 – Corte em 22 m/s <sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Z do ensaio 24– $v_c$ :20 m/min e $f_n$ : 0,2 mm/volta - df: 8 Hz.....	121

Figura 112 – Corte em 7,9 m/s <sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Y do ensaio 24– vc:20 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 8 Hz.....	121
Figura 113 – Corte em 0,2 Pa do escalograma tridimensional do sinal de PS do ensaio 24– vc:20 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 8 Hz.....	122
Figura 114 - Corte em 48 m/s <sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Z do ensaio 27– vc:30 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 12 Hz .....	122
Figura 115 - Corte em 15 m/s <sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Y do ensaio 27– vc:30 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 12 Hz .....	123
Figura 116 – Corte em 0,4 Pa do escalograma tridimensional do sinal de PS do ensaio 27– vc:30 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 12 Hz.....	123
Figura 117 - Corte em 69,2 m/s <sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Z do ensaio 29– vc:40 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 16 Hz.....	124
Figura 118 - Corte em 21,4 m/s <sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Y do ensaio 29 – vc:40 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 16 Hz.....	124
Figura 119 - Corte em 0,5 Pa do escalograma tridimensional do sinal de PS do ensaio 29– vc:40 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 16 Hz.....	125
Figura 120 – Espectros (eixo Y) ao redor de fragmentos de APC e regiões sem APC – Ensaio 2. Zero <i>padding</i> – Resolução: 1 Hz.....	136
Figura 121 - Espectros (eixo Y) ao redor de fragmentos de APC e regiões sem APC – Ensaio 11. Zero <i>padding</i> – Resolução: 1 Hz .....	137
Figura 122 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 (v <sub>c</sub> : 20 [m/min] e f <sub>n</sub> : 0,2 [mm/volta].....	138
Figura 123 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 26 (v <sub>c</sub> : 30 [m/min] e f <sub>n</sub> : 0,2 [mm/volta].....	138
Figura 124 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 28 (v <sub>c</sub> : 40 [m/min] e f <sub>n</sub> : 0,2 [mm/volta].....	139
Figura 125 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 31 (v <sub>c</sub> : 50 [m/min] e f <sub>n</sub> : 0,2 [mm/volta].....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de corte variados nos ensaios .....	50
Tabela 2 - Quantidade de fragmentos de APCs e seus comprimentos, encontradas em cada ensaio (1 a 12). .....	78
Tabela 3 - Tempo total de usinagem e instantes iniciais dos fragmentos das APCs referentes aos ensaios 1 ao 12 .....	81
Tabela 4 - Coincidência percentual entre “silêncios” e alterações espetrais associadas a fragmentos de APCs.....	105
Tabela 5 - Quantidade de fragmentos de APC e respectivos comprimentos identificados em cada uma das três seções dos cavacos referentes aos Ensaios 24 a 31 .....	110
Tabela 6 - Tempo total de usinagem e instantes iniciais dos fragmentos de APC referentes Ensaios 24 ao 31 .....	111

## LISTA DE ABREVIASÕES E SÍMBOLOS

a	Coeficiente de escala
ap	Profundidade de corte [mm]
A	Amplitude do sinal [ $m/s^2$ ]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	Aresta Postiça de Corte
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
b	Coeficiente de translação
CWT	Transformada Contínua de <i>Wavelet</i>
DWT	Transformada Discreta de <i>Wavelet</i>
f	Frequência [Hz]
$f_n$	Avanço [mm/volta]
FRF	Função de Resposta em Frequência
FFT	Transformada Rápida de Fourier
h	Espessura de corte [mm]
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAViSI	Laboratório de Análises de Vibrações e Sistemas Inteligentes
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
PCA	Análise por Componentes Principais
PC1, PC2, PC3...	Primeira, segunda, terceira componente principal
PS	Pressão Sonora [Pa]
QSD	<i>Quick-Stop Devices</i>
Ra	Rugosidade média aritmética
Rc	Grau de recalque

RMS	Raiz Média Quadrática
Rz	Rugosidade média dos cinco maiores picos e vales
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
$v_c$	Velocidade de corte [m/min]
$\psi(t)$	Função <i>Wavelet-mãe</i> no domínio do tempo
$\gamma$	Ângulo de saída da ferramenta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
1.1 Considerações iniciais .....	5
1.2 Objetivo .....	7
1.2.1 Objetivo geral.....	7
1.2.2 Objetivos específicos .....	7
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
2.1 Torneamento.....	8
2.1.1 Corte ortogonal.....	9
2.2 Formação do cavaco .....	11
2.2.1 Tipos de cavaco.....	12
2.2.2 Formas do cavaco.....	13
2.3 Dispositivos de parada rápida na investigação da formação do cavaco .....	14
2.4 Aresta postiça de corte (APC) .....	15
2.4.1 Fases de formação da APC .....	17
2.4.2 Influência da APC no torneamento .....	19
2.5 Monitoramento da usinagem no torneamento .....	22
2.5.1 Vibrações mecânicas em máquinas ferramentas.....	23
2.5.2 Monitoramento do torneamento por vibrações mecânicas.....	23
2.5.3 Sinais acústicos .....	25
2.5.4 Monitoramento do torneamento por sinais acústicos.....	26
2.6 Análise no domínio da frequência .....	27
2.6.1 Tipos de sinais.....	29
2.7 Análise por transformada de <i>Wavelet</i> (WT).....	31
2.7.1 Transformada contínua de <i>Wavelet</i> (CWT) .....	32
2.7.2 Transformada discreta de <i>Wavelet</i> (DWT) .....	33
2.7.3 Famílias de <i>Wavelet</i> .....	35
2.7.4 Análises aplicando a transformada de <i>Wavelet</i> .....	36
2.8 Análise por componentes principais (PCA) .....	38
2.8.1 Análise de componentes principais aplicados em processos de usinagem .....	40
<b>CAPÍTULO III - METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
3.1 Corpo de prova .....	44

3.2 Ferramenta de corte .....	46
3.3 Configuração dos ensaios .....	46
3.4 Aquisição dos sinais de usinagem .....	47
3.5 Parâmetros de usinagem .....	49
3.6 Procedimentos para análise dos cavacos .....	50
3.6.1 Microdureza .....	53
3.7 Teste de impacto do sistema de fixação da ferramenta de corte .....	53
3.8 Análise no domínio do tempo e da frequência .....	55
3.8.1 Preenchimento com zeros ( <i>Zero padding</i> ) .....	58
3.9 Procedimentos para análise por componentes principais .....	59
3.9.1 Interpolação e decimação .....	62
3.9.2 Procedimentos para análise por transformada de <i>Wavelet</i> .....	65
3.9.3 Aplicação da CWT nos sinais experimentais .....	66
3.9.4 <i>Wavelet</i> - Mãe utilizada na análise .....	68
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
4.1 Análise macroscópica .....	70
4.1.1 Identificação da APC na extremidade final do cavaco .....	72
4.1.2 Ensaio complementar - Velocidade de corte x Força de corte .....	73
4.2 Análise da microestrutura do cavaco em uma seção .....	74
4.2.1 Ensaio de microdureza .....	77
4.2.2 Quantidade, comprimento e posição dos fragmentos de APCs em uma seção .....	78
4.3 Análise por componentes principais (PCA) .....	81
4.4 Teste de impacto na ferramenta com suporte fixo na máquina .....	89
4.5 Análise no domínio do tempo e frequência .....	90
4.5.1 Análise na região com presença de APC no cavaco .....	97
4.6 Análise por transformada <i>Wavelet</i> contínua (CWT) .....	106
4.6.1 Análise microestrutural do cavaco em várias seções .....	106
4.6.2 Transformada <i>Wavelet</i> contínua (CWT) .....	114
<b>CAPÍTULO V - CONCLUSÕES .....</b>	<b>126</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	129
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>136</b>

<b>APÊNDICE II .....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE III.....</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE IV.....</b>	<b>139</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações iniciais

As indústrias do setor de usinagem têm buscado constantemente reduzir o número de paradas de máquinas, aumentar a confiabilidade da ferramenta de corte, melhorar a qualidade do produto final e reduzir custos por meio da adoção de tecnologias avançadas e análise de dados. No entanto, informações imprecisas podem levar a decisões equivocadas, resultando na redução da produtividade e na perda de participação no mercado comercial (EGLES, 2017).

Os processos de usinagem modernos requerem o monitoramento contínuo de seu desempenho, incluindo o desgaste da ferramenta, a qualidade da superfície usinada e a formação da Aresta Postiça de Corte (APC). Esse monitoramento pode ser realizado através de diversos métodos não invasivos, como a análise do sinal de vibrações, forças de corte, emissão acústica, temperatura de corte, impedância eletromecânica, entre outros (FANG et al., 2010; BRITO, 2018).

A identificação e o monitoramento da APC são fundamentais para a otimização dos processos de usinagem e para a maximização da vida útil da ferramenta de corte. Diversas técnicas podem ser utilizadas para detectar a presença da APC, incluindo a análise do sinal de vibração, a análise da força de corte, a análise da emissão acústica, entre outras. Além disso, a aplicação de revestimentos de ferramentas com alta resistência ao desgaste pode ajudar a minimizar a formação da APC e prolongar a vida útil da ferramenta de corte. A compreensão dos fatores que influenciam a formação da APC e sua mitigação é fundamental para garantir a

qualidade do produto final e reduzir custos no processo de usinagem (PALMÁI; CSERNÁK, 2013).

Segundo Brito (2018), o processo de torneamento é amplamente utilizado na indústria metal mecânica entre outras, sendo considerado, portanto, um dos processos de usinagem mais empregados e comuns, de forma que, é essencial para o setor de fabricação. No entanto, apesar das recentes evoluções tecnológicas em materiais e ferramentas, a troca de ferramentas de corte ainda é uma atividade que causa grande despesa nesse processo de usinagem. Ainda segundo o autor, com o monitoramento contínuo, é possível detectar eventuais problemas e tomar medidas preventivas antes que ocorram falhas catastróficas que possam prejudicar todo o processo produtivo. O método indireto de monitoramento é muito vantajoso para a indústria, pois não é necessário interromper o processo de torneamento para realizar a análise, o que reduz o tempo de inatividade da máquina e aumenta a eficiência da produção.

O monitoramento por vibrações é uma técnica amplamente estudada há vários anos e representa um desafio para a automação da maioria dos processos de usinagem, incluindo o torneamento. Nesse processo, são identificados três tipos de vibrações mecânicas devido à falta de rigidez do sistema máquina-ferramenta: vibrações livres, forçadas e auto excitadas. (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012).

A formação da APC pode levar à instabilidade de corte e, consequentemente, a vibrações de corte que prejudicam a qualidade do produto e aumentam o desgaste da ferramenta, além de implicar em retrabalho de peças. Portanto, o controle da formação da APC é essencial para garantir a estabilidade do corte e a qualidade do processo de usinagem (FANG et al., 2010).

A formação da APC ocorre em diversos processos de fabricação que utilizam ferramentas de corte, como torneamento, fresamento, furação e rosqueamento. Apesar de ser um fenômeno amplamente observado, o desprendimento da APC ainda é pouco compreendido, uma vez que ocorre de forma rápida, intermitente e geralmente em baixas velocidades de corte. A presença da APC durante a usinagem pode comprometer o desempenho do processo, afetando a qualidade superficial das peças, a rugosidade e a precisão dimensional. Além disso, contribui para o desgaste prematuro da ferramenta e para o aumento da taxa de retrabalho das peças fabricadas, elevando custos e reduzindo a produtividade (PARIS et al., 2020).

O monitoramento e a correlação dos sinais de vibração e pressão sonora (PS) com os fenômenos físicos associados à formação e ao desprendimento da APC constituem um desafio relevante na área de usinagem, representando um campo promissor para o avanço do diagnóstico e controle de processos de corte metálico.

A seguir, são apresentadas as etapas desenvolvidas neste trabalho. O Capítulo I corresponde à introdução, na qual se expõe uma fundamentação teórica sobre o tema da tese e seus objetivos, evidenciando a importância da realização deste estudo. No Capítulo II, é apresentada a revisão bibliográfica, abordando o monitoramento de corte no torneamento, a formação da APC, a análise de dados por métodos convencionais (domínio do tempo e da frequência), a análise estatística por componentes principais (PCA) e o método de análise por transformada de *Wavelet*. No Capítulo III é descrita a metodologia empregada na realização dos ensaios, bem como os métodos de análise de sinais, equipamentos e ferramentas utilizados. No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos e a discussão sobre as possíveis correlações entre o fenômeno da APC e os sinais de vibração e PS durante o corte. Por fim, no Capítulo V são apresentadas as conclusões referentes ao que foi discutido no Capítulo IV, além de sugestões para trabalhos futuros.

## **1.2 Objetivo**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Identificar a formação da APC no aço ABNT 1050 durante o processo de corte ortogonal de mergulho, por meio da análise dos sinais de vibrações (aceleração) e pressão sonora.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- 1) Identificar a presença de fragmentos da APC no cavaco;
- 2) Avaliar o comportamento dinâmico da montagem do sistema;
- 3) Analisar se há correlação entre a aresta postiça de corte e o método convencional de análise de sinais nos sinais de vibrações e pressão sonora;
- 4) Analisar se há correlação entre a formação de APC e o método de Análise por Componentes Principais (PCA) nos sinais de vibrações e pressão sonora;
- 5) Analisar se há correlação entre a formação de APC e o método de *Wavelet* na análise dos sinais de vibrações e pressão sonora;

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os principais tópicos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho, abordando o processo de torneamento, a formação de cavacos, a aresta postiça de corte (APC), os métodos de identificação da APC e as técnicas de análise de sinais. Entre estas, destacam-se a análise convencional nos domínios do tempo e da frequência, o método estatístico de Análise por Componentes Principais (PCA) e a Transformada de *Wavelet*.

#### 2.1 Torneamento

A usinagem é um termo que engloba uma ampla variedade de processos de fabricação, nos quais o material é removido de uma peça na forma de cavaco para dar forma e dimensões pré-definidas. Esses processos são divididos em dois tipos: aqueles que utilizam geometria definida da ferramenta de corte, como torneamento, aplainamento, furação, fresamento, entre outros. O outro grupo refere-se aqueles processos que utilizam ferramentas de geometria não definida da aresta de corte, como retificação e outros processos abrasivos (ALTINTAS, 2000).

O torneamento é um dos processos mais comuns na indústria e em trabalhos acadêmicos experimentais de usinagem. Esse processo é responsável pela produção de peças com perfis cilíndricos, cônicos, esféricos, roscas, sulcos e canais, entre outros, por meio da utilização de uma ferramenta de corte fixada em um porta-ferramentas (TRENT, 2000). Na Figura 1, apresenta-se um exemplo de torno universal típico e seus principais componentes. Entre as operações de torneamento mais comuns, destacam-se o torneamento longitudinal externo e

interno, o torneamento cônico, o torneamento de perfil e de forma, o rebaixo externo, o faceamento, a furação, o sangramento, o rosqueamento e o recalcamento (CERVELIN, 2009).

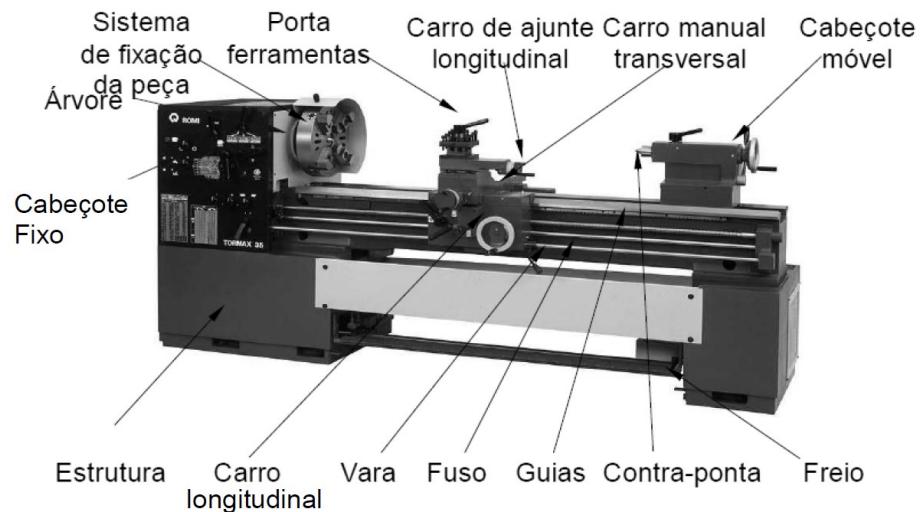
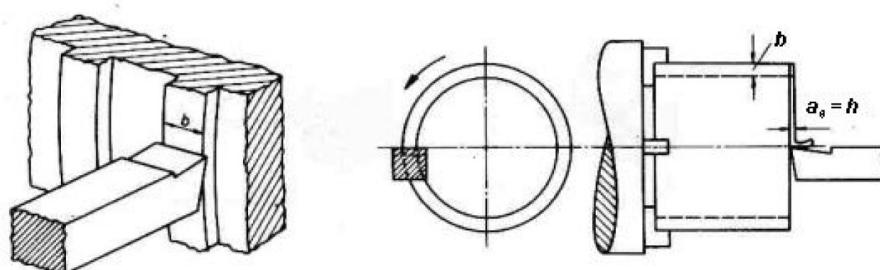


Figura 1 - Torno horizontal universal e seus componentes. Fonte: CERVELIN, 2009.

### 2.1.1 Corte ortogonal

Compreender um processo de corte torna-se bastante complexo devido a vários parâmetros de corte envolvidos. Por essa razão, muitos estudos utilizam condições de corte simplificadas, como o corte ortogonal, para investigar os processos de formação de cavacos. No torneamento ortogonal, a aresta de corte da ferramenta está posicionada perpendicularmente ao plano de trabalho, seguindo a direção de corte e avanço da ferramenta (TRENT, 2000). Na Fig. 2, é possível visualizar os dois tipos de corte ortogonal no torno.



(a) Corte ortogonal de mergulho

(b) Corte ortogonal lateral

Figura 2 - Operações de corte ortogonal no torneamento. Fonte: FERRARESI, 1977.

Conforme mencionado por Cervelin (2009), o corte ortogonal está associado a outras simplificações que facilitam a compreensão do processo e podem ser correlacionadas a processos de corte reais, sejam tridimensionais ou oblíquos. Essas simplificações são as seguintes:

- Os cavacos obtidos são contínuos;
- A aresta de corte é maior que a profundidade de corte ( $b$ ), como mostrado na Fig. 2(a);
- Não há expansão lateral do cavaco;
- A ferramenta é suficientemente afiada e perpendicular ao plano de trabalho;
- Não há contato entre a superfície de folga e a superfície usinada;
- A espessura do cavaco indeformado e velocidade de corte são constantes.

De acordo com Machado et al. (2009), com as simplificações mencionadas anteriormente, é possível estabelecer planos e relações geométricas importantes para compreender o processo de formação de cavacos por meio de equações matemáticas. A Fig. 3 apresenta o corte ortogonal e as correlações geométricas que definem o grau de recalque ( $R_a$ ), apresentado na Eq. (1), o qual é função das relações geométricas expressas na Eq. (2), resultando na Eq. (3), obtida pela substituição da Eq. (2) na Eq. (1). Nessa formulação,  $h$  representa a espessura de corte,  $h'$  a espessura do cavaco,  $\gamma$  o ângulo de saída da ferramenta e  $\Phi$  o ângulo do plano de cisalhamento.

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (1)$$

Tem-se também:

$$\sin \Phi = \frac{h}{l'} \rightarrow \sin(90 - \Phi + \gamma) = \frac{h'}{l'} \quad (2)$$

Reorganizando:

$$\tan \Phi = \frac{\cos \gamma}{R_c - \sin \gamma} \quad (3)$$

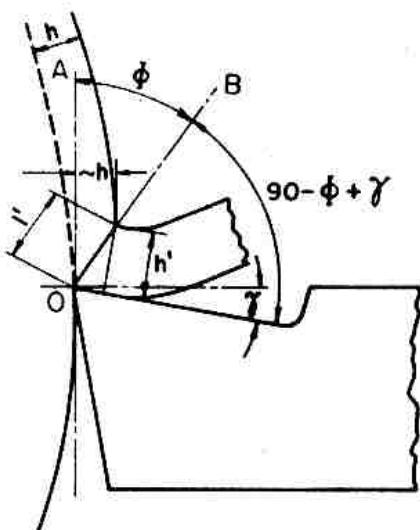


Figura 3 - Modelo geométrico de formação de cavaco no corte ortogonal de mergulho. Fonte: MACHADO et al., 2009.

As relações geométricas mostram que o plano de cisalhamento (B) é uma função do grau de recalque ( $R_c$ ) e do ângulo de saída da ferramenta ( $\gamma$ ). O ângulo de saída da ferramenta varia geralmente entre  $-10$  e  $10^\circ$ , e a dependência mais significativa do ângulo de cisalhamento ocorre em relação ao grau de recalque. Sempre há atrito na superfície de saída da ferramenta, onde o cavaco escoa, resultando em uma desaceleração do material que será transformado em cavaco. Portanto, a espessura do cavaco é sempre maior antes de sua formação, o que leva a um grau de recalque sempre superior a um. Além disso, considera-se que o volume de material permanece inalterado antes e depois da formação do cavaco (MACHADO et al., 2009).

## 2.2 Formação do cavaco

A compressão na formação do cavaco desempenha um papel fundamental no entendimento dos processos de usinagem. Isso tem levado a avanços significativos e contribuído para o aperfeiçoamento da geometria das ferramentas de corte, suas arestas e superfícies. Além disso, o estudo da formação do cavaco tem possibilitado o desenvolvimento de materiais de ferramentas mais eficazes, permitindo a usinagem de uma variedade de materiais utilizados na indústria (PEREIRA, 2011).

De acordo com Trent (2000), os principais problemas encontrados na usinagem estão diretamente relacionados à taxa de remoção de material e ao desempenho da ferramenta de corte. Esses problemas podem ser estudados por meio do comportamento do material da peça

durante o corte, bem como a dinâmica da formação e deslizamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. A formação do cavaco ocorre com altas velocidades de deformação e ruptura do material, e pode ser dividida em quatro etapas (MACHADO et al., 2009):

1. Recalque inicial: ocorre devido à penetração da cunha cortante da ferramenta na peça, resultando no recalcamento de uma pequena porção do material contra a superfície de saída da ferramenta.
2. Deformação e ruptura: o material recalcado passa por uma deformação elástica, seguida de deformação plástica, até que as tensões atinjam um ponto de ruptura. Nesse momento, inicia-se o deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça, sem que haja perda de coesão entre as partes. Essa região de deslizamento é conhecida como região de cisalhamento ou plano de cisalhamento.
3. Deslizamento das lamelas: à medida que o corte prossegue, ocorre uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento. A natureza do material determina o tipo de cavaco formado. Em materiais altamente dúcteis, o cavaco produzido é contínuo, enquanto em materiais frágeis, ocorre uma ruptura por cisalhamento.
4. Saída do cavaco: devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, o cavaco (porção de material deformado e rompido por cisalhamento) começa a se desprender e deslizar sobre a superfície da ferramenta. Enquanto isso, as etapas acima ocorrem instantaneamente, mantendo o ciclo de formação do cavaco.

O cavaco formado em condições normais de trabalho apresenta um padrão periódico, mesmo nos casos em que os cavacos são contínuos. Esse padrão consiste em uma sequência alternada de fases de recalque, ruptura, escorregamento e saída do cavaco, à medida que cada porção de material é removida. Essa sequência de eventos pode resultar em excitações dinâmicas na ferramenta de corte (MACHADO et al., 2009).

### **2.2.1 Tipos de cavaco**

De acordo com Trent (2000), Machado et al. (2009), Cervelin (2009) e Pereira (2011), a classificação dos cavacos está relacionada aos seus tipos e formas. Em relação ao tipo, os cavacos são divididos em:

Contínuos: Muito comuns em usinagem de materiais dúcteis, como alumínio, aços de baixa liga, cobre, entre outros. Nessa condição, o processo de corte é estável, iniciando-se com

uma fratura na zona de cisalhamento primária que provoca grandes deformações. O cavaco permanece homogêneo, sem fragmentação. Esse tipo de cavaco está associado a um baixo coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta, resultando em um melhor acabamento, maior vida útil da ferramenta e menor consumo de energia. A Fig. 4(a) ilustra o tipo de cavaco contínuo.

**Cisalhado:** É constituído por lamelas justapostas e bem distintas, como ilustrado na Fig. 4(b). Ocorre quando se inicia uma trinca no material no ponto mais solicitado ao longo do plano de cisalhamento, podendo ocorrer a ruptura parcial ou total do cavaco. No entanto, devido aos efeitos de pressão e temperatura, as lamelas se juntam, tornando o cavaco inteiriço.

**Segmentado ou lamelar:** Ocorre em materiais endurecidos com baixas propriedades térmicas, como o titânio e suas ligas. A energia aplicada no processo provoca o início de uma trinca no cavaco, que, devido ao calor gerado durante o corte, faz o material ficar mais dúctil e a trinca não se propaga completamente. Assim, o cavaco não se rompe completamente, conferindo-lhe uma aparência serrilhada, como ilustrado na Fig. 4(c).

**De ruptura ou arrancado:** Composto por fragmentos independentes e distintos, é muito comum em materiais frágeis, como ferro fundido cinzento, bronze, entre outros. A ferramenta recomendada deve ter ângulo de saída pequeno, nulo ou negativo.

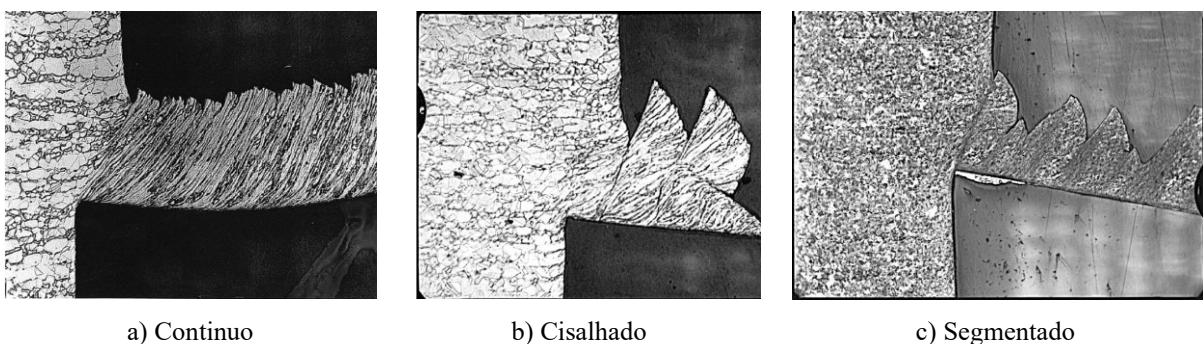


Figura 4 - Tipos de cavacos obtidos com o quick-stop. Fonte: TRENT, 2000

### 2.2.2 Formas do cavaco

O cavaco pode ser encontrado em quatro formas principais: em fita, helicoidal, espiral e em lascas ou fragmentos. No entanto, existe uma classificação mais detalhada da forma do cavaco realizada pela norma ISO 3685 (1993), conforme ilustrado na Fig. 5, que fornece as

classificações detalhadas da forma do cavaco. A forma e o tipo do cavaco são influenciados pelo material da peça, pelos parâmetros de corte e pelo uso ou não da quebra de cavaco na ferramenta (MACHADO et al., 2009).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
Fita	Emaranhado	Hélice Plana	Hélice Obliqua	Hélice Longa	Hélice Curta	Hélice Espiral	Espiral	Vírgulas Longas	Arrancados								
				Favorável													
		Aceitável															
Desfavorável																	

Figura 5 - Classificação da forma do cavaco em usinagem dos metais. Fonte: Adaptado de ALTINTAS, 2000.

### 2.3 Dispositivos de parada rápida na investigação da formação do cavaco

Segundo Trent (2000), o mecanismo mais eficaz para o estudo da formação do cavaco é a parada súbita do corte, conhecida como Quick-Stop, numa tentativa de congelar a operação para analisar a raiz do cavaco formado. O princípio de funcionamento consiste em, de alguma forma, impulsionar a ferramenta para longe da zona de corte, em uma velocidade significativamente superior à velocidade de corte empregada no processo. Essa técnica permite a observação de aspectos fundamentais da usinagem, como a microestrutura do cavaco e da peça, o plano de cisalhamento, a zona de fluxo e a presença da APC.

Os dispositivos de parada rápida (Quick-Stop Devices - QSDs) são amplamente utilizados em estudos sobre a formação da APC, pois possibilitam a captura do cavaco no instante exato da interrupção abrupta do corte, promovida pela remoção instantânea da ferramenta. A principal função do QSD é garantir que essa remoção ocorra a uma velocidade

superior à velocidade de corte, preservando ao máximo as características originais do cavaco e da interface de corte (PEREIRA, 2011).

Para que o QSD seja eficaz, sua atuação deve ser suficientemente rápida para evitar alterações metalúrgicas e geométricas indesejadas, além de apresentar características como fácil reutilização do Quick-stop, simplicidade operacional e segurança (CHERN, 2005).

Diversos modelos de QSDs foram desenvolvidos, com variações principalmente nos mecanismos de acionamento da ferramenta. Entre esses mecanismos, destacam-se sistemas com molas comprimidas acionadas por gatilho ou impacto (AZAM; AHMADLOO, 2016), pinos de sacrifício com acionamento manual, dispositivos hidráulicos e até mesmo mecanismos baseados em pólvora ou armas de fogo (MORENO, 2014). Há ainda modelos mais sofisticados, como o QSD assistido por computador, que permite o controle preciso dos parâmetros de usinagem e a captura de imagens em alta velocidade por meio de câmeras específicas (OZTURK; ALTAN, 2012).

Apesar da eficácia dos QSDs na investigação da formação do cavaco e da APC, sua aplicação envolve desafios significativos. Entre eles, destacam-se a necessidade de desenvolvimento e validação do dispositivo, bem como preocupações relacionadas à segurança do operador e à integridade dos equipamentos. Além disso, a complexidade, o custo e as limitações operacionais podem variar consideravelmente de acordo com o modelo adotado (MORENO, 2014).

#### **2.4 Aresta postiça de corte (APC)**

Durante a usinagem, dependendo das condições de corte, ocorrem dois fenômenos semelhantes, porém distintos: a zona de fluxo e a APC. Segundo Trent (2000), a zona de fluxo é o resultado da recuperação ou recristalização do material em um curto intervalo de tempo, quando o material é aquecido durante o corte e passa pela área de contato com a ferramenta. Nesse momento, o comportamento do material se assemelha mais a um fluido extremamente viscoso do que a um material sólido. Por isso, o termo "zona de fluxo" é usado para descrever essa região do cavaco. Como ilustrado na Fig. 6, não há uma separação clara entre a zona de fluxo e o corpo do cavaco, mas sim uma transição gradual da microestrutura entre as regiões.

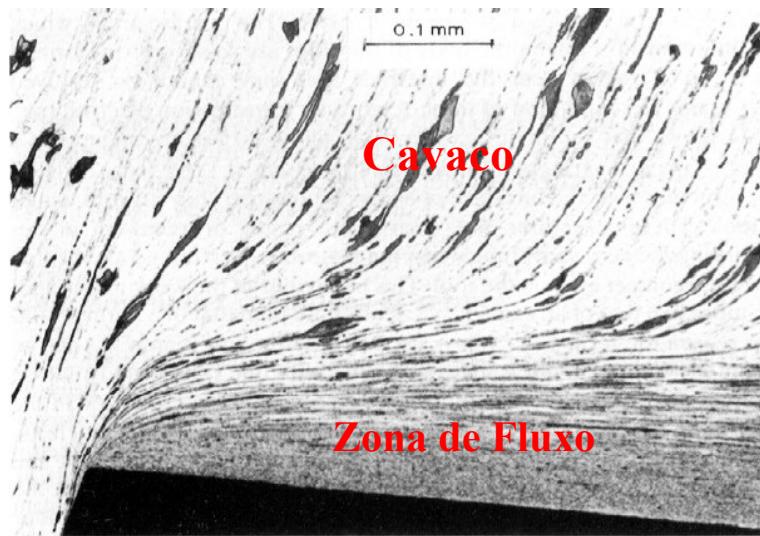


Figura 6 - Detalhe da secção depois do Quick-stop do corte em alta velocidade, apresentando a zona de fluxo no aço carbono 0,1 %. Fonte: TRENT, 2000.

Aresta postiça de corte ocorre em materiais que possuem mais de uma fase em sua composição, como é o caso do aço de baixo carbono, que contém ferrita e perlita em sua estrutura. Geralmente, a APC é formada durante a usinagem de materiais dúcteis em baixas velocidades de corte. Na região da APC, o material é intensamente endurecido devido ao encruamento, e sua formação não é periódica. A quebra parcial ou total da APC resulta em maior rugosidade superficial, defeitos na superfície, controle dimensional reduzido e maior desgaste das ferramentas (ZHANG et al., 2021).

No entanto, a temperatura não atinge níveis suficientes para que ocorra o estágio de recristalização do material na região da APC. A estrutura da APC apresenta semelhanças significativas com as estruturas equiaxiais da zona de fluxo mencionada anteriormente (Fig. 6), e sua microdureza pode chegar a 600-650 HV. Na Fig. 7 é possível observar a aparência da APC e sua semelhança com a zona de fluxo apresentada na Fig. 6 (TRENT, 2000).

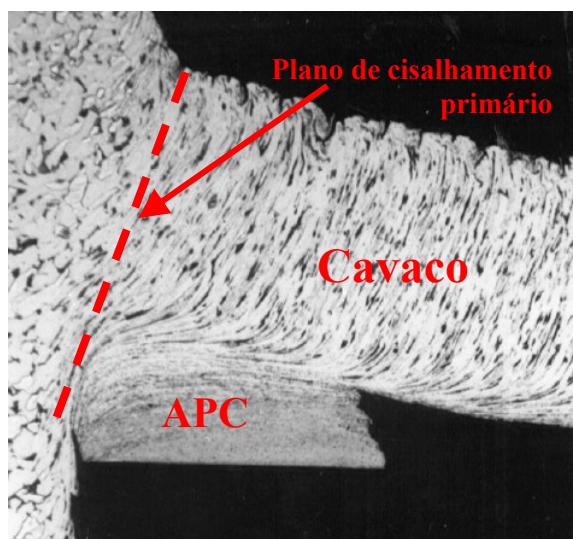


Figura 7 - Detalhe da seção depois do Quick-stop da usinagem em baixa velocidade de corte, apresentando a aresta postiça de corte no aço 0,15% de carbono. Fonte: Adaptado de TRENT, 2000.

De acordo com Paris et al. (2020), a APC, apesar de ser instável e suscetível a quebras durante o processo de corte, exerce uma influência direta na formação dos cavacos. Em meio ao processo dinâmico de corte, a APC substitui a geometria real da aresta de corte da ferramenta, passando a atuar como a aresta de corte efetiva, o que altera as características de remoção de material devido à mudança no ângulo de saída efetivo e no raio da aresta de corte da ferramenta.

#### 2.4.1 Fases de formação da APC

A formação da APC ocorre em três fases, que são delimitadas pela velocidade de corte, conforme caracterizado por Fang et al. (2010) no processo de usinagem por torneamento do alumínio 2024-T351:

A primeira fase é o início da formação da APC na interface entre o cavaco e a ferramenta, geralmente ocorrendo em velocidades de corte entre 0,1 e 4 m/min. Devido à fratura do cavaco, a amplitude de vibração varia significativamente de maneira irregular com o aumento da velocidade de corte.

A segunda fase, chamada fase estável, é caracterizada pelo crescimento da APC até um determinado tamanho, assumindo várias formas e geometrias indefinidas. Essa fase ocorre em velocidades de corte entre 4 e 20 m/min. Com o aumento da velocidade de corte, a amplitude de vibração aumenta constantemente, conforme mostrado na Fig. 8.

A terceira fase é a fase instável, na qual a APC se quebra e desaparece, repetindo esse ciclo várias vezes em velocidades de corte entre 20 e 100 m/min. A amplitude de vibração mantém-se quase constante com o aumento da velocidade de corte, como pode ser observado na Fig. 8.

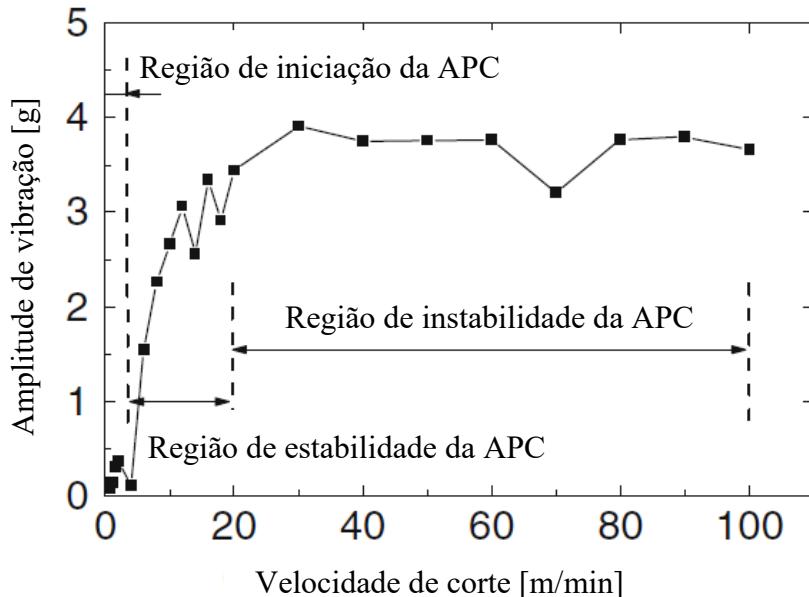


Figura 8 - Efeito da velocidade de corte na amplitude de vibração durante a usinagem do alumínio 2024-T351 com avanço de 0,15 mm/volta. Fonte: Adaptado de FANG et al., 2010.

As regiões de formação da APC estão relacionadas ao material da peça, à ferramenta de corte e aos parâmetros de corte aplicados na usinagem. No entanto, é possível obter características da formação da APC por meio da relação entre a velocidade de corte e o avanço de corte. A Fig. 9 fornece uma tabela de usinagem para ferramentas de corte em metal duro na usinagem de aço de corte livre de baixo carbono, na qual as linhas delimitam as faixas de velocidade e avanço em que ocorre a formação da APC (TRENT, 2000).

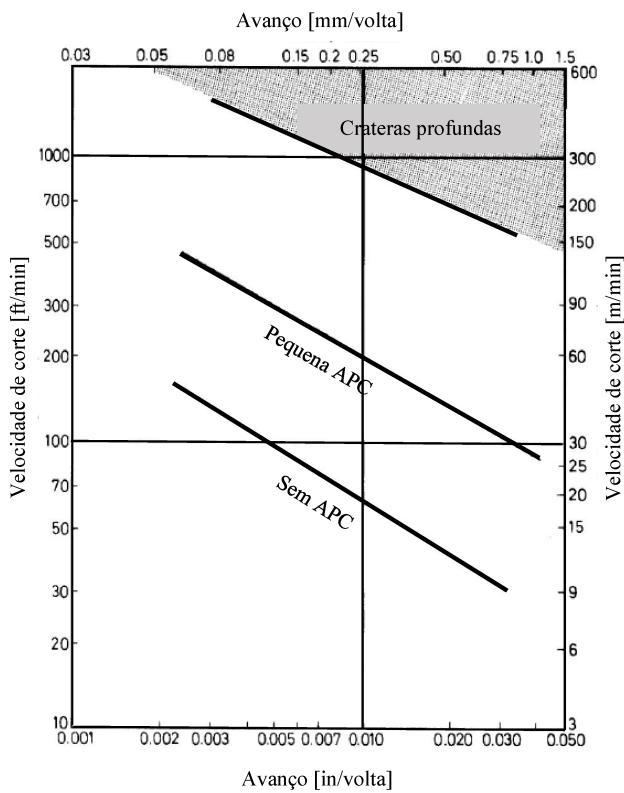


Figura 9 - Tabela de usinagem para a ferramenta de corte em metal duro na usinagem do aço de livre corte com baixo carbono. Fonte: Adaptado de TRENT, 2000

#### 2.4.2 Influência da APC no torneamento

Song e Takahashi (2020) analisaram o efeito protetor do material aderido na superfície de saída da ferramenta durante o torneamento a seco do aço inoxidável SUS 304. Para isso, o autor variou a velocidade de corte (5 - 140 m/min) e o avanço (0,02, 0,05 e 0,1 mm/volta), mantendo a profundidade de corte constante em 1 mm. Foram avaliados os resultados da formação da APC, camada de material aderido, desgaste de flanco da ferramenta e rugosidade superficial da peça. Os resultados mostraram que, a partir de uma velocidade de corte de 40 m/min ou superior, ocorreu a formação da camada de material aderido na ponta da ferramenta. À medida que a velocidade de corte aumentou, uma fina camada de material aderiu à superfície de desgaste do flanco da ferramenta. Após a formação da APC, o desgaste da ferramenta diminui tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga. Ainda segundo os autores, para uma previsão precisa do desgaste da ferramenta, é necessário considerar a influência da APC e da camada de material aderido no processo de torneamento. Em relação à rugosidade da superfície, os melhores resultados foram obtidos em velocidades de corte próximas a 40 m/min, em comparação com as demais velocidades estudadas.

Zhang et al. (2021) propuseram uma análise termodinâmica baseada em imagens de alta velocidade para identificar as partes da APC no cavaco, tanto experimentalmente quanto numericamente. Como parâmetro de corte, o autor utilizou várias velocidades de corte (60, 90, 120, 150, 180, 210 m/min) no torneamento do aço AISI 1045, utilizando insertos de metal duro sem revestimento. Durante o estudo, foram analisadas imagens da APC, da interface ferramenta-cavaco e da ferramenta de corte.

Os resultados mostraram que, à medida que a velocidade de corte aumenta, o tamanho da APC e o ângulo de saída efetivo diminuem. Além disso, a análise numérica permitiu prever que a temperatura de corte na velocidade de corte de 90 m/min é maior do que na velocidade de corte de 60 m/min, e isso foi atribuído ao efeito da APC na ponta da ferramenta, aumentando o ângulo de saída efetivo (ZHANG et al., 2021).

Na pesquisa de Paris et al (2020), foi investigada a influência da aresta postiça de corte na rugosidade superficial de peças de liga de titânio Ti-15Mo após o processo de torneamento cilíndrico externo. O comprimento da peça foi de 30 mm e foi utilizado líquido refrigerante. O inserto de carbeto de tungstênio (WC) sem revestimento, com um ângulo de saída de -7°, foi utilizado no estudo. A velocidade de corte foi variada em dois níveis (54 m/min e 104 m/min), enquanto o avanço (0,01 mm/volta) e a profundidade de corte (0,5 mm) foram mantidas constantes. Mesmo considerando que a APC é instável, assumiu-se que sua forma apresenta as mesmas características em cada passe. Os autores relatam que, mesmo com pequenas variações no ângulo de saída e com a formação da APC, os valores de rugosidade se mantiveram baixos quando houve aumento do ângulo de cisalhamento. A velocidade de corte mais alta apresentou o pior desempenho, com valores maiores de altura de pico (Spk) e profundidade de vale (SvK), de acordo com a curva de Abbot-Firestone. No entanto, os autores ressaltam que mais ensaios devem ser realizados para melhor compreensão dos efeitos de corte na qualidade superficial das peças.

Kümmel et al. (2015) realizaram uma investigação sobre o desgaste da ferramenta e a estabilidade da aresta postiça de corte utilizando uma ferramenta de metal duro sem revestimento com superfície de saída texturizada a laser em quatro condições diferentes: sem textura, com textura de covinhas, com canais perpendiculares à aresta de corte e com canais paralelos à aresta de corte. O estudo foi realizado no torneamento longitudinal de uma peça de aço SAE 1045 normalizado, com um comprimento de corte de 4030 m, e a velocidade de corte variou de 50 a 100 m/min.

A análise concentrou-se no desgaste de flanco da ferramenta, seguindo a norma ISO 3685 (1993). Além disso, a estabilidade da formação da APC foi verificada por meio de uma câmera de alta velocidade, posicionada a uma distância de 18 mm da interface de corte. Os resultados mostraram que a textura de covinhas apresentou menor intensidade de desgaste de flanco e uma formação mais estável da APC. Por outro lado, a textura com canais perpendiculares à aresta de corte resultou em uma maior largura de desgaste de flanco. Além disso, foi observado que a aplicação de texturas na forma de canais pode reduzir a adesão da APC (Kümmel et al., 2015).

Palmái e Csérvák (2013) analisaram a influência da aresta postiça de corte (APC) na formação do cavaco por meio de um modelo numérico, que contemplou tanto a formação de cavacos contínuos quanto a variação periódica do avanço. As simulações foram validadas experimentalmente por meio de ensaios de torneamento de aço de baixo carbono, cuja microestrutura continha elementos lubrificantes, utilizando ferramenta de aço rápido. Os parâmetros de corte empregados foram: velocidade de corte de 0,5 m/s, avanço de 0,3 mm/volta e velocidade do cavaco de 0,23 m/s. Para observar a APC na raiz do cavaco, os autores aplicaram o método de parada súbita do corte (Quick-stop), o que permitiu visualizar, por meio de imagens, a periodicidade e a morfologia da APC. As análises revelaram que, na presença da APC, o perfil do cavaco torna-se não periódico, indicando a ocorrência de perturbações dinâmicas significativas durante o processo de corte.

O modelo proposto reproduziu com precisão os efeitos da formação da APC, apresentando boa concordância com os resultados experimentais. Verificou-se que a frequência de excitação associada à APC é próxima de 92 Hz, acompanhada por harmônicos de alta frequência. A formação e o desprendimento periódico da APC provocam uma modulação na espessura de corte, resultando em oscilações caóticas no processo de torneamento. Além disso, as vibrações induzidas pela APC podem coincidir com as frequências naturais do sistema ferramenta-máquina, levando à deterioração da superfície usinada e à redução da vida útil da ferramenta. (PALMÁI; CSERNÁK, 2013).

Fang et al. (2010) conduziram uma investigação sobre o efeito da aresta postiça de corte (APC) na usinagem de alumínio 2024-T351 através do sinal de vibrações de corte. Os autores realizaram a usinagem utilizando o processo de corte ortogonal lateral em tubos com 34,5 mm de diâmetro em um centro de usinagem. Foram utilizados insertos do tipo TPGN 220408 e a

profundidade de corte foi igual à espessura do tubo de 2,25 mm. A velocidade de corte variou de 0,8 a 100 m/min e o avanço variou de 0,01 a 0,2 mm/volta.

Com base nas análises do sinal de vibrações de corte, os autores conseguiram identificar três fases distintas de formação da APC: iniciação da APC, fase estável e fase instável. Utilizando a amplitude de vibração e a curtose do sinal, eles foram capazes de distinguir a formação estável e instável da APC, as quais estavam associadas a diferentes padrões de vibração de corte. Os autores relatam que a análise no domínio do tempo não proporcionou conclusões claras, porém, na análise no domínio da frequência, foi possível detectar a frequência natural do porta-ferramentas, que foi de 4 kHz, assim como a frequência de iniciação da APC, que variou entre 1 a 1,5 kHz e 2,5 a 3 kHz. A fase estável da APC foi identificada entre 3,5 a 4 kHz. No entanto, para a fase instável, houve uma dispersão significativa nos espectros, e não foi possível obter uma conclusão clara sobre a periodicidade da formação e quebra da APC (FANG et al., 2010).

## **2.5 Monitoramento da usinagem no torneamento**

Laghari e Mekid (2023) conduzem uma análise abrangente sobre os métodos de monitoramento no torneamento e fresamento CNC, considerando diversas condições. Seu objetivo é pavimentar o caminho para o desenvolvimento futuro de uma plataforma automatizada voltada para o processamento de dados. Os autores exploram estratégias inerentes à Indústria 4.0, como sensores sem fio, Internet das Coisas (IoT) e armazenamento de dados em nuvem. Eles estabelecem correlações entre condições de usinagem, desgaste e vida útil da ferramenta, formação de cavacos, avanço e velocidade de corte, com os métodos de monitoramento de vibração, temperatura, força de corte, emissão acústica e consumo de energia no processo.

Existem dois grandes grupos de abordagem para o método de monitoramento da usinagem: o método direto e o indireto. No método direto, ocorre a medição da variável desejada, como por exemplo, o desgaste da ferramenta e a rugosidade da peça acabada. Embora preciso, este método exige a interrupção do processo de usinagem para a realização das medidas necessárias. Já o método indireto, embora menos preciso, é amplamente aplicado devido à sua não exigência de interrupção do processo para medição. Neste método, variáveis indiretas, como emissão acústica e vibração mecânica, impedância eletromecânica, são medidas e

correlacionadas com as variáveis que se deseja avaliar, como o desgaste da ferramenta e a qualidade superficial da peça (BRITO, 2018).

### **2.5.1 Vibrações mecânicas em máquinas ferramentas**

Em máquinas-ferramenta, é possível identificar três categorias de vibrações durante o processo de corte de materiais. Essas classificações incluem vibrações livres, forçadas e autoexcitadas. Esses fenômenos estão intrinsecamente ligados à dinâmica de um ou vários elementos que desempenham seu papel na usinagem, como o porta-ferramentas, a ferramenta de corte e o próprio material da peça (QUINTANA; CIURANA, 2011).

1. A vibração livre ocorre quando o equilíbrio do sistema mecânico é perturbado, como no caso de um impacto entre a ferramenta e a peça de trabalho. Esse tipo de vibração é amplamente compreendida e pode ser reduzida ou eliminada (SUN et al., 2018).
2. Vibrações forçadas surgem devido a excitações harmônicas externas causadas por fatores induzidos artificialmente, bem como pela incompatibilidade entre os conjuntos de máquinas-ferramenta. Seus efeitos no processo de corte podem ser mitigados ou mesmo explorados para aplicações de usinagem assistida por vibração, resultaram em uma melhor qualidade na usinagem (SUN et al., 2018).
3. Vibrações autoexcitadas são oscilações mantidas pela energia extraída do próprio processo de usinagem, crescendo progressivamente devido à interação dinâmica entre a ferramenta de corte e a peça durante o torneamento. Pequenas irregularidades na superfície da peça provocam variações na espessura de corte, que por sua vez realimentam a vibração da ferramenta, mantendo o sistema em oscilação. Esse tipo de vibração indesejada gera instabilidade no processo e é de difícil controle (QUINTANA; CIURANA, 2011).

### **2.5.2 Monitoramento do torneamento por vibrações mecânicas**

Diversos estudos foram realizados por diferentes pesquisadores com o propósito de monitorar o processo de torneamento por meio de sinais de vibração, abordando variados materiais e métodos de análise de sinais. Geralmente, a análise convencional é empregada como ponto de partida e referência, abrangendo tanto o domínio do tempo quanto o domínio da

frequência (AHMADI et al., 2019). A seguir, são apresentados alguns desses estudos que enfocam o monitoramento do torneamento através de sinais de vibração.

O estudo realizado por Aslan (2020) analisou o impacto do desgaste de flanco durante o torneamento do aço AISI 5140, utilizando medições das forças de corte e dos sinais de vibração para avaliar a condição da ferramenta. Os resultados foram submetidos a análises estatísticas baseadas na Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) e na ANOVA, revelando que as variáveis qualidade superficial (92,5%), força de corte (74,5%), vibração da ferramenta (81,3%) e desgaste de flanco (91,4%) apresentaram altos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), indicando forte confiabilidade dos modelos desenvolvidos (ASLAN, 2020).

Verificou-se que o principal fator que influencia o desgaste de flanco é a velocidade de corte, cujas variações afetam diretamente a formação do cavaco e intensificam as vibrações no sistema ferramenta-peça. Os melhores resultados experimentais foram obtidos com os parâmetros de corte de velocidade de 500 m/min, avanço de 0,06 mm/volta e profundidade de corte de 1,5 mm, condições que proporcionaram menor desgaste e menor nível de vibração (ASLAN, 2020).

Na pesquisa de Swain et al. (2019), foram investigados diversos parâmetros de corte em diferentes materiais, com o objetivo de identificar a abordagem mais eficaz para avaliar a integridade superficial da peça por meio do sinal de vibrações. No contexto deste estudo, os pesquisadores utilizam o aço ABNT 52100 no processo de torneamento externo, empregando a técnica de MQL (*Minimum Quantity Lubrication*), e aplicaram ferramentas de metal duro revestidas com TiN (nitreto de titânio) e TiCN (carbonitreto de titânio). A análise compreendeu o desgaste da ferramenta, a rugosidade superficial, a temperatura de corte e suas interações com o sinal de vibrações.

Os resultados da pesquisa provam que a adoção da técnica MQL conduz a uma redução na temperatura de corte, o que contribui para aprimorar a qualidade da superfície usinada e a precisão dimensional das peças produzidas. Contudo, os autores observaram que o aumento na velocidade de corte resultou em um incremento na amplitude das vibrações. Em contrapartida, ao elevar a profundidade de corte, constatou-se uma diminuição na amplitude das vibrações. Esses resultados enfatizam a significância de levar em consideração os impactos dos parâmetros de corte, tais como a velocidade e a profundidade de corte, na geração de vibrações durante o procedimento de usinagem. Estas conclusões são pertinentes para o gerenciamento do processo e para alcançar peças de maior qualidade superficial e dimensional (SWAIN et al., 2019).

Na revisão realizada por Katiyar et al. (2022) sobre sinais de vibrações no processo de torneamento, foram considerados modelos de detecção direta e indireta das vibrações. No modelo de detecção direta, foram abordados os efeitos da vibração da ferramenta, a intensidade e amplitude das vibrações, o uso de sensores de proximidade. Já no modelo de detecção indireta, discutiram-se fatores relacionados à força de corte, vibração, emissão acústica, corrente e potência do motor, além da rigidez do sistema ferramenta-peça-máquina. Os autores ainda constataram que a vibração da ferramenta tem um impacto negativo no acabamento superficial da peça e na vida útil da ferramenta. Além disso, foi observado que os efeitos do diagrama de lóbulos de estabilidade são inadequados para esse tipo de análise. Em contrapartida, as técnicas de monitoramento do torneamento pelo método indireto mostraram-se apropriadas, especialmente aquelas em que o sensor não tem contato direto com a peça.

A relevância de compreender e monitorar as vibrações durante o processo de torneamento se torna clara quando se busca otimizar o acabamento da superfície da peça, prolongar a vida útil da ferramenta e aprimorar a eficiência global do procedimento. A adoção de técnicas de detecção indireta, que dispensam o contato direto com a peça, pode representar uma abordagem mais efetiva e confiável para o monitoramento das vibrações no contexto do torneamento (KATIYAR et al., 2022).

### **2.5.3 Sinais acústicos**

Os sons emitidos durante a operação de máquinas-ferramenta carregam informações importantes sobre o desempenho do processo e podem ser utilizados na identificação de vibrações, desgaste da ferramenta e falhas operacionais. Operadores experientes são capazes de interpretar esses sinais acústicos para reconhecer diferentes condições operacionais, como deslocamento da mesa, troca de ferramenta e variações no corte, antecipando anomalias. Durante a usinagem, a formação de cavacos pode gerar emissões acústicas de alta frequência, que são úteis para a detecção de eventos relacionados ao monitoramento da condição da máquina. Microfones são amplamente utilizados para essa finalidade por captarem sinais em faixas de frequência superiores às das vibrações mecânicas, facilitando a caracterização da dinâmica do processo (LAGHARI; MEKID, 2023).

De acordo com Ragai et al. (2022), durante a remoção de material por meio do corte na usinagem, a formação de cavacos pode gerar uma energia acústica de alta frequência, utilizada para monitorar a condição da ferramenta. Esse fenômeno libera rapidamente energia sonora,

gerando ondas elásticas transitórias. Essas ondas podem ser percebidas durante a formação do cavaco, no contato friccional entre o cavaco e a ferramenta, e no atrito entre a superfície de saída da ferramenta e a zona de deformação do material.

Embora apresentem algumas limitações, como sensibilidade à direção, menor resposta em baixas frequências e influência do ruído ambiente, estudos demonstram que a sensibilidade dos microfones é comparável à de sensores como acelerômetros. Quando utilizados com controle adequado do ruído externo, os microfones se mostram uma solução eficaz e economicamente viável para a detecção de vibrações durante a usinagem. Esse método indireto de monitoramento tem sido amplamente aplicado e correlacionado com variáveis do processo de corte no torneamento. No entanto, ainda enfrenta um desafio importante, a identificação precisa das fontes acústicas envolvidas no processo de corte, devido à complexa interação entre a resposta acústica e processos de usinagem (FILIPPOV et al., 2017).

#### **2.5.4 Monitoramento do torneamento por sinais acústicos**

Ragai et al. (2022) realizaram ensaios de torneamento cilíndrico externo em aço AISI 1018, com um diâmetro inicial de 50,4 mm e comprimento de 250 mm. Eles utilizaram insertos de corte do tipo CNMG432 revestidos com TiN, com velocidades de corte de 188, 251 e 314 m/min, avanços de 0,254, 0,381 e 0,508 mm/volta e profundidade de corte constante de 0,635 mm. Os ensaios foram monitorados por meio de sinais de vibrações mecânicas, sinal acústico (microfone econômico PmodMIC3 - Knowles Acoustics SPA2410LR5H-B MEMs - 12 bits) e consumo de energia do motor. Em suas análises preliminares, aplicaram a Transformada de Fourier para capturar a natureza aleatória dos sinais e calcular a densidade espectral (PSD). Além disso, empregaram Redes Neurais Convolucionais (CNNs) na análise do nível de pressão sonora.

Os resultados mostraram que os sinais de vibração não apresentaram conclusões definitivas nas análises convencionais, tanto no domínio do tempo quanto no espectro de frequência, mesmo com a variação dos parâmetros de corte. Por outro lado, na análise da densidade espectral de potência (PSD), observou-se que o pico principal em torno de 270 Hz deslocou-se para a esquerda à medida que a velocidade de corte aumentava, indicando sensibilidade do sinal de vibração às mudanças de velocidade. Também foi constatado que a energia consumida aumentava proporcionalmente à velocidade de corte e ao avanço, embora o avanço exercesse maior influência sobre a curva PSD. Contudo, o sinal acústico não pôde ser

correlacionado diretamente com o corte, devido à baixa taxa de amostragem de 10 kHz, que limitou a resolução espectral e impediu a detecção de picos característicos do processo. Tanto o avanço quanto a velocidade de corte tiveram efeito combinado na redução da curva PSD, embora não tenha sido possível concluir de forma definitiva o impacto individual de cada parâmetro no sinal acústico (RAGAI et al., 2022).

Carou et al. (2017) investigaram a aplicação do monitoramento acústico como ferramenta de controle da qualidade superficial no torneamento intermitente de corpos de prova confeccionados em liga de magnésio UNS M11917, com diâmetro de 45 mm e rasgos de chaveta de 15 mm e 30 mm simulando descontinuidades. Foram utilizados insertos TPGN 16 03 04 H13A em condições de corte a seco, com profundidade de corte constante de 0,25 mm, velocidades de corte de 100 e 200 m/min e avanços variando entre 0,05 e 0,20 mm/volta. A aquisição dos sinais acústicos foi realizada por meio de um microfone com impedância de 1 kΩ, sensibilidade de 62 dB e faixa de resposta de 1 kHz a 20 kHz, posicionado próximo à região de corte. Os sinais foram amostrados a 128 kHz com resolução de 16 bits.

Os resultados avaliados pela transformada de *Wavelet* indicaram que a amplitude pico a pico apresentou forte correlação com a rugosidade superficial, sendo o avanço a variável com maior influência sobre os valores obtidos. Os valores de rugosidade Ra variaram entre 0,32 µm e 1,14 µm, enquanto os de Rz oscilaram de 2,3 µm a 6,1 µm. A frequência média, por sua vez, mostrou-se pouco sensível às variações do processo, sendo a velocidade de corte a principal fonte de variação nesse parâmetro. Dessa forma, os autores concluíram que a amplitude pico a pico representa uma métrica mais apropriada para o monitoramento acústico da rugosidade durante o torneamento, possibilitando a detecção de alterações no processo de forma precisa e com baixo custo (CAROU et al., 2017).

## 2.6 Análise no domínio da frequência

Conforme previamente mencionado, autores como Fang et al. (2010), Palmái (2013), Filippov et al. (2017), Katiyar et al. (2022), Ragai et al. (2022) e outros, empregam a análise de dados nos domínios do tempo e da frequência como método de investigação em uma ampla variedade de tipos de sinais. No domínio do tempo, os sinais fornecem uma representação do sinal bruto ao longo do tempo, e, em muitos casos, não é imediatamente evidente uma clara correlação entre parâmetros. Entretanto, a análise no domínio da frequência tem o potencial de

oferecer informações valiosas no monitoramento do corte durante processos de usinagem, mas requer a conversão do sinal original.

A Transformada de Fourier, em sua forma clássica, permite decompor um sinal arbitrário em uma soma de funções senoidais (senos e cossenos) de diferentes frequências, amplitudes e fases. O resultado é uma representação equivalente do sinal no domínio da frequência, na qual cada componente revela a contribuição relativa de uma determinada frequência no sinal original. A Eq. (4) ilustra como a conversão por meio da Transformada de Fourier é executada, expressa como um somatório de funções harmônicas (RAO, 2008).

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (4)$$

Onde a frequência fundamental é  $\omega = 2\pi/T$ . E os coeficientes  $a_0$  e  $a_n$  são obtidos com as Eq. (5) e Eq. (6):

$$a_0 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x_i \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \quad (6)$$

Quando se deseja aplicar a Transformada de Fourier a uma função real no domínio do tempo, utiliza-se a Eq. (7). Nessa equação,  $x(t)$  representa o sinal que se pretende analisar no domínio do tempo, enquanto  $X(\omega)$  é uma função complexa da frequência. O resultado dessa transformada é composto por duas partes: uma parte real, que corresponde à amplitude das frequências, e outra parte imaginária, que representa as mudanças de fase.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

A versão discreta dessa transformação, denominada Transformada Discreta de Fourier (DFT), é aplicável a sinais digitais finitos e constitui a base para os algoritmos computacionais. A DFT transforma um sinal com  $N$  pontos no domínio do tempo em duas saídas no domínio da frequência: uma parte real e uma parte imaginária, que podem ser combinadas para obter a magnitude e a fase de cada componente espectral (SMITH, 1999).

Entretanto, a DFT apresenta elevada complexidade computacional, o que limita sua aplicação em sinais extensos ou em sistemas que requerem resposta em tempo real. Para superar essa limitação, foi desenvolvido o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), que calcula a DFT de forma muito mais eficiente, com complexidade, reduzindo drasticamente o tempo de processamento necessário. Essa melhoria torna a FFT particularmente adequada para

aplicações industriais, científicas e de engenharia que envolvem grandes volumes de dados amostrados (Martins et al., 2017).

Do ponto de vista conceitual, a FFT opera sobre sinais discretos e periódicos, pressupondo que o bloco de dados de entrada representa uma repetição contínua do mesmo sinal. Como consequência, descontinuidades entre blocos podem introduzir distorções espectrais. Para mitigar esse efeito, são utilizadas janelas de suavização, como as de Hanning ou Hann, que reduzem as descontinuidades nas extremidades do sinal. Além disso, emprega-se frequentemente o zero-*padding*, técnica que consiste em adicionar amostras nulas ao sinal com o objetivo de aumentar a resolução espectral e melhorar a interpolação entre os pontos da DFT (SMITH, 1999).

### 2.6.1 Tipos de sinais

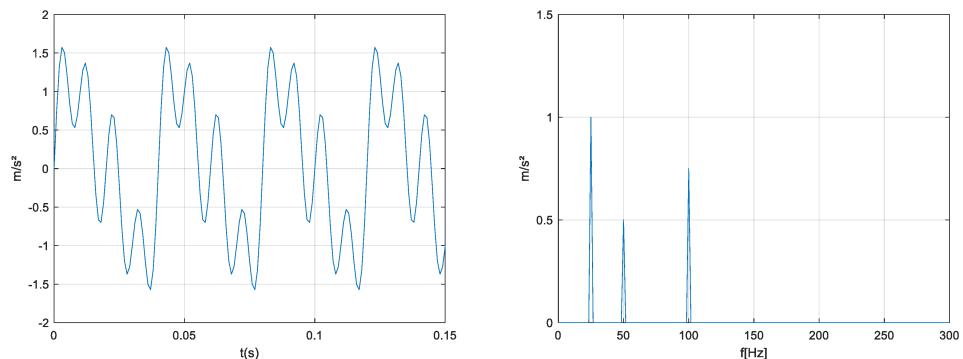
Inicialmente, os sinais podem ser divididos em dois tipos: sinais estacionários e sinais não estacionários. Os sinais estacionários têm um comportamento constante ao longo do tempo, exibindo repetitividade reconhecível e mantendo os componentes de frequência ao longo de sua evolução temporal. Os sinais estacionários podem ser categorizados em dois subtipos: determinísticos e aleatórios. Sinais determinísticos possuem características que os tornam previsíveis, apresentam regularidade e podem ser precisamente descritos por meio de equações matemáticas. Por outro lado, sinais aleatórios não seguem um padrão específico, mas mantêm uma continuidade com características distintivas, sendo representados por medidas estatísticas como média e variância (RAO, 2008).

Sinais não estacionários, por sua vez, têm um comportamento que se altera ao longo do tempo e incluem componentes de frequência diversos. Entre os sinais não estacionários, destacam-se os sinais contínuos e os transientes. Sinais contínuos apresentam variações em sua amplitude ao longo do tempo, de maneira que não existem amostras idênticas. Isso contribui para a redução de interferências e ruídos presentes no sinal, sendo um exemplo o sinal de ruído branco. Por outro lado, os sinais transientes exibem um comportamento específico em um único momento, sua ocorrência é imprevisível e não possuem características periódicas. Um exemplo disso seria o impacto de um martelo em um objeto rígido (SANTOS, 2021). Essas categorias de sinais podem ser visualizadas de maneira esquemática na Fig. 10.

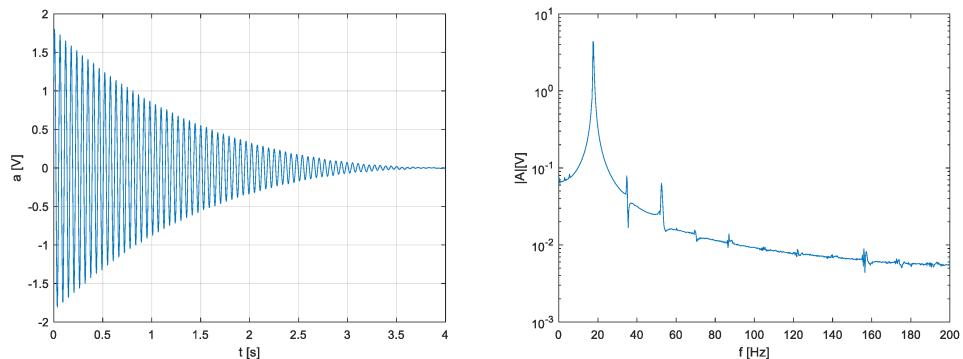


Figura 10 - Esquema dos tipos de sinais com classificações e exemplos. Fonte: Adaptado de SANTOS, 2021.

Na Figura 11 são ilustrados exemplos de respostas de sinais nos domínios do tempo (à esquerda) e da frequência (à direita). Na Fig. 11(a), é ilustrada a resposta de um sinal harmônico, que é um somatório de três funções senoidais com frequências de 25 Hz, 50 Hz e 100 Hz. A Fig. 11(b) retrata a resposta do sinal de um sistema amortecido com um grau de liberdade, que teve um deslocamento como condição inicial. Já na Fig. 11(c), é exibido um trecho do sinal proveniente de um torno CNC em funcionamento.



(a) Sinal estacionário, determinístico e harmônico



(b) Sinal não estacionário e transiente

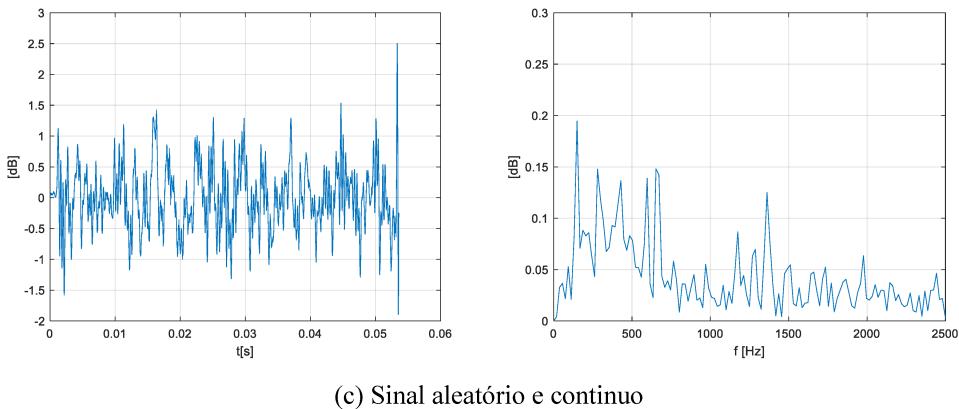


Figura 11 - Exemplos de análises no domínio do tempo e frequência.

## 2.7 Análise por transformada de *Wavelet* (WT)

As *Wavelets* são funções base que representam outras funções em intervalos específicos, semelhante a funções trigonométricas, de *Haar*, *Walsh*, entre outras. A análise de Fourier realiza um tipo semelhante de representação em sinais estacionários, convertendo o domínio do tempo para o espectro da frequência, perdendo a informação temporal. No entanto, em sinais não estacionários, nos quais é importante localizar eventos no tempo, a transformada de *Wavelets* é mais apropriada. Ela utiliza uma variedade de ondas de curta duração para representar o sinal inteiro, permitindo identificar quando um evento de frequência ocorreu (Machado, 2014).

Polikar (2006) faz referência ao princípio da incerteza formulado por Heisenberg e afirma que o momento e a posição de uma partícula em movimento não podem ser conhecidos simultaneamente. Na transformada de *Wavelets*, a incerteza de Heisenberg se traduz na ideia de que não é possível determinar com precisão qual componente de frequência existe em um instante específico de tempo. As transformadas de *Wavelets* têm boa localização no tempo para frequências altas, utilizando intervalos de amostragem menores e um maior número de iterações. Por outro lado, esse cenário é invertido para frequências mais baixas, que se destacam em intervalos maiores com menos iterações. Essas relações entre frequências e intervalos podem ser visualizadas na Fig. 12, que compara as janelas de análise entre a transformada de Fourier e a transformada de *Wavelets*.

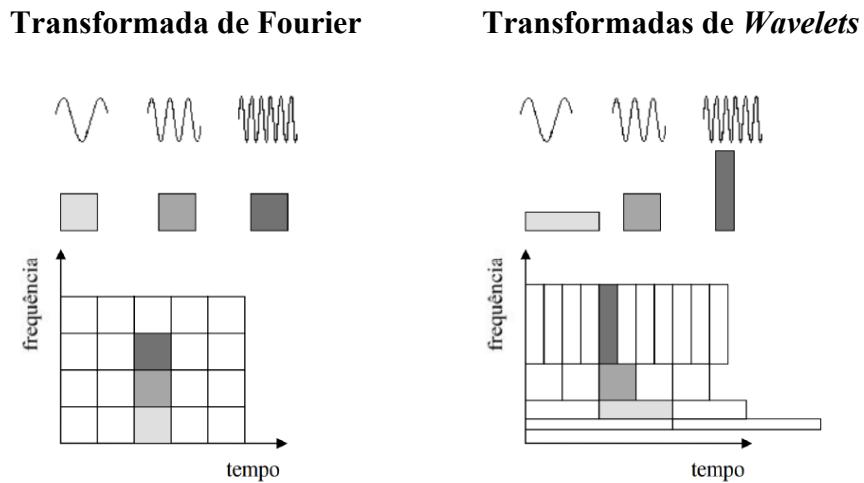


Figura 12 - Bandas de análise das transformadas de Fourier e *Wavelets*. Fonte: Adaptado de Machado, 2014

De acordo com Silva (2017), as transformadas de *Wavelets* operam em conjuntos de dados com um total de  $2^n$  elementos de amostragem, onde  $n$  é um valor inteiro positivo. Essa abordagem se baseia na transformada de Fourier, no entanto, todos os coeficientes produzidos pelas *Wavelets* são reais, ao contrário das transformadas de Fourier. Existem dois tipos principais de transformadas de *Wavelets*: contínuas e discretas. A principal distinção entre elas é que as *Wavelets* contínuas utilizam um número infinito de escalas e localizações, enquanto as *Wavelets* discretas empregam um conjunto finito de janelas definido em escalas e localizações específicas.

### 2.7.1 Transformada contínua de *Wavelet* (CWT)

Na maioria dos casos, os sinais de medição são discretos, ou seja, os dados são registrados em pontos discretos no tempo ou em intervalos de tempo específicos. A Transformada Contínua de *Wavelets* (CWT) leva em consideração essa natureza discreta dos sinais de medição. O termo "contínua" refere-se ao fato de que o conjunto de dados pode ser fornecido em seu tamanho original para a transformação ou pode ser representado em escalas de diversos tamanhos. A capacidade de decompor o sinal em várias escalas é definida pela Eq. (8) (POLIKAR, 2006).

$$X_w(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{(a,b)}(t) dt \quad (8)$$

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ com } a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (9)$$

Onde  $x(t)$  são o sinal de entrada,  $\psi_{a,b}(t)$  é a função mãe, ‘a’ o parâmetro de escala e ‘b’ o parâmetro de deslocamento.

### 2.7.2 Transformada discreta de *Wavelet* (DWT)

A DWT considera o sinal de entrada e aplica um filtro para extrair os dados. Essa transformada pode ser compreendida como uma técnica que remove as componentes de baixa frequência e alta frequência do sinal bruto. Para isso, o sinal original 'S' é submetido a um processo de filtragem, resultando em coeficientes de aproximação representados pela letra 'A', que contém informações sobre as características de baixa frequência do sinal. Por outro lado, os coeficientes de alta frequência do sinal original são armazenados na letra 'D'. A Fig. 13 oferece uma ilustração de como a Transformada Discreta de *Wavelets* decompõe o sinal de entrada (MORAES, 1996).

Conforme mencionado por Polikar (2006), a decomposição dos coeficientes em filtros passa-baixa e passa-alta ocorre de maneira sequencial em cada nível, também conhecido como codificação sub-bandas. A Fig. 13 representa apenas o primeiro nível dessa decomposição. Esse processo de decomposição ocorre repetidamente até atingir o nível definido ou até que a resolução seja insuficiente para prosseguir com a decomposição. A Eq. (10) descreve a Transformada Discreta de *Wavelets* (DWT).

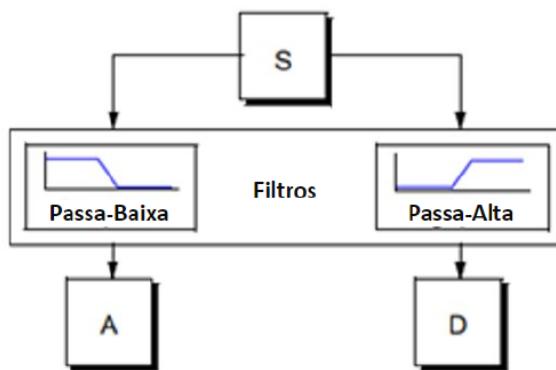


Figura 13 - Transformada Discreta de *Wavelet*. Fonte: Misiti *apud* Alves, 2022

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{ab}(t) f(t) dt \quad (10)$$

A operação de convolução em tempo discreto é definida pela Eq. (11).

$$x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] h[n - k] \quad (11)$$

Onde  $x[n]$  é o sinal original,  $n$  e  $k$  são números inteiros e  $h[n]$  um filtro passa-baixa.

O filtro passa-baixa de meia banda é projetado para eliminar todas as frequências acima da metade da frequência mais alta presente no sinal. Em seguida, metade das amostras é removida de acordo com o critério de *Nyquist*. Ao simplesmente descartar metade das amostras, o sinal é subamostrado por um fator de dois. Isso resulta em uma redução de tamanho do sinal para metade, mas ao mesmo tempo, a escala do sinal é duplicada. Ele ressalta que filtragem passa-baixa remove as informações de alta frequência, mas mantém a escala inalterada, sendo a subamostragem a única responsável pela alteração da escala. A resolução, que está relacionada à quantidade de detalhes no sinal, é afetada apenas pelas operações de filtragem. Em termos claros, a filtragem passa-baixa reduz a resolução pela metade, mantendo a escala inalterada, e então o sinal é subamostrado por um fator de dois. Esse processo pode ser descrito matematicamente pela Eq. (12) (POLIKAR, 2006).

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] x[2n - k] \quad (12)$$

A Transformada Discreta de *Wavelets* (DWT) utiliza dois conjuntos de funções, conhecidos como funções de escala e funções *Wavelet*. Esses conjuntos estão relacionados aos filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente. Essa combinação de funções constitui um nível de decomposição e pode ser representada pelas Eq. (13) e Eq. (14), onde  $y_{high}$  representa a função *Wavelet* e  $y_{low}$  representa a função de escala (POLIKAR, 2006).

$$y_{high}[k] = \sum_{n=0}^{n-1} x[n] g[2k - n] \quad (13)$$

$$y_{low}[k] = \sum_{n=0}^{n-1} x[n] h[2k - n] \quad (14)$$

A cada nível de decomposição, a resolução no domínio do tempo é reduzida pela metade, enquanto a resolução em frequência é duplicada. O processo de decomposição envolve filtrar a saída do filtro passa-baixa com filtros passa-baixa e passa-alta, repetindo esse processo até que restem apenas duas amostras. Os coeficientes da transformada discreta de *Wavelets* em cada nível são obtidos a partir da saída do filtro passa-alta ( $g[n]$ ). Esses coeficientes são concatenados com o sinal original, resultando em um número de coeficientes igual ao do sinal original (MORAES, 1996).

A reconstrução do sinal decomposto é viabilizada pelos filtros de meia banda, que estabelecem bases ortonormais entre si. O procedimento de reconstrução é realizado na ordem

inversa do processo de decomposição. Os sinais de cada nível são expandidos por um fator de dois e, em seguida, passam pelos filtros passa-baixa e passa-alta, sendo finalmente adicionados. Os filtros são idênticos entre si, exceto pela inversão temporal. O processo de reconstrução para cada nível é demonstrado pela Eq. (15) (POLIKAR, 2006).

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (y_{high}[k]g[-n+2k]) + (y_{low}[k]h[-n+2k]) \quad (15)$$

Se os filtros não forem de meia banda ideais, a reconstrução perfeita do sinal decomposto não poderá ser alcançada. A obtenção de uma reconstrução perfeita envolve certas condições e, em alguns casos, é possível encontrar filtros que permitam essa reconstrução precisa. Uma das famílias de *Wavelets* mais renomadas, que satisfaz essas condições, foi desenvolvida por *Ingrid Daubechies* (MACHADO, 2014).

### 2.7.3 Famílias de *Wavelet*

Há diversas famílias de *Wavelets*, cada uma com características matemáticas específicas que as tornam mais adequadas a determinadas aplicações de análise de sinais. A escolha da *Wavelet* ideal está relacionada a propriedades como ortogonalidade, biortogonalidade, regularidade, suporte compacto, simetria e localização conjunta nos domínios do tempo e da frequência, essencial para o estudo de sinais não estacionários (SANTOS, 2021). Entre as famílias mais utilizadas estão:

- Daubechies: ortogonais, com bom compromisso entre suporte compacto e regularidade, ideais para compressão e detecção de descontinuidades;
- Symlets: simétricas e quase-ortogonais, derivadas das Daubechies, mas com menor assimetria, utilizadas para minimizar artefatos em reconstruções;
- Coiflets: com momentos nulos tanto na *Wavelet* quanto na função de escala, indicadas para análise multirresolução com alta precisão;
- Mexican Hat: derivada da segunda derivada da função Gaussiana, contínua e simétrica, muito empregada na detecção de bordas e singularidades;
- Gaussianas: derivadas sucessivas da Gaussiana, úteis para análise de sinais com padrões suaves ou comportamento local;
- Morlet: composta por uma senóide modulada por uma função Gaussiana, apresenta elevada resolução no domínio da frequência e é amplamente utilizada em CWT para análise espectrotemporal, sendo eficaz na identificação de padrões de frequência em sinais não estacionários (ALVES, 2022).

As formas típicas dessas famílias *Wavelet* são ilustradas na Fig. 14, evidenciando a diversidade de formatos disponíveis para aplicações específicas em processamento de sinais.

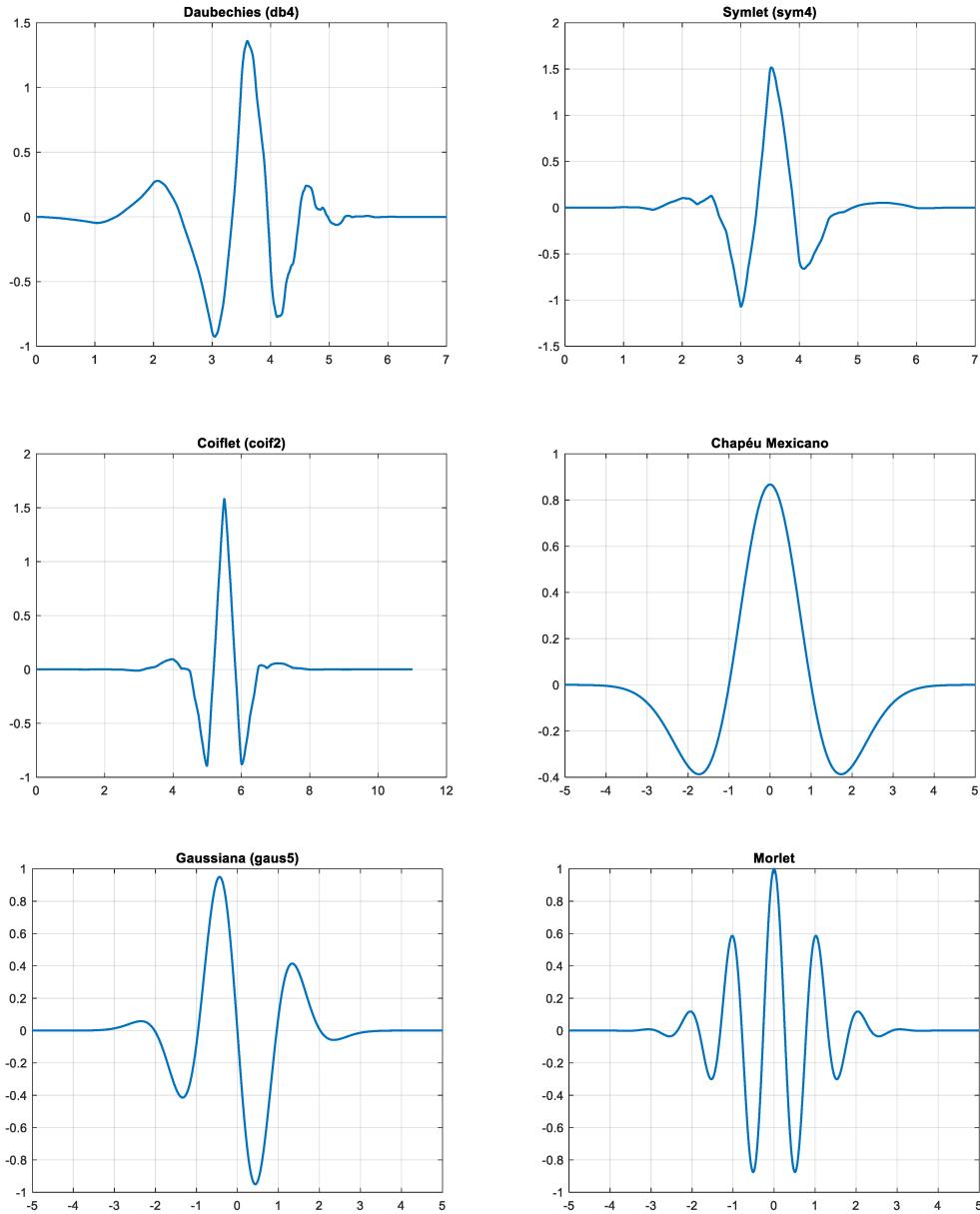


Figura 14 - Famílias *Wavelet*.

#### 2.7.4 Análises aplicando a transformada de *Wavelet*

O estudo realizado por Bonda et al. (2020) teve como objetivo analisar a estabilidade no processo de torneamento interno utilizando o sinal de vibrações. O trabalho foi dividido em

quatro etapas de análise: teoria da eliminação de ruído e classificação de *Wavelet*; transformação de *Hibert-Huang*; classificação do processo de corte; e classificação das vibrações experimentais. A usinagem foi realizada utilizando uma ferramenta de metal duro CCMT-09-T308-MUTN200 em peças pré-furadas de aço SAE 1020 com 50 mm de diâmetro externo, 40 mm de diâmetro interno e 100 mm de comprimento. A vibração foi medida utilizando um acelerômetro da marca *Brüel & Kjaer*, modelo 4332, com sensibilidade de 63,5 mV/g. Foram analisadas a amplitude das vibrações e a rugosidade superficial em três posições diferentes.

Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidades de corte de 101 m/min, 126 m/min e 51 m/min; avanços de 0,01 mm/volta, 0,02 mm/volta e 0,03 mm/volta; e profundidades de corte de 0,04 mm, 0,05 mm e 0,06 mm. A proposta de identificação e classificação da trepidação no torneamento interno, por meio do sinal de vibrações, teve sucesso ao utilizar a transformada de *Wavelet* e analisar os gráficos da resposta no domínio do tempo e da frequência. As oscilações de vibrações e suas frequências puderam ser facilmente identificadas, permitindo uma melhor compreensão da estabilidade do processo de torneamento interno. Essas informações são valiosas para otimizar as condições de corte e garantir a qualidade da usinagem (BONDA et al., 2020).

No estudo realizado por Plaza e López (2018) foi aplicado o método de pacotes de *Wavelet* no sinal de vibração mecânica para análise no domínio do tempo e no domínio da frequência, verificando sua relação com a rugosidade ( $R_a$ ). A pesquisa envolveu um processo de torneamento cilíndrico externo a seco em 120 corpos de prova de aço ABNT 1045, com 80 mm de diâmetro e 130 mm de comprimento. Foram utilizados insertos revestidos de carbonitretos de titânio Ti (C, N) com 0,4 mm de raio de ponta. As variáveis de corte incluíram a velocidade de corte (250, 275, 300 e 325 m/min), profundidade de corte (0,5, 0,8, 1,1 e 1,4 mm) e avanço (0,08, 0,11, 0,14, 0,17, 0,20 e 0,23 mm/volta). Cada ensaio foi repetido três vezes com uma ferramenta nova, garantindo maior precisão e reduzindo fontes de erro. Os sinais de vibrações foram obtidos em três direções ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) com um acelerômetro piezoelétrico triaxial posicionado atrás do inserto, com faixa de aceleração de  $\pm 500g$  e frequência máxima de 10 kHz.

Os resultados mostraram que um único sensor de baixo custo implementado na máquina-ferramenta é suficiente para analisar a integridade superficial da peça e correlacionar a rugosidade com o sinal de vibrações mecânicas. A componente  $a_y$  foi identificada como a

principal fonte de informação na análise da rugosidade superficial. No que diz respeito às faixas de frequências, os pacotes mais bem-sucedidos foram os das faixas de frequência (6250 - 9375 Hz) e (9375 - 12500 Hz). Isso ocorreu devido à excitação nessas frequências e seu efeito mais significativo na rugosidade da superfície. Por fim, os autores confirmaram a robustez do método de pacotes de *Wavelet* para o processamento dos sinais de vibrações e monitoramento da integridade das superfícies durante o processo de torneamento (PLAZA; LÓPEZ, 2018).

## 2.8 Análise por componentes principais (PCA)

A Análise por Componentes Principais (PCA), também conhecida como Transformação de *Karhunen-Loève* (KLT), constitui uma técnica multivariada voltada à avaliação de conjuntos de dados compostos por múltiplas variáveis quantitativas, dependentes e inter-relacionadas. Seu objetivo principal é representar a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório, composto por  $p$  variáveis, por meio de combinações lineares denominadas componentes principais. Essas combinações buscam concentrar a máxima variabilidade dos dados em um número reduzido de variáveis não correlacionadas, facilitando a interpretação dos fenômenos estudados (SEGRETO et al., 2014).

Diversos autores descrevem as etapas de aplicação da PCA, com pequenas variações metodológicas entre si, como Hongyu et al. (2016), Segreto et al. (2014) e Papadrea et al. (2020). De forma geral, o procedimento parte de uma matriz de dados, Eq. (16), de dimensões  $n \times p$ , em que  $n$  representa o número de amostras e  $p$ , o número de variáveis. A seguir, apresentam-se as principais etapas do processo:

$$M = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{np} \end{vmatrix}_{(n \times p)} \quad (16)$$

Etapas:

1. Calcular a média ( $\bar{x}_p$ ) e desvio padrão ( $\sigma_p$ ), e variância ( $v_p$ ) das  $p$ -variáveis, sendo elas Eq. (17), Eq. (18) e Eq. (19), respectivamente;

$$\bar{x}_p = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ip}}{n} \quad (17)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{ip} - \bar{x}_p)^2}{n}} \quad (18)$$

$$v_p = \sigma_p^2 \quad (19)$$

2. Padronizar as p-variáveis por sua respectiva média;

$$M = \begin{vmatrix} (a_{11} - \bar{x}_1) & (a_{12} - \bar{x}_2) & \dots & (a_{1p} - \bar{x}_p) \\ (a_{21} - \bar{x}_1) & (a_{22} - \bar{x}_2) & \dots & (a_{2p} - \bar{x}_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{n1} - \bar{x}_p) & (a_{n2} - \bar{x}_p) & \dots & (a_{np} - \bar{x}_p) \end{vmatrix}_{(n \times p)} \quad (20)$$

3. Calcular a matriz de covariância da matriz de amostragem com as p-variáveis padronizadas. A matriz de covariância é obtida calculando-se a média do produto de cada subtração pela variável correspondente, resultando em uma matriz de dimensão (p x p). Isso é ilustrado na Eq. (21), que apresenta a fórmula da covariância para uma matriz de amostragem com duas dimensões (X e Y), exemplificando o cálculo do elemento ( $a_{12}$ ).

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i) * (Y_i)]}{(n-1)} \quad (21)$$

A matriz de covariância ( $M_{cov}$ ) é obtida da forma como a Eq. (22), seguindo o exemplo de duas dimensões:

$$M_{cov} = \begin{vmatrix} cov(X, X) & cov(X, Y) \\ cov(Y, X) & cov(Y, Y) \end{vmatrix}_{(2 \times 2)} \quad (22)$$

4. Calcular os autovalores e autovetores da matriz de covariância ( $M_{cov}$ );  
 5. O rearranjo dos valores das componentes principais é realizado sob a premissa de que os autovalores ( $\lambda_p$ ) são ordenados em ordem decrescente, ou seja, ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{final}$ ). Consequentemente, os autovetores associados a esses autovalores também são reorganizados conforme essa ordem, formando a sequência ( $v_1, v_2, \dots, v_{final}$ ). Dessa forma, a primeira componente principal (PC1), responsável por capturar a maior variância do conjunto de dados, está associada ao maior autovalor ( $\lambda_1$ ) e ao autovetor correspondente ( $v_1$ ), a segunda componente principal (PC2) está associada ao segundo maior autovalor ( $\lambda_2$ ) e ao autovetor  $v_2$ , e assim sucessivamente.

A curva *scree* (Fig. 15) representa os autovalores em função de seus respectivos índices, sendo amplamente utilizada para identificar a transição entre os autovalores de maior e menor magnitude. Em geral, os primeiros autovalores apresentam uma queda acentuada, até que ocorre uma inflexão, conhecida como "ponto de quebra", a partir da qual os valores subsequentes tendem à estabilidade, formando uma linha aproximadamente reta. Essa estabilização indica que os autovalores após o ponto de inflexão contribuem marginalmente para a variância explicada pelas componentes principais. Assim, apenas as componentes associadas aos

autovalores anteriores à quebra são normalmente selecionadas para análise (CAGGIANO et al., 2018), como ilustrado na Fig. 15, onde se observa nitidamente o declive seguido da estabilização da curva.

Entretanto, quando os autovalores iniciais apresentam magnitudes muito distintas entre si, a identificação visual do ponto de inflexão pode ser comprometida. Nesses casos, recomenda-se a utilização de uma escala logarítmica no eixo vertical, o que permite uma visualização mais clara da transição. Esse gráfico modificado é conhecido como *log-scree plot* ou gráfico log-autovalor (HONGYU et al., 2016).

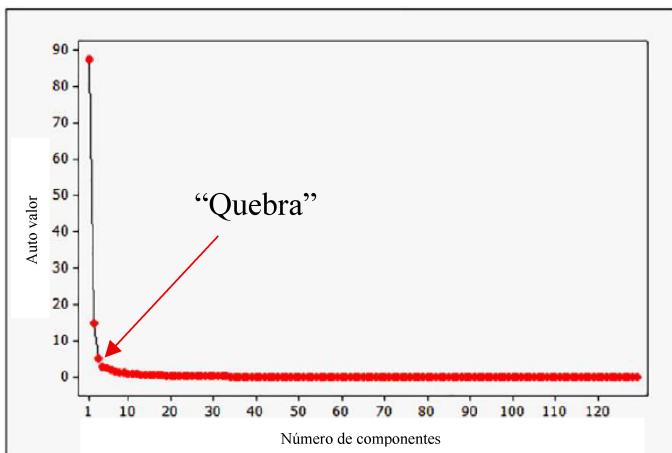


Figura 15 - Gráfico scree para análise por componentes principais. Fonte: Papandrea, et al. (2020).

### 2.8.1 Análise de componentes principais aplicados em processos de usinagem

Papandrea et al. (2020) investigaram uma metodologia para o monitoramento da rugosidade superficial no torneamento de aço AISI 52100 endurecido, utilizando insertos cerâmicos mistos do tipo *Wiper*, revestidos com nitreto de titânio (TiN), em um torno CNC. O sinal acústico foi registrado por meio de um microfone conectado a um notebook via o software *Audacity*, e a rugosidade foi medida com um rugosímetro portátil. Após a segmentação dos sinais em janelas sobrepostas, aplicou-se a FFT para extrair a energia espectral de cada janela ( $N = 256$ , resolução  $\approx 172$  Hz). As médias espectrais dos ensaios foram então processadas por meio da PCA, com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões relevantes no comportamento do processo.

A PCA permitiu revelar correlações significativas entre os scores das componentes principais e variáveis de usinagem. A componente principal PC1 apresentou forte correlação com todos os parâmetros de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_t$ ), enquanto a PC3 mostrou alta correlação com a velocidade de corte ( $v_c$ ). A combinação dos scores possibilitou a inferência indireta dos principais parâmetros operacionais, como avanço e profundidade de corte. O modelo resultante obteve 100% de acurácia na classificação multiclasse da rugosidade superficial, demonstrando o potencial da PCA como ferramenta eficaz na fusão e compressão de dados acústicos, e sua aplicabilidade no monitoramento indireto em processos de torneamento (PAPANDREA et al., 2020).

No estudo desenvolvido por Caggiano et al. (2018), foi proposta uma abordagem para o diagnóstico do desgaste de ferramentas em processos de furação de laminados compósitos por meio da análise de sinais multissensoriais combinada à redução de dimensionalidade via PCA. Para isso, foram adquiridos sinais de força de avanço, torque, emissão acústica e vibração em uma furadeira CNC. Os sinais foram segmentados com base na força de avanço filtrada e, em seguida, foram extraídas 20 características estatísticas no domínio do tempo (média, variância, assimetria, curtose e energia) para cada furo realizado. A redução da dimensionalidade foi conduzida em duas etapas: inicialmente, aplicou-se uma seleção supervisionada baseada no coeficiente de correlação de Spearman com os valores de desgaste de flanco, reduzindo o conjunto para 8 variáveis relevantes. Posteriormente, foi empregada a PCA para realizar a extração não supervisionada de atributos.

A PCA, implementada por decomposição de valores singulares, permitiu projetar os dados em um novo espaço bidimensional (PC1 e PC2), maximizando a variância explicada. A análise do gráfico *scree* confirmou que essas duas componentes principais representavam de forma satisfatória a variabilidade dos dados originais. Os scores extraídos foram utilizados como entradas em redes neurais artificiais para o diagnóstico do desgaste de flanco. A forte correlação entre PC1 e a progressão do desgaste possibilitou a predição precisa dos valores de desgaste de flanco, com erros quadráticos médios (RMSE) inferiores a  $2,17 \times 10^{-3}$ . Os resultados demonstraram que a PCA foi altamente eficaz na fusão dos dados sensoriais e na redução significativa da dimensionalidade, contribuindo para um sistema de monitoramento eficiente (CAGGIANO et al., 2018).

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA

Neste capítulo, são descritos os procedimentos experimentais e a metodologia empregada no desenvolvimento deste trabalho. A identificação da presença da APC foi realizada por meio da análise dos cavacos, relacionando seu comprimento e posição aos sinais de vibração e pressão sonora (PS). Para a análise dos sinais de vibrações e PS, foi adotada uma metodologia que contempla técnicas convencionais, PCA e transformada de contínua de *Wavelet* (CWT). Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Usinagem e o Laboratório de Acústica, Vibrações e Sistemas Inteligentes (LAViSI), ambos da Universidade Federal de Ouro Preto, em parceria com os Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia.

Com o objetivo de aplicar as técnicas de análise de sinais e verificar a correlação com a formação da APC, o trabalho foi desenvolvido em etapas experimentais sequenciais, listadas a seguir e detalhadas ao longo deste capítulo:

1. Elaboração do corpo de prova com geometria definida para controle da formação dos cavacos.
2. Definição da geometria da ferramenta de corte e dos parâmetros de usinagem.
3. Montagem do experimento, incluindo o sistema de sensoriamento e o sistema de aquisição de dados.
4. Realização do teste de impacto no conjunto ferramenta-suporte para identificação das frequências naturais do sistema.
5. Execução dos ensaios de 1 a 23, variando a velocidade de corte e o avanço.

6. Aquisição dos sinais de aceleração nos eixos Y e Z e do sinal de pressão sonora (PS) durante os ensaios.
7. Análise macroscópica da superfície inferior e da extremidade final dos cavacos.
8. Realização de ensaio adicional de torneamento cilíndrico externo para verificar o comportamento do aço ABNT 1050 e identificar a velocidade de corte na qual a APC deixa de se formar, avaliando simultaneamente a força de corte.
9. Preparação metalográfica dos cavacos em seção longitudinal para análise microestrutural.
10. Análise micrográfica da primeira seção longitudinal, com contagem dos fragmentos de APC, mensuração dos comprimentos e posicionamento ao longo da superfície inferior do cavaco.
11. Execução de ensaios de microdureza no fragmento da APC, no corpo do cavaco e no material em estado de fornecimento.
12. Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) aos sinais nos domínios do tempo e da frequência, combinando variáveis de um mesmo ensaio, de ensaios distintos e de diferentes eixos (Y, Z e PS).
13. Aplicação da análise convencional de sinais nos domínios do tempo e da frequência, considerando o posicionamento das APCs observadas nos cavacos.
14. Execução dos ensaios de 24 a 31, variando apenas a velocidade de corte e mantendo o avanço constante em 0,2 mm/volta.
15. Repetição das etapas 6 e 7 nos novos ensaios, com o objetivo de analisar três seções longitudinais do cavaco.
16. Preparação da primeira seção dos cavacos para análise microestrutural detalhada.
17. Análise micrográfica da primeira seção longitudinal, com contagem e mensuração dos fragmentos de APC.
18. Repetição das etapas 16 e 17 para a segunda e terceira seções dos cavacos.
19. Aplicação da Transformada Contínua de Wavelet (CWT) aos sinais de vibração e pressão sonora, para análise no domínio tempo–frequência.

### 3.1 Corpo de prova

Para a realização deste trabalho, foi desenvolvido um corpo de prova em aço ABNT 1050 com o objetivo de gerar cavacos espirais ou em formato de vírgula, com comprimento adequado à análise da formação da APC e sua correlação com os sinais de vibração e pressão sonora. Visando otimizar o processo e garantir a obtenção de cavacos com essas características, adotou-se o método de corte ortogonal por mergulho.

Os primeiros ensaios foram realizados em corpos de prova confeccionados no formato de discos completos, conforme ilustrado na Fig. 16(a). No entanto, em vez da formação de um único cavaco, observou-se a geração de múltiplos cavacos, o que comprometeu a rastreabilidade do intervalo de corte nos sinais coletados, o que impossibilitou a análise precisa da presença da APC. Considerando essas limitações, foram propostas modificações na geometria dos corpos de prova para viabilizar o controle do comprimento dos cavacos e possibilitar sua correlação com os segmentos de corte e os sinais adquiridos. Para isso, foram desenvolvidos dois novos modelos de corpos de prova com interrupções no percurso de corte: o primeiro, representado na Fig. 16(b), com quatro segmentos interrompidos a cada  $90^\circ$ , e o segundo com três interrupções posicionadas em  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $180^\circ$ , conforme ilustrado na Fig. 16(c).

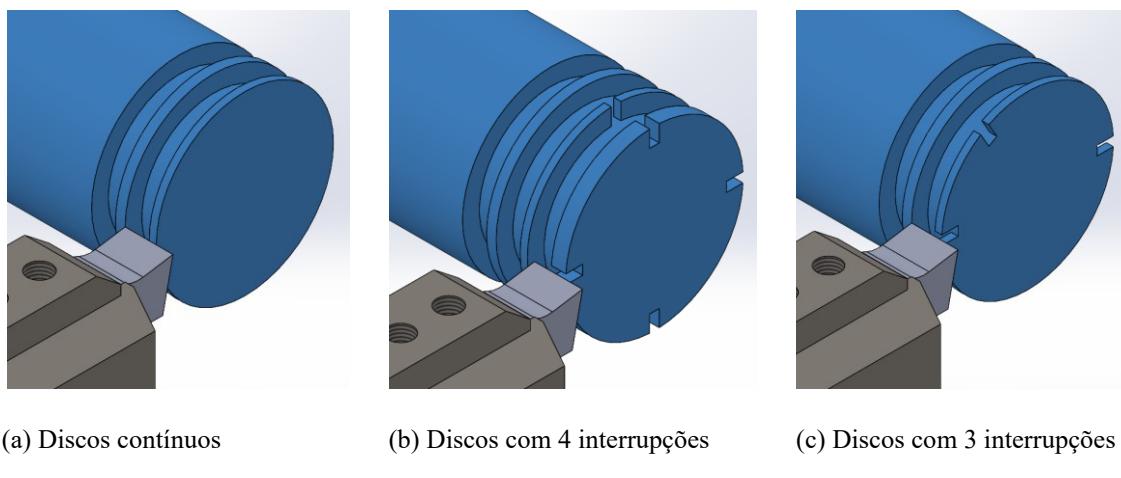


Figura 16 - Corte ortogonal de mergulho em discos

No modelo com interrupções a cada  $90^\circ$ , os cavacos apresentaram comprimentos semelhantes entre si, o que inviabilizou a associação com um intervalo específico no sinal. Já no modelo com interrupções em  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $180^\circ$ , embora algumas variações de comprimento tenham permitido certa correlação, cavacos com medidas idênticas também foram gerados,

reincidindo nos problemas de correlação do intervalo de corte nos sinais. Além disso, o impacto da entrada e saída da ferramenta durante o corte comprometeu significativamente a qualidade dos sinais de vibração adquiridos.

Diante desses desafios, foi produzido um novo corpo de prova com design otimizado, capaz de gerar apenas um cavaco por ensaio, com comprimento controlado e permitindo portanto, a correlação direta do intervalo de corte com os sinais. O projeto do corpo de prova, representado na Fig. 17, restringe o corte a um único quadrante do disco, indicado em azul na seção A-A, o que permite controlar tanto a quantidade quanto o comprimento dos cavacos. O formato semelhante a uma espiral define tanto a região de corte (em azul) quanto uma região suavizada no início do corte (em vermelho), o que contribui para a redução dos impactos mecânicos iniciais, preserva a integridade da ferramenta e melhora a qualidade dos sinais adquiridos.

Para garantir a estabilidade e a consistência dos resultados, os corpos de prova foram produzidos com quatro ressaltos, minimizando vibrações indesejadas decorrentes de possíveis desbalanceamentos dos discos. O diâmetro inicial da região de corte foi definido em 51 mm para larguras de corte de 1,5 mm e 2 mm, em corpos de prova diferentes.

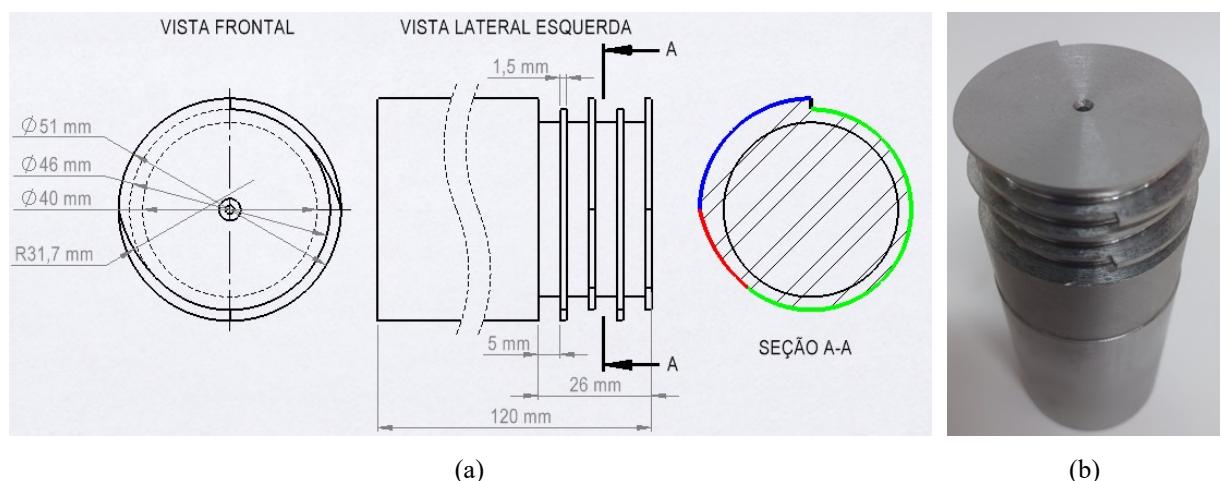


Figura 17 - Desenho do corpo de prova utilizado no estudo para identificação da APC, destacando o detalhe do design destinado à limitação do comprimento do cavaco (a); Corpo de prova confeccionado em aço ABNT 1050 (b).

### 3.2 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte utilizada neste estudo foi selecionada com o propósito de favorecer a formação e o desprendimento da APC. Trata-se de uma ferramenta de metal duro, classe P10, sem revestimento, com largura de 10 mm, ângulo de saída de  $4,7^\circ$ , ângulo de folga de  $5,3^\circ$  e ângulo de cunha de  $80^\circ$ , conforme ilustrado na Fig. 18.

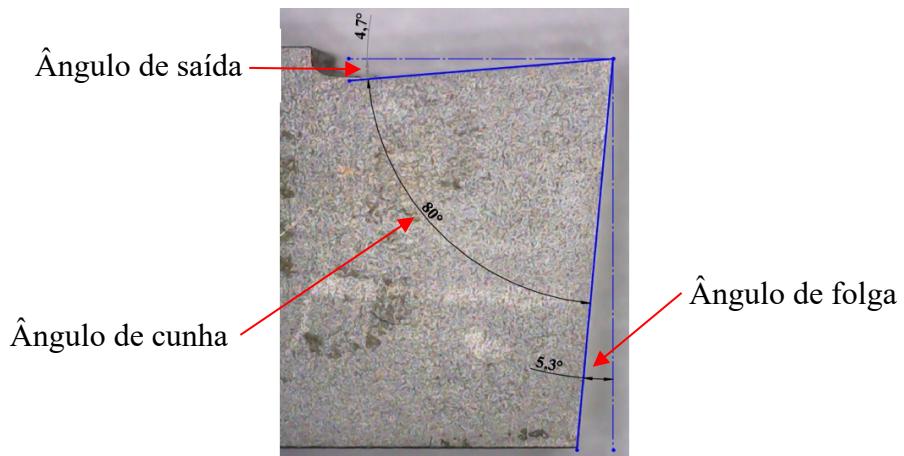


Figura 18 - Ângulos da ferramenta de corte em metal duro

### 3.3 Configuração dos ensaios

Os ensaios foram conduzidos em um torno CNC ROMI, modelo Centur 30D, equipado com o sistema Siemens CNC 2009 (Fig. 19). A máquina possui capacidade para usinar peças de até 1000 mm de comprimento e 250 mm de diâmetro, com rotação máxima de 4000 rpm.



Figura 19 - Torno CNC ROMI Centur 30D

Em todos os ensaios, a configuração experimental foi mantida constante. O corpo de prova foi fixado na placa do torno, com uma extensão livre de 90 mm, e apoiado na extremidade oposta por um contraponto. O suporte da ferramenta foi ajustado de modo a manter uma distância de 55 mm entre a aresta de corte e o magazine de ferramentas, permitindo o posicionamento adequado dos sensores. Pela montagem completa do experimento (Fig. 20) observa-se a disposição dos dois acelerômetros (posicionados nas direções Y e Z), do microfone (localizado a 60 mm acima da interface de corte), da ferramenta de corte, do corpo de prova e do contato elétrico utilizado como sinal de disparo (*trigger*) para a aquisição dos dados.

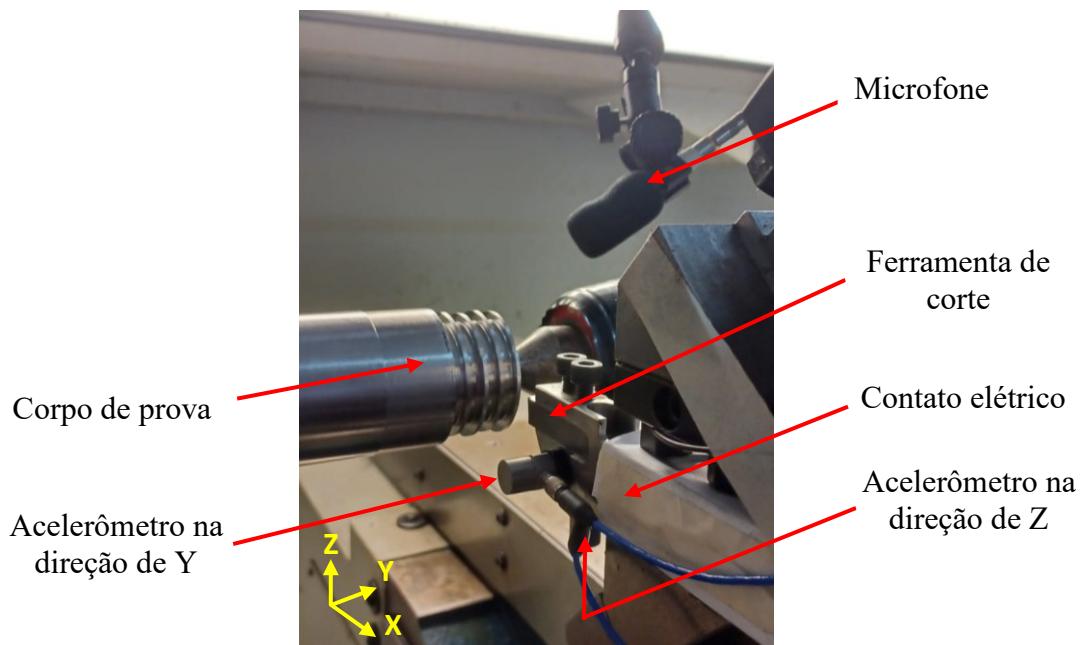


Figura 20 - Montagem do experimento e posicionamento dos sensores

### 3.4 Aquisição dos sinais de usinagem

A aquisição dos dados foi realizada por meio da placa NI 9234, da *National Instruments*, equipada com quatro canais analógicos de entrada. Durante os ensaios, foram utilizados dois acelerômetros e um microfone para registrar os sinais gerados no processo de corte. Os acelerômetros, da marca PCB *Piezotronics INC*, apresentaram sensibilidades de 101,1 mV/g e 98,5 mV/g para os sensores posicionados nas direções do eixos Y e Z, respectivamente. A medição da pressão sonora foi realizada com o microfone GRAS 40PH, que possui captação acústica frontal, faixa de operação de 10 a 20 kHz e sensibilidade de 50 mV/Pa.

A configuração dos canais da placa de aquisição foi definida da seguinte forma: canal 0 para o sinal de disparo (*trigger*), canal 1 para o acelerômetro na direção Y, canal 2 para o acelerômetro na direção Z e canal 3 para o microfone. O esquema de montagem do sistema é apresentado na Fig. 21, abrangendo desde as conexões do *trigger* e dos sensores até o armazenamento dos dados no computador. Todos os sinais foram processados e armazenados inicialmente por meio do software LabVIEW, versão 2016, também desenvolvido pela *National Instruments*.

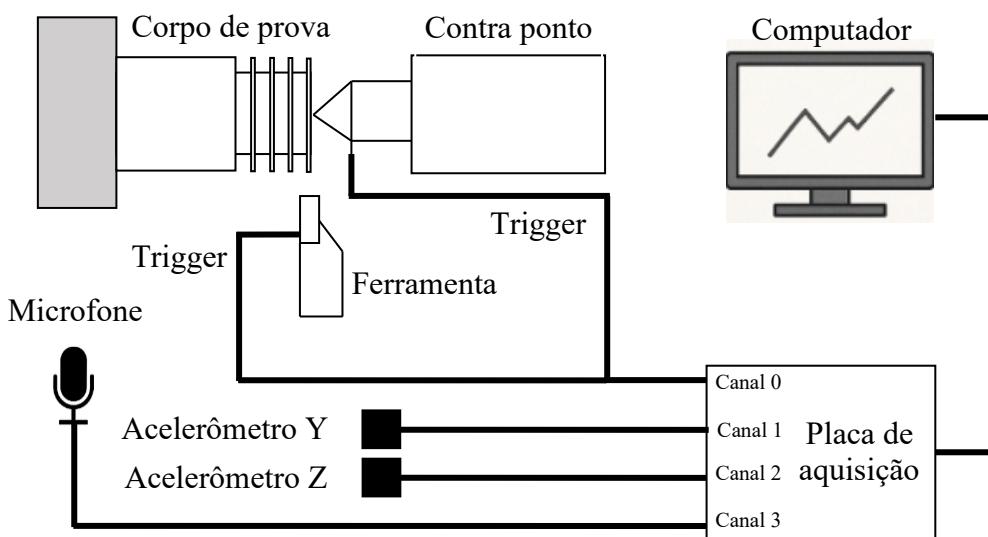


Figura 21 - Esquema de montagem do sistema de aquisição de dados

O sinal de *trigger* foi montado por meio de um contato elétrico entre a ferramenta e o contraponto, permitindo que, no início da usinagem, o canal 0 fosse ativado com  $\pm 5$  V. Essa ativação possibilita a identificação precisa dos instantes de início e término do corte em todos os sinais adquiridos. Um exemplo do sinal de aceleração obtido no eixo Y é apresentado na Fig. 22, destacando os momentos correspondentes ao início e ao fim do corte. Durante a operação de corte, o gráfico de tensão se mantém constante em -5 V, retornando ao valor de +5 V ao final do processo.

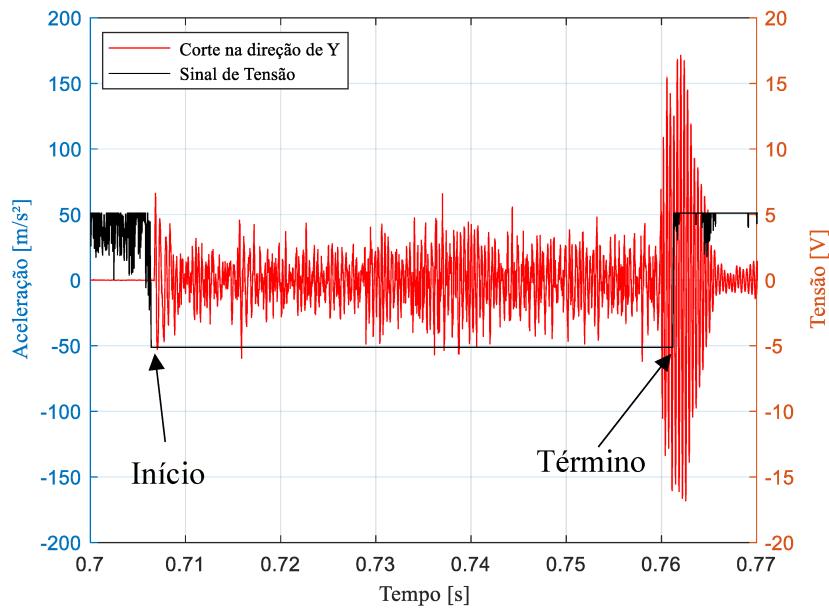


Figura 22 - Detalhe do acionamento do *trigger* no início e término do corte no sinal de vibrações.

### 3.5 Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de corte foram definidos com o objetivo de garantir a repetibilidade dos ensaios e a obtenção de uma base de dados robusta para fins de comparação e análise. Embora a metodologia de aquisição e tratamento dos sinais tenha sido mantida constante, diferentes estratégias de análise dos cavacos foram adotadas ao longo dos experimentos. Em determinados ensaios, a análise concentrou-se em uma única seção longitudinal do cavaco; em outros, investigou-se uma característica específica da APC localizada na extremidade do cavaco. Também foram realizados testes considerando três seções longitudinais ao longo do comprimento do cavaco, com o intuito de obter uma visão mais abrangente do fenômeno.

Durante os ensaios, a velocidade de corte foi a principal variável adotada para favorecer a formação da APC. O avanço variou entre 0,1 mm/volta e 0,2 mm/volta, sendo este último valor utilizado na maioria das análises. A largura de corte foi mantida constante em 1,5 mm nos ensaios que analisaram uma e três seções longitudinais do cavaco, e definida como 2 mm nos testes voltados à investigação da extremidade do cavaco. Os parâmetros de corte utilizados nos experimentos estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Parâmetros de corte variados nos ensaios

<b>Profundidade de corte: 1,5 mm</b>															
Ensaios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Velocidade de corte [m/min]	30			30			50			50			100		
Avanço [mm/volta]	0,10			0,20			0,10			0,20			0,20		
Diâmetro inicial [mm]	51,0			48,0			50,0			49,8			49,4		
Diâmetro final [mm]	50,8			47,6			49,8			49,4			49,0		
<b>Profundidade de corte: 2 mm</b>															
Ensaios	16	17	18	19	20	21	22	23							
Velocidade de corte [m/min]	20	30	40	50	60	70	80	90							
Avanço [mm/volta]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2							
Diâmetro inicial [mm]	34,0	33,8	33,6	33,4	33,2	33,0	32,8	32,6							
Diâmetro final [mm]	33,8	33,6	33,4	33,2	33,0	32,8	32,6	32,4							
<b>Profundidade de corte: 1,5 mm</b>															
Ensaios	24	25	26	27	28	29	30	31							
Velocidade de corte [m/min]	20			30			40			50					
Avanço [mm/volta]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2							
Diâmetro inicial [mm]	48,0	48,0	51,0	50,6	49,8	49,8	48,8	48,8							
Diâmetro final [mm]	47,6	47,6	50,6	50,2	49,4	49,4	48,4	48,4							

### 3.6 Procedimentos para análise dos cavacos

A coleta do cavaco durante os ensaios representa um desafio, uma vez que o processo de corte ocorre de forma extremamente rápida, o que pode resultar na perda do cavaco. Em alguns casos, o cavaco permanece preso na superfície de saída da ferramenta, como apresentado na Fig. 23(a). No entanto, na maioria das situações, o cavaco é ejetado da interface de corte, formando cavacos em espiral, conforme apresentado na Fig. 23(b). Quando os cavacos não permanecem fixados à ferramenta, sua coleta é realizada com o auxílio de um ímã posicionado logo acima da região de corte, facilitando a captura no momento da ejeção. Além disso, é fundamental que a máquina esteja sempre limpa, a fim de evitar a perda dos cavacos.

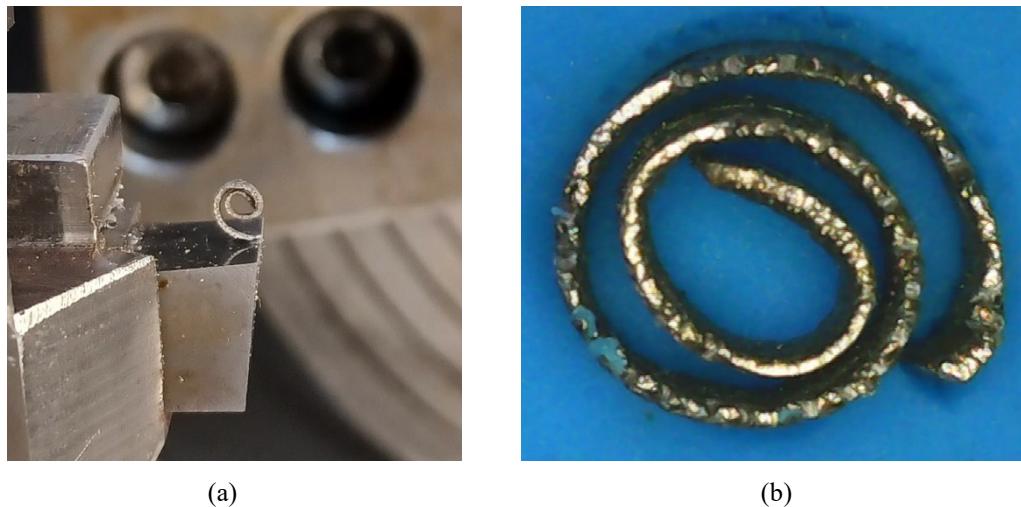


Figura 23 - (a) Cavaco retido na ferramenta após ensaio a 40 m/min. (b) Cavaco em formato espiral obtido em ensaio a 30 m/min

As amostras de cavacos foram embutidas em resina epóxi transparente e submetidas ao processo de lixamento utilizando uma sequência de lixas com granulometrias progressivas: 80, 180, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*. O lixamento foi realizado até atingir aproximadamente a metade da largura do cavaco, o que corresponde a cerca de 0,75 mm para cavacos com 1,5 mm de largura. Em seguida, as amostras foram polidas com pasta de alumina de 1  $\mu\text{m}$  e atacadas quimicamente com solução de Nital a 4% por 8 segundos, com o objetivo de revelar a microestrutura. A análise e o registro das imagens foram realizados com o auxílio do microscópio óptico OLYMPUS BX51M, com ampliação de 50 vezes.

As imagens obtidas foram posteriormente processadas no *software SolidWorks 2022*, sendo utilizadas para a medição do comprimento dos fragmentos das APCs, contagem do número de ocorrências e determinação de suas posições ao longo da superfície inferior do cavaco. Uma região representativa da microestrutura de um cavaco é apresentada na Fig. 24, na qual se observam grãos de ferrita e perlita, além de duas APCs destacadas. Os comprimentos dessas APCs foram medidos em 0,25 mm e 0,28 mm, respectivamente.

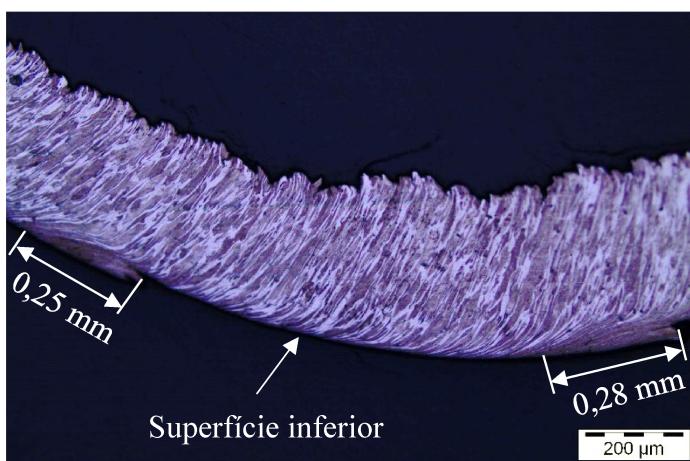


Figura 24 - Cavaco obtido a 50 m/min com ampliação de 100x – Microestrutura

Durante uma das fases dos testes, foi realizada a análise macroscópica da superfície inferior do cavaco (superfície lisa) e de sua extremidade final, com o objetivo de verificar a presença da APC. Para essa avaliação, foram utilizados o estereoscópio OLYMPUS SZ61 e o microscópio óptico OLYMPUS BX51M, com ampliação de 50 vezes.

Com o intuito de aprofundar a investigação sobre a velocidade de corte limite para a formação da APC, e de complementar a análise realizada na extremidade do cavaco, foi realizado um ensaio adicional utilizando um corpo de prova com geometria distinta e uma ferramenta de corte diferente. Esse ensaio adicional consistiu na obtenção da curva da força de corte em função da velocidade de corte, por meio de testes realizados em um torno IMOR MAXI II 520, durante uma operação de torneamento cilíndrico externo em aço ABNT 1050, com diâmetro de 50 mm, utilizando um inserto de metal duro SNMG 120404-MF revestido com TiN. Embora esse tipo de curva permita identificar diferentes estágios da formação da APC com base no comportamento da força de corte, o foco foi determinar a faixa de velocidade na qual a APC deixa de se formar. As velocidades de corte testadas foram 4, 7, 8, 10, 13, 16, 21, 27, 33, 43, 54, 69, 85, 104, 132 e 213 m/min, com avanço constante de 0,095 mm/volta e profundidade de corte de 1 mm. A força de corte foi medida por meio do dinamômetro KISTLER 9235B, considerando-se o valor RMS ao longo de 10 segundos de usinagem para cada condição.

Em uma fase posterior, os cavacos foram embutidos em resina epóxi transparente com o intuito de permitir a análise de múltiplas seções longitudinais. Os procedimentos de lixamento, polimento, ataque químico e análise microestrutural seguiram a mesma metodologia

adotada anteriormente. Entretanto, nessa etapa, foram preparadas e analisadas três seções longitudinais distintas ao longo do cavaco, possibilitando o rastreamento da APC ao longo do cavaco. A localização das três seções no corpo do cavaco é apresentada esquematicamente na Fig. 25. Ressalta-se que, nas análises iniciais, apenas a seção intermediária (Seção 2 da Fig. 25) havia sido preparada e avaliada.

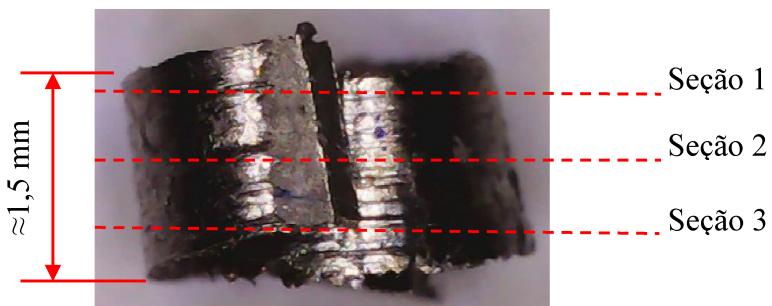


Figura 25 - Vista lateral do cavaco com a predefinição das seções a serem analisadas.

### 3.6.1 Microdureza

A análise de microdureza Vickers (HV) foi realizada em três regiões distintas: no aço ABNT 1050 em seu estado de fornecimento, no corpo do cavaco e na aresta postiça de corte (APC), tanto na extremidade final quanto ao longo da superfície inferior do cavaco. Para essa finalidade, utilizou-se um microdurômetro PANAMBRA, modelo HXD-1000TM, com carga aplicada de 100 gf durante 5 segundos.

Foram selecionados quatro ensaios — Ensaio 1 ( $v_c = 30 \text{ m/min}$  e  $f_n = 0,1 \text{ mm/volta}$ ), Ensaio 5 ( $v_c = 30 \text{ m/min}$  e  $f_n = 0,2 \text{ mm/volta}$ ), Ensaio 8 ( $v_c = 50 \text{ m/min}$  e  $f_n = 0,1 \text{ mm/volta}$ ) e Ensaio 12 ( $v_c = 50 \text{ m/min}$  e  $f_n = 0,2 \text{ mm/volta}$ ). Em cada cavaco analisado, foram realizadas cinco medições consecutivas por região, sendo a média aritmética dos valores obtidos considerada como o resultado final do ensaio..

### 3.7 Teste de impacto do sistema de fixação da ferramenta de corte

Antes do início da análise dos sinais, é essencial compreender o comportamento dinâmico do sistema de fixação da ferramenta, com ênfase na identificação de suas frequências naturais, que representam os modos de vibração intrínsecos do conjunto ferramenta–suporte. O conhecimento dessas frequências é fundamental para distinguir respostas provenientes de

excitações externas, como o impacto do corte ou o desprendimento da APC, das respostas associadas às características estruturais do sistema, evitando interpretações equivocadas durante a análise dos sinais dinâmicos.

Para essa caracterização, foi realizada uma análise modal experimental do conjunto formado pela ferramenta de corte e seu suporte, montado com balanço de 40 mm a partir do magazine de ferramentas. O procedimento consistiu em aplicar excitações controladas utilizando um martelo de impacto da marca Brüel & Kjaer, modelo 8206-002, com sensibilidade de 2,251 mV/N, enquanto as respostas foram medidas por acelerômetros piezelétricos posicionados nas direções dos eixos Z e Y. Os dados adquiridos foram processados para obtenção das Funções de Resposta em Frequência (FRF), permitindo identificar com precisão as frequências naturais dominantes do sistema, as quais serviram como referência nas análises espectrais e nas correlações com os fenômenos físicos observados durante a usinagem.

O objetivo do teste foi identificar as primeiras frequências naturais do sistema, uma vez que estas podem influenciar diretamente os sinais de vibração e os níveis de pressão sonora registrados durante os ensaios de usinagem. A Função de Resposta em Frequência (FRF) foi obtida por meio da aplicação de impactos controlados na estrutura, com a medição simultânea das forças dinâmicas geradas e das respostas em aceleração. Essa metodologia permitiu mapear uma faixa de frequência capaz de englobar os principais modos de vibração do sistema ferramenta-suporte, fornecendo informações essenciais para a interpretação dos fenômenos dinâmicos observados durante o corte.

Cada FRF foi obtida pela média de cinco impactos aplicados na mesma posição, diretamente sobre a aresta de corte da ferramenta, na direção Z. A resposta foi medida por um acelerômetro posicionado logo abaixo do suporte da ferramenta, também no eixo Z. Em seguida, o procedimento foi repetido para o eixo Y, com os impactos aplicados na direção correspondente e o sensor reposicionado para a localização adequada, alinhada a essa orientação. A configuração experimental adotada para a direção Z é apresentada na Fig. 26.

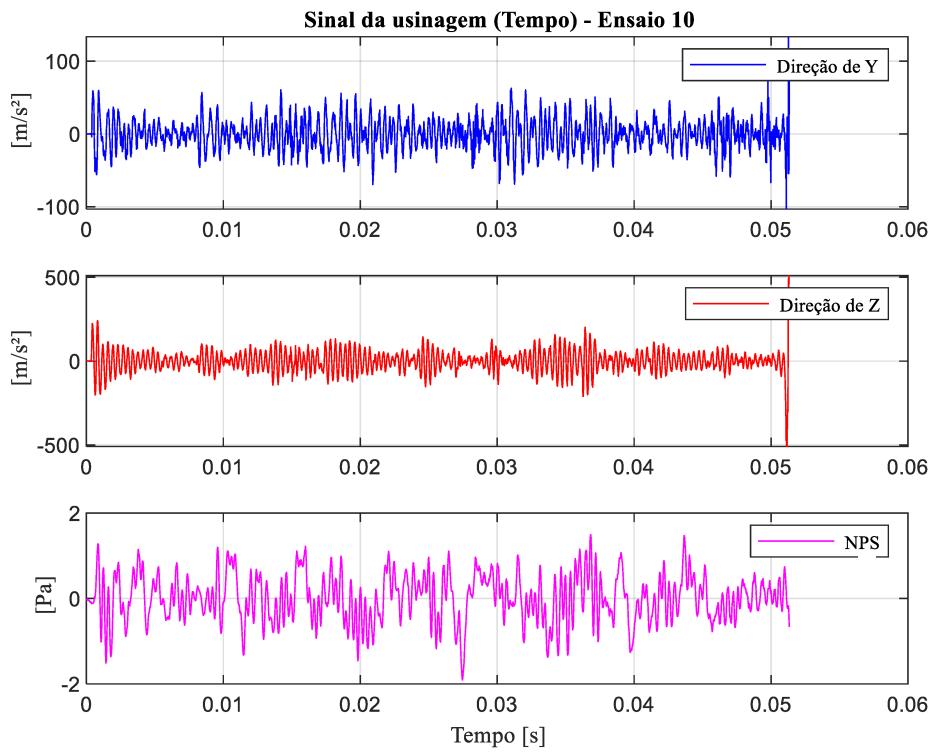


Figura 26 - Ensaio de impacto na ferramenta fixada no suporte – Direção do eixo Z.

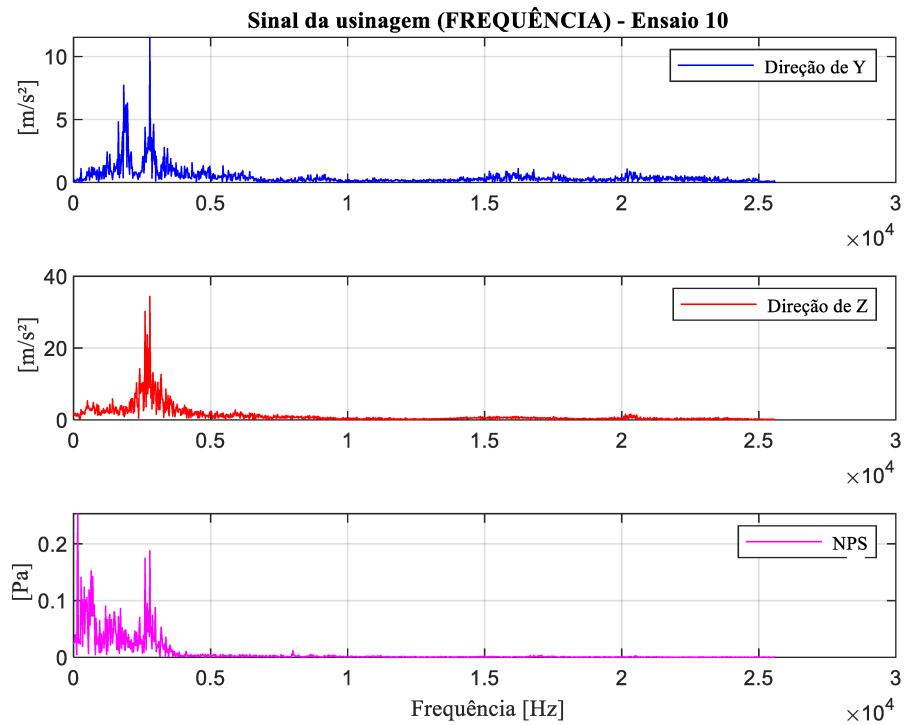
### 3.8 Análise no domínio do tempo e da frequência

O sinal de corte no domínio do tempo foi extraído do sinal bruto com base nas referências de início e fim determinadas pelo sinal de tensão do *trigger*. A taxa de amostragem empregada foi de 51.200 Hz, possibilitando a captação de um volume de informações durante os ensaios de torneamento com corte ortogonal. Embora o ideal fosse obter um único cavaco por ensaio, em alguns experimentos ocorreram dois eventos de corte, resultando normalmente em um cavaco principal, mais espesso, e outro menor e mais fino, oriundo da leve raspagem da ferramenta sobre a peça. Essa diferença pôde ser claramente identificada nos sinais de vibração. No entanto, a análise foi conduzida com foco exclusivo no cavaco principal, de maior espessura.

A análise espectral foi realizada com base na Transformada de Fourier aplicada aos sinais no domínio do tempo. O princípio fundamental dessa técnica consiste em transformar uma função periódica do domínio do tempo para o domínio da frequência. Em aplicações práticas, como nos softwares comerciais utilizados, emprega-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), método que também foi adotado neste trabalho para a análise no domínio da frequência. Os resultados de um ensaio de corte ortogonal são apresentados na Fig. 27, destacando-se os sinais obtidos no domínio do tempo, aceleração nos eixos Z e Y e pressão sonora, representados na Fig. 27(a). Na Fig. 27(b), são apresentados os respectivos espectros dos sinais, obtidos por meio da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT).



(a)



(b)

Figura 27 - Representação dos sinais nos domínios do tempo e da frequência - Ensaio 10 – vc: 50 m/min, fn: 0,2 mm/volta – df: 1 Hz.

Com base nas posições dos fragmentos de APC identificadas por meio da análise microestrutural dos cavacos, foi realizada uma análise pontual no domínio da frequência, considerando as regiões correspondentes à presença dos fragmentos e seus arredores no domínio do tempo. O procedimento consistiu em segmentar os sinais nos seguintes intervalos: exatamente na posição onde o fragmento foi localizado, duas vezes o seu comprimento antes dessa posição, três vezes o seu comprimento antes, duas vezes o seu comprimento depois, e três vezes o seu comprimento depois. Essa abordagem teve como objetivo investigar a existência de assinaturas específicas no espectro de frequência associadas à presença da APC, além de detectar possíveis alterações nos sinais imediatamente anteriores ou posteriores à sua formação e fixação no cavaco. Essa aplicação é apresentada na Fig. 28, destacando-se os intervalos considerados.

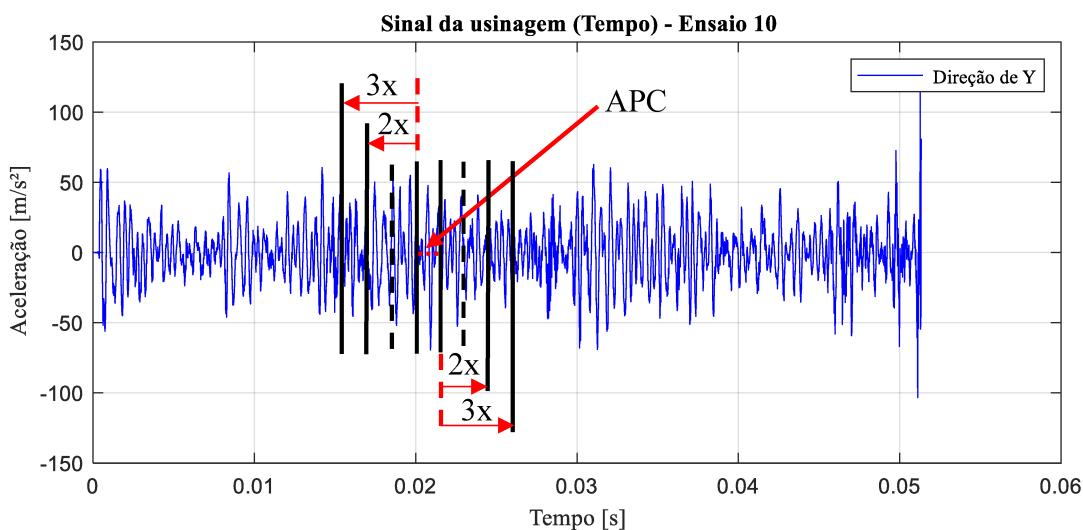


Figura 28 - Exemplo dos intervalos avaliados em torno da APC identificada no cavaco.

Para maior clareza, os cinco intervalos definidos são apresentados separadamente na Fig. 29, abrangendo a região correspondente ao fragmento de APC. Esses intervalos foram extraídos diretamente do segmento do sinal de vibração no qual o fragmento foi identificado no cavaco, permitindo uma investigação detalhada do comportamento dinâmico do sistema ao longo dessas regiões.

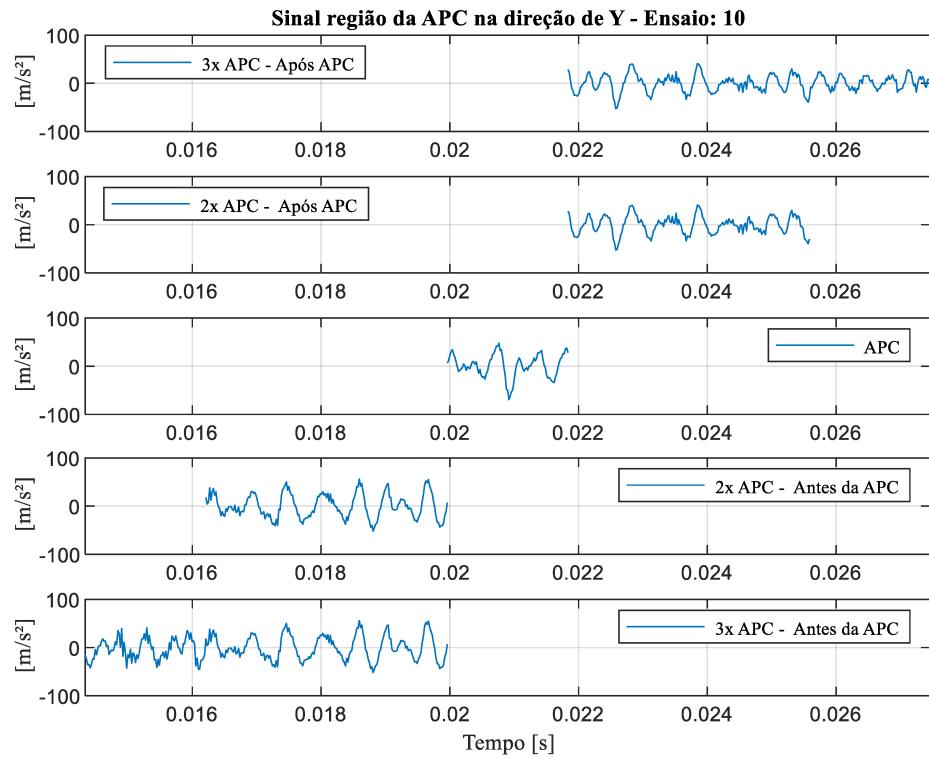


Figura 29 - Representação dos intervalos no domínio do tempo correspondentes à APC e às regiões adjacentes.

Devido ao reduzido número de pontos nos intervalos analisados nas regiões onde se encontram os fragmentos das APCs, a aplicação direta da FFT sobre esses trechos do sinal no domínio do tempo pode gerar distorções, tanto na amplitude quanto na localização dos picos espectrais. Isso ocorre porque, quanto menor o intervalo analisado, menor a resolução espectral, o que pode fazer com que picos de frequência relevantes apareçam deslocados ou atenuados.

### 3.8.1 Preenchimento com zeros (*Zero padding*)

Para contornar esse problema, foi empregada uma técnica conhecida como *zero padding* (preenchimento com zeros), que consiste em adicionar zeros ao final do vetor do sinal no domínio do tempo, aumentando seu comprimento e, consequentemente, melhorando a resolução do espectro de frequência obtido por meio da FFT.

Na Fig. 30(a), são apresentados pequenos trechos do sinal, com comprimentos correspondentes à APC, ao dobro e ao triplo de seu tamanho, nos quais o *zero padding* não foi aplicado, resultando em resoluções espectrais de 528 Hz, 265 Hz e 178 Hz, respectivamente. Já na Fig. 30(b), os mesmos intervalos são apresentados após a aplicação do *zero padding*, o que

proporcionou uma melhora significativa na resolução espectral, ajustada para 1 Hz, além de picos mais evidentes, que não foram observados na ausência do zero *padding*.

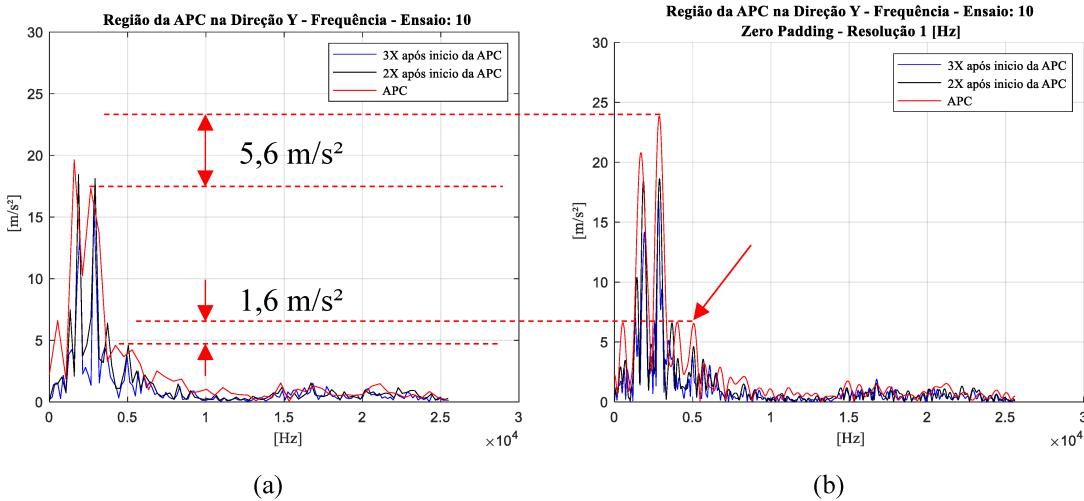


Figura 30 - (a) Comparação dos espectros nas regiões próximas à posição da APC, sem aplicação de zero *padding*. (b) Com aplicação de zero *padding*.

### 3.9 Procedimentos para análise por componentes principais

A Análise por Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística multivariada aplicada a conjuntos de dados descritos por variáveis quantitativas intercorrelacionadas, com o objetivo de extrair informações relevantes e representá-las por meio de um novo conjunto de variáveis ortogonais chamadas componentes principais, preservando a estrutura de similaridade entre os dados (SEGRETO et al., 2014).

Conforme Papadrea et al. (2018), a PCA busca maximizar a variância por meio de combinações lineares das variáveis originais, identificando as associações que melhor representam as semelhanças e diferenças entre os dados. Essa técnica permite a redução da dimensionalidade do conjunto sem perda significativa de informação, concentrando a maior parte da variabilidade nos primeiros componentes principais. O cálculo da matriz de covariância é realizado por meio da decomposição em valores singulares, etapa fundamental para a obtenção das componentes principais (CP).

O procedimento completo de determinação das componentes principais está esquematizado e explicado a seguir. Essa metodologia foi elaborada a partir das contribuições teóricas de diversos autores, como Liu et al. (1987), Mingoti (2005), Segreto et al. (2014),

Papadrea et al. (2018), Josh e Patil (2020) e Kumar e Verma (2021), que fundamentaram as etapas do método. Sendo posteriormente implementado por meio de um algoritmo desenvolvido no ambiente MATLAB 2018.

**Etapa 1:** Calcular a média de cada variável ( $\bar{x}_p$ ), conforme a Eq. (23), para compor a matriz de dados  $M$ , descrita na Eq. (24). Neste passo, as variáveis foram organizadas em ordem decrescente de média: a primeira coluna (1<sup>a</sup> variável) corresponde à variável com maior média, seguida pelas demais em sequência decrescente. Ressalta-se que todas as variáveis devem possuir o mesmo número de objetos (ou seja, o mesmo número de linhas nos vetores) para viabilizar a formação adequada da matriz de dados;

$$\bar{x}_p = \frac{\sum_{i=1}^n a_{i,p}}{n} \quad (23)$$

$$M = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{np} \end{vmatrix}_{(n \times p)} \quad (24)$$

**Etapa 2:** Calcular o desvio padrão ( $\sigma_p$ ) e a variância ( $v_p$ ) das  $p$ -variáveis, conforme definido nas Eq. (25) e Eq. (26), respectivamente. Esses parâmetros estatísticos são essenciais para quantificar a dispersão dos dados em torno da média, sendo a variância a medida de variabilidade e o desvio padrão sua raiz quadrada, representando a dispersão em unidades da própria variável;

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{ip} - \bar{x}_p)^2}{n}} \quad (25)$$

$$v_p = \sigma_p^2 \quad (26)$$

**Etapa 3:** Padronizar as  $p$  variáveis por meio da subtração de suas respectivas médias e posterior divisão pelos respectivos desvios padrão, conforme Eq. (27). Essa etapa visa centralizar os dados e uniformizar a escala das variáveis, garantindo que todas contribuam igualmente na análise e permitindo a maximização da variância relativa no cálculo das componentes principais;

$$M = \begin{vmatrix} \frac{(a_{11}-\bar{x}_1)}{\sigma_1} & \frac{(a_{12}-\bar{x}_2)}{\sigma_2} & \dots & \frac{(a_{1p}-\bar{x}_p)}{\sigma_p} \\ \frac{(a_{21}-\bar{x}_1)}{\sigma_1} & \frac{(a_{22}-\bar{x}_2)}{\sigma_2} & \dots & \frac{(a_{2p}-\bar{x}_p)}{\sigma_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{(a_{n1}-\bar{x}_p)}{\sigma_p} & \frac{(a_{n2}-\bar{x}_p)}{\sigma_p} & \dots & \frac{(a_{np}-\bar{x}_p)}{\sigma_p} \end{vmatrix}_{(n \times p)} \quad (27)$$

**Etapa 4:** Calcular a matriz de covariância a partir da matriz de amostragem contendo as  $p$ -variáveis padronizadas. O resultado é uma matriz simétrica de dimensão  $(p \times p)$ , em que cada elemento representa a covariância entre um par específico de variáveis. Esse conceito é apresentado na Eq. (28), na qual é exibida a fórmula da covariância e exemplificado o cálculo do elemento  $(a_{12})$ .

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i) * (Y_i)]}{(n-1)} \quad (28)$$

A matriz de covariância ( $M_{cov}$ ) é obtida conforme indicado na Eq. (29). Considerando o uso de três variáveis, a estrutura da matriz de covariância assume a seguinte forma:

$$M_{cov} = \begin{vmatrix} cov(X, X) & cov(X, Y) & cov(X, Z) \\ cov(Y, X) & cov(Y, Y) & cov(Y, Z) \\ cov(Z, X) & cov(Z, Y) & cov(Z, Z) \end{vmatrix}_{(3 \times 3)} \quad (29)$$

**Etapa 5:** Calcular os autovalores e os autovetores da matriz de covariância ( $M_{cov}$ );

**Etapa 6:** Caso necessário, rearranjar os autovetores de forma que os autovalores ( $\lambda_p$ ) estejam organizados em ordem decrescente, ou seja,  $(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{final})$ . Consequentemente, os autovetores correspondentes também devem ser reordenados na mesma sequência ( $v_1, v_2, \dots, v_{final}$ ). Assim, a primeira componente principal, que representa a maior variância, estará associada a  $v_1$ , a segunda componente principal, a  $v_2$  e assim sucessivamente.

**Etapa 7:** Após reorganização dos autovalores e autovetores no passo 6, as linhas dos autovetores representam os pesos (*loadings*) das componentes principais. Os *scores* das componentes principais ( $scores_{cp}$ ) são calculados com a Eq. (30), que consiste na multiplicação da matriz de dados padronizados ( $M$ ) pelo auto-vetor reorganizado ( $v$ ).

$$scores_{cp} = M * v \quad (30)$$

Neste estudo, a redução de dimensionalidade foi aplicada aos sinais provenientes dos sensores de aceleração nas direções Y e Z, além do sinal de pressão sonora. Os dados originais

foram organizados em uma matriz, na qual cada coluna representa uma variável (sensor) e cada linha corresponde a um instante temporal (objeto de análise).

### 3.9.1 Interpolação e decimação

Devido às diferentes velocidades de corte empregadas, o tempo total de aquisição dos dados varia entre os ensaios e, consequentemente, o número de pontos também, uma vez que a taxa de amostragem permanece constante. Para permitir a comparação entre os sinais e viabilizar análises multivariadas, como a PCA, torna-se necessário ajustar a taxa de amostragem dos sinais.

De modo geral, a interpolação permite aumentar a resolução temporal dos sinais adquiridos, isto é, elevar a taxa de amostragem, enquanto a decimação reduz essa taxa em sinais com maior resolução, preservando, contudo, as informações relevantes do sinal (BOUHAROUTI et al., 2023). Essas operações são amplamente abordadas na literatura de processamento digital de sinais, como nos materiais do MATLAB (2018), que descrevem a implementação de interpoladores e decimadores utilizando filtros FIR.

Como neste trabalho a PCA foi aplicada com base em três variáveis, adotou-se como referência o vetor com o maior número de amostras. Os demais vetores foram inicialmente submetidos a um processo de interpolação e, em seguida, à decimação, com o objetivo de igualar seus comprimentos ao do vetor de referência. Essa abordagem garante o alinhamento dos sinais quanto ao número de pontos, ao mesmo tempo em que preserva as principais características dinâmicas de cada variável. Para a execução desse ajuste, foi desenvolvido um algoritmo específico, cujas etapas são apresentadas a seguir:

**Etapa 1:** Calcular o mínimo múltiplo comum (MMC) do número de amostras das três variáveis;

**Etapa 2:** A interpolação é realizada com base no cálculo do MMC entre os comprimentos dos vetores, permitindo determinar a quantidade de zeros a serem inseridos entre os pontos originais. Como exemplo, considere três variáveis com 4800, 2600 e 1400 amostras, respectivamente, obtidos a uma taxa de aquisição de 51200 Hz. Nesse caso, o vetor de referência será o primeiro, com 4800 amostras, e o MMC entre os três comprimentos é 436800. Isso significa que os vetores de 2600 e 1400 amostras devem ser interpolados até atingir esse valor.

Para isso, são inseridos 167 zeros entre cada amostra da segunda variável (2600 amostras) e 311 zeros entre cada amostra da terceira variável (1400 amostras), de modo que todos os vetores interpolados passem a ter 436800 amostras. Para manter a coerência temporal após a interpolação, a taxa de aquisição das variáveis foi ajustada proporcionalmente: a segunda variável passou a uma taxa de 8.550.400 Hz (167 vezes a original) e a terceira variável para 15.923.200 Hz (311 vezes a original).

Para exemplificar o funcionamento do método, considera-se a segunda variável. O sinal original, composto por 2600 amostras, é apresentado na Fig. 31, enquanto o sinal resultante após o processo de interpolação, com 436800 amostras, é exibido na Fig. 32. Observa-se, além do aumento significativo no número de amostras, uma alteração no formato da onda, evidenciando a inserção de zeros entre as amostras originais.

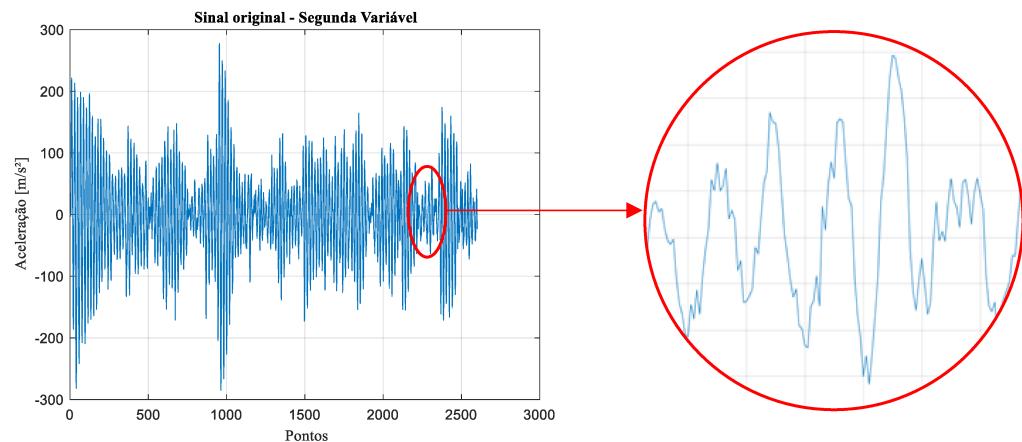


Figura 31 - Exemplo de sinal de aceleração com 2600 amostras. Detalhe para o formato da onda original, sem interpolação.

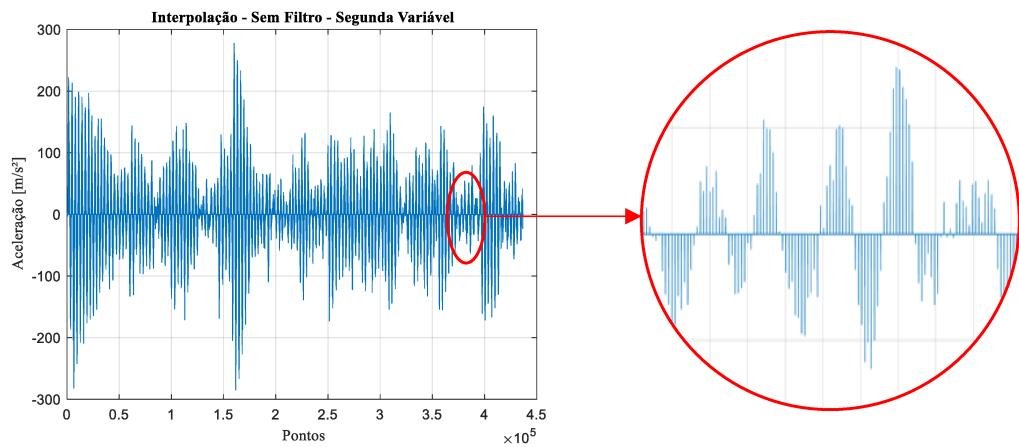


Figura 32 - Interpolação do sinal de aceleração com 2600 amostras para 436800 amostras. Detalhe para a forma da onda após a inserção de zeros entre os dados originais.

**Etapa 3:** O sinal interpolado foi então submetido a um filtro digital passa-baixa, utilizando-se a função *lowpass FIR* do MATLAB (2018). O resultado da aplicação do filtro sobre o sinal previamente interpolado é apresentado na Fig. 33. No detalhe da Fig. 33, observa-se que o formato da onda torna-se semelhante ao do sinal original (Fig. 31), porém com um número significativamente maior de pontos.

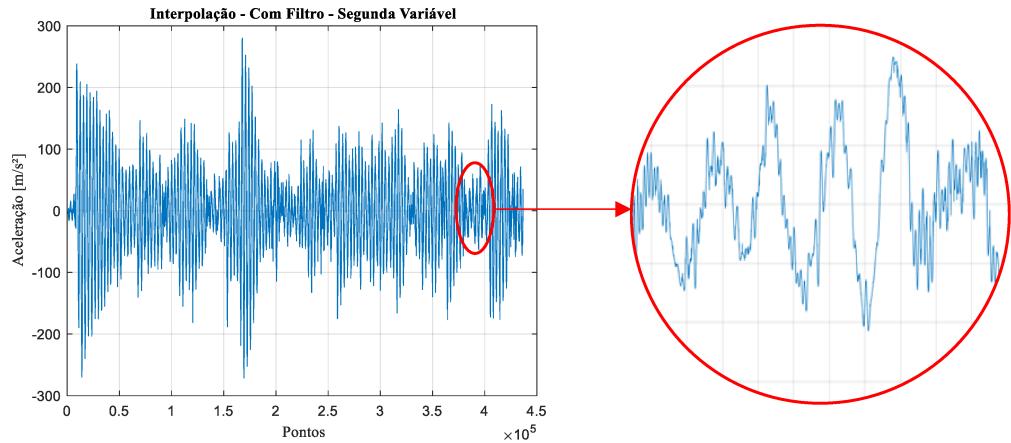


Figura 33 - Sinal de aceleração interpolado após aplicação de filtro digital passa-baixa. Detalhe para a forma da onda resultante, preservando o perfil do sinal original.

**Etapa 4:** A etapa de decimação é aplicada ao sinal interpolado e filtrado, com o objetivo de ajustar seu comprimento ao do vetor de referência, definido como o maior entre os vetores das variáveis originais. Essa etapa consiste na remoção sistemática de amostras do sinal, de

modo a adequar a taxa de amostragem original (51200 Hz) e igualar o número total de amostras ao do vetor de referência.

O sinal no domínio do tempo após o processo de decimação é apresentado na Fig. 34. Observa-se que o vetor resultante contém 4800 amostras, mantendo uma forma de onda bastante semelhante à do sinal original. No detalhe da Fig. 34, é possível perceber essa semelhança, embora com maior densidade de amostras em relação ao sinal inicial.

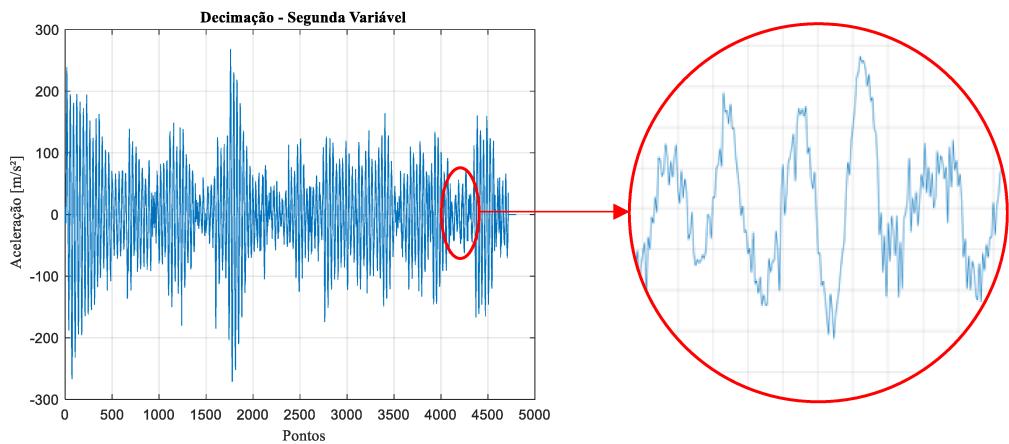


Figura 34 - Decimação do sinal de aceleração após interpolação e aplicação de filtro digital. Detalhe para a forma da onda resultante, ajustada ao tamanho do vetor de referência.

### 3.9.2 Procedimentos para análise por transformada de *Wavelet*

A Transformada *Wavelet* fundamenta-se na decomposição de sinais em componentes que variam simultaneamente no tempo e na frequência. Diferentemente da Transformada de Fourier, que representa o sinal exclusivamente no domínio da frequência, a *Wavelet* preserva a informação temporal de eventos localizados, superando a limitação de resolução temporal da análise espectral clássica (POLIKAR, 2006).

A opção pela Transformada Contínua de *Wavelet* (CWT) em detrimento de métodos tradicionais, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a Transformada de Fourier de Curto Prazo (STFT), justifica-se pelo caráter não estacionário dos sinais de vibração e pressão sonora registrados durante o processo de usinagem. Tanto a FFT quanto a STFT pressupõem estacionalidade dentro do intervalo analisado, o que não ocorre em fenômenos transitórios como o desprendimento da APC. Nessas condições, as variações súbitas de energia e frequência

são diluídas ou mascaradas no espectro médio da FFT e limitadas pela resolução fixa da janela de análise da STFT (SMITH, 1999).

Além disso, a utilização de janelas clássicas, como a Hanning, impõe um compromisso entre resolução temporal e espectral: janelas longas oferecem boa resolução em frequência, mas perdem sensibilidade temporal, enquanto janelas curtas capturam eventos rápidos, mas com baixa resolução espectral. Em contraste, a *Wavelet* emprega janelas de análise adaptativas, que se contraem em altas frequências e se expandem em baixas, permitindo detecção precisa de eventos transitórios e identificação multiescala dos componentes do sinal (POLIKAR, 2006).

Neste trabalho, utilizou-se a Transformada *Wavelet* Contínua (CWT), devido ao seu bom desempenho na identificação de componentes transientes, mesmo em escalas reduzidas. Para isso, empregaram-se *Wavelets* analíticas, que possuem coeficientes complexos e cuja transformada de Fourier é nula para frequências negativas. Tais características tornam possível extrair simultaneamente informações de amplitude e fase, além de permitir a análise da evolução espectral de sinais reais e não estacionários.

### 3.9.3 Aplicação da CWT nos sinais experimentais

A CWT foi implementada no ambiente MATLAB 2018 por meio de um algoritmo que realiza a translação da *Wavelet* ao longo do sinal (parâmetro  $b$ ) e ajusta sua largura com base no parâmetro de escala  $a$ . Inicialmente, o procedimento foi aplicado pontualmente em regiões específicas dos sinais adquiridos durante os ensaios de corte ortogonal, com ênfase nos intervalos nos quais foi identificada a presença do fragmento da APC no cavaco, conforme descrito nas etapas anteriores da metodologia. As equações fundamentais da CWT utilizadas neste trabalho estão apresentadas no Capítulo 2, como Eq. (8) e Eq. (9), sendo replicadas a seguir para melhor compreensão do método aplicado.

$$X_w(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{(a,b)}(t) dt \quad (8)$$

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ com } a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (9)$$

Nessas expressões,  $x(t)$  pode ser o sinal e aceleração nos eixos Y e Z, além do sinal de pressão sonora,  $\psi_{a,b}(t)$  é a *Wavelet*-mãe escalada e transladada,  $a$  é o parâmetro de escala, e  $b$  o parâmetro de translação ao longo do sinal.

Conforme ilustrado na Fig. 35(a), a aplicação pontual da Eq. (8) na análise de eventos com localização temporal definida demonstra que parte do sinal é desconsiderada fora da região de interesse, quando a *Wavelet-mãe* é aplicada ao sinal original (em azul). Essa característica da análise está diretamente relacionada ao fator de escala  $a$  e, indiretamente, à frequência correspondente. A Fig. 35 (a) também apresenta parte do sinal original (em vermelho) e a *Wavelet-mãe* dilatada (em magenta). Ressalta-se que a amplitude da *Wavelet-mãe* utilizada no método é normalizada, assumindo valor unitário. A forma final da janela de análise é determinada pela dilatação da *Wavelet-mãe*, que define sua extensão no domínio do tempo.

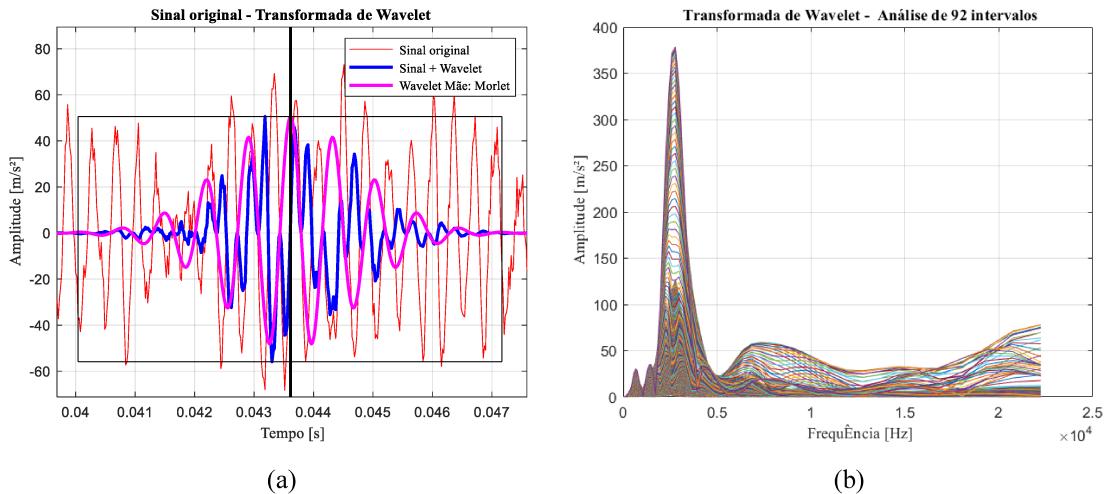


Figura 35 - (a) Aplicação pontual da *Wavelet-mãe* em uma posição aleatória do sinal, com o sinal original e a *Wavelet-mãe* ampliada. (b) Aplicação da CWT em 92 intervalos do sinal original.

Na Figura 35(b), são apresentadas diversas aplicações pontuais da CWT ao longo do sinal, demonstrando que a superposição dos resultados pode dificultar a interpretação. Dessa forma, a aplicação da CWT ponto a ponto em toda a extensão do sinal seria excessivamente demorada e de difícil comparação, considerando-se a grande quantidade de dados adquiridos.

Para garantir uma análise mais eficiente e informativa, capaz de evidenciar as variações de frequência ao longo de todo o sinal no tempo, adotou-se a apresentação dos resultados da CWT por meio de escalograma tridimensional (3D) e análise por camada (cortes) no escalograma 3D.

### 3.9.4 Wavelet - Mãe utilizada na análise

A *Wavelet-mãe* de Morlet, representada na Fig. 36(a), foi selecionada neste estudo por apresentar melhor adaptação aos dados experimentais em comparação a outras famílias de *Wavelets*, como a Chapéu Mexicano, ilustrada na Fig. 36(b). As figuras permitem comparar ambas as funções, evidenciando que a *Wavelet* de Morlet preserva informações relevantes do sinal no domínio do tempo, devido à sua característica de modulação senoidal. Essa propriedade resulta na melhor manutenção da amplitude, bem como dos picos e vales característicos do sinal original, que permanecem visíveis após a aplicação da *Wavelet* de Morlet.

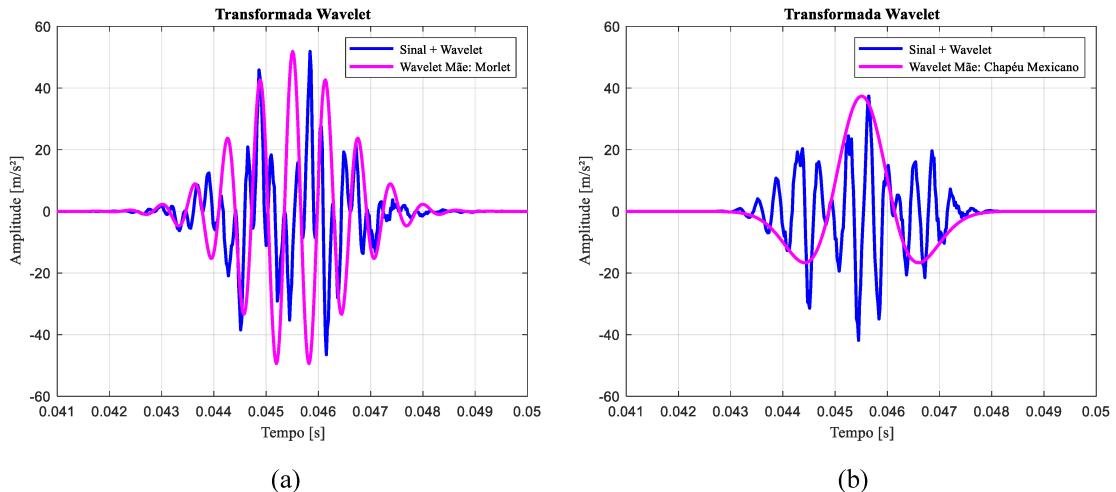


Figura 36 - (a) Aplicação da *Wavelet* Morlet a um sinal de aceleração. (b) Aplicação da *Wavelet* Chapéu Mexicano ao mesmo ponto do sinal.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na identificação da APC durante o corte ortogonal do aço ABNT 1050. As análises foram realizadas com o objetivo de compreender o comportamento da APC e sua influência sobre os sinais dinâmicos e as características dos cavacos formados. Para isso, os resultados são apresentados de forma sequencial, contemplando inicialmente a análise macroscópica dos cavacos e a identificação dos fragmentos de APC na extremidade final do cavaco, seguida do ensaio complementar de torneamento cilíndrico externo, realizado para observar o comportamento do material e determinar a velocidade de corte em que a APC deixa de se formar.

Na sequência, são discutidos os resultados referentes à análise microestrutural do cavaco em uma seção longitudinal, ao ensaio de microdureza e à mensuração do comprimento, quantidade e posicionamento dos fragmentos de APC nessa mesma seção. Em seguida, são apresentados os resultados da PCA, do teste de impacto no conjunto ferramenta-suporte e das análises dos sinais nos domínios do tempo e da frequência, incluindo a avaliação das regiões dos sinais correspondentes à presença de fragmentos de APC nos cavacos.

Por fim, são apresentados os resultados da análise microestrutural do cavaco em três seções longitudinais, da mensuração do comprimento, quantidade e posição dos fragmentos de APC em cada uma delas, e, posteriormente, a análise no domínio tempo e frequência por meio da CWT, empregada para caracterizar com maior precisão os fenômenos associados à formação e ao desprendimento da APC..

#### 4.1 Análise macroscópica

Foi possível observar, em determinadas condições de velocidade de corte ( $v_c$ ), a presença de fragmentos de APC aderidos ao cavaco, manifestando-se de duas formas distintas: como “escamas” dispostas sobre a superfície inferior do cavaco e como fragmentos fixados à sua extremidade final, na região onde o corte é interrompido. Essa ocorrência está diretamente associada à geometria do corpo de prova, projetado com uma entrada suavizada e com a trajetória de corte interrompida ao final de um quadrante, favorecendo a fixação de parte da APC nessa região. As Fig. 37, Fig. 38, Fig. 39 e Fig. 40 evidenciam a presença da APC tanto sobre as superfícies dos cavacos, indicadas por setas, quanto na extremidade final, destacada com círculo em vermelho. Esses cavacos foram obtidos em ensaios realizados com diferentes combinações de velocidade de corte e avanço.

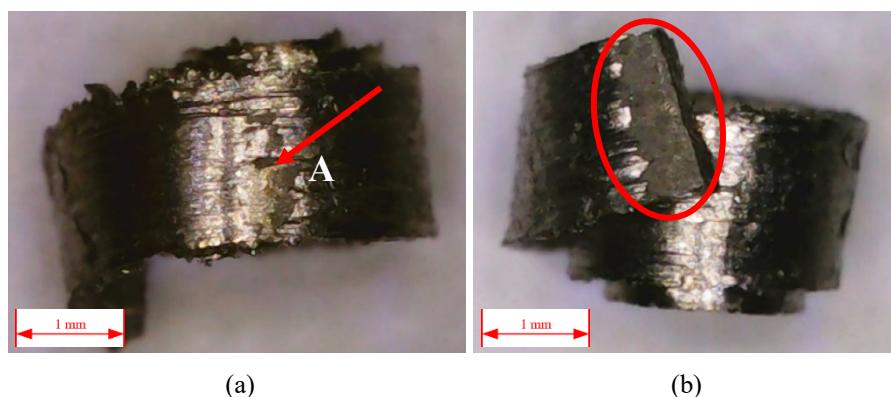


Figura 37 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 3:  $v_c$ : 30 m/min e  $f_n$ : 0,1 mm/volta.

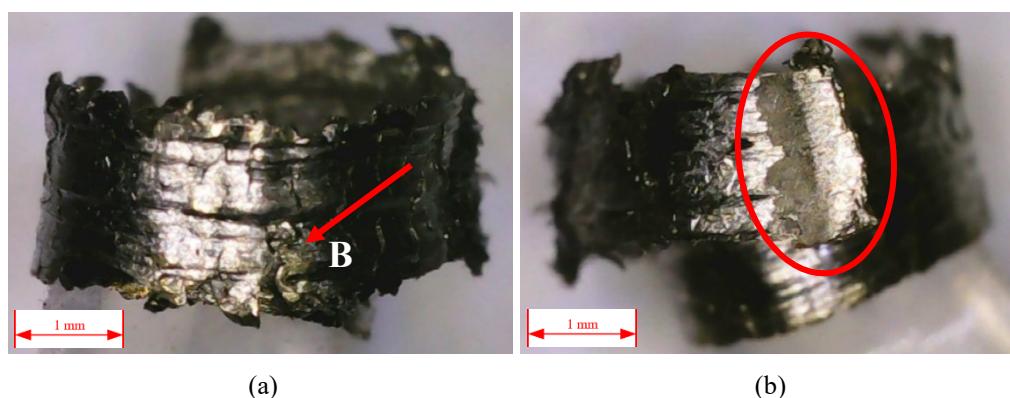


Figura 38 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 5:  $v_c$ : 30 m/min e  $f_n$ : 0,2 mm/volta.

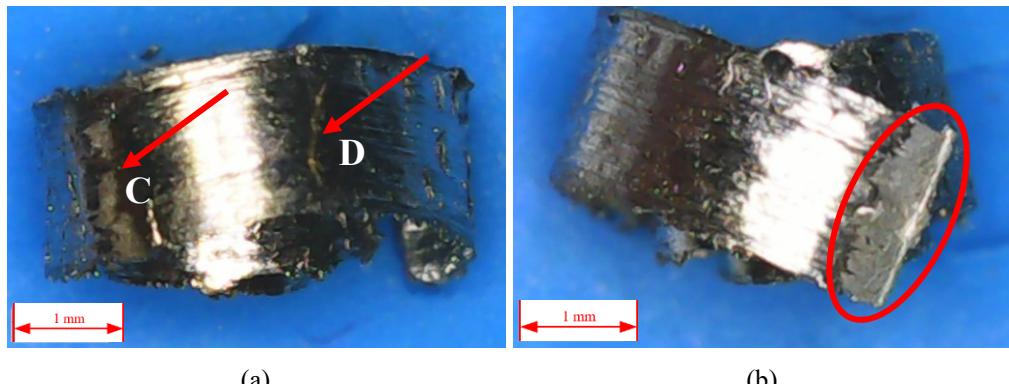


Figura 39 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 8;  $v_c$ : 50 m/min e  $f_z$ : 0,1 mm/volta.

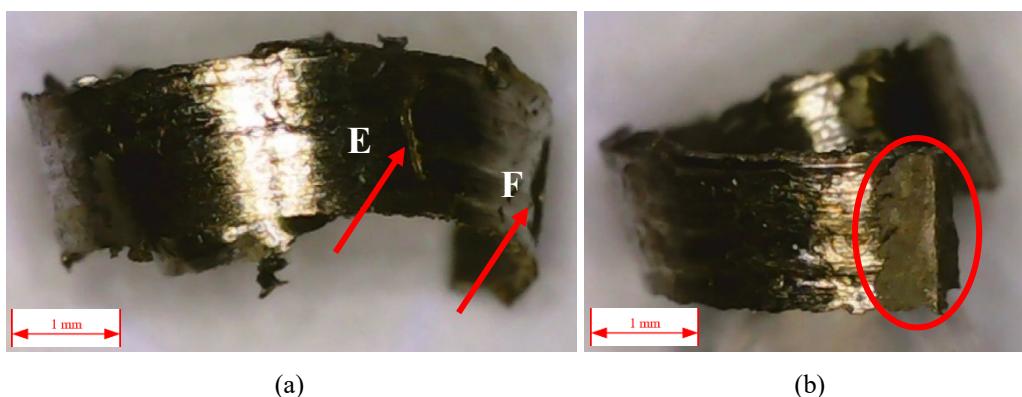


Figura 40 - (a) Presença de APC na superfície inferior do cavaco; (b) APC fixada na extremidade final do cavaco. Imagens referentes ao Ensaio 12:  $v_c$ : 50 m/min e  $f_i$ : 0,2 mm/volta.

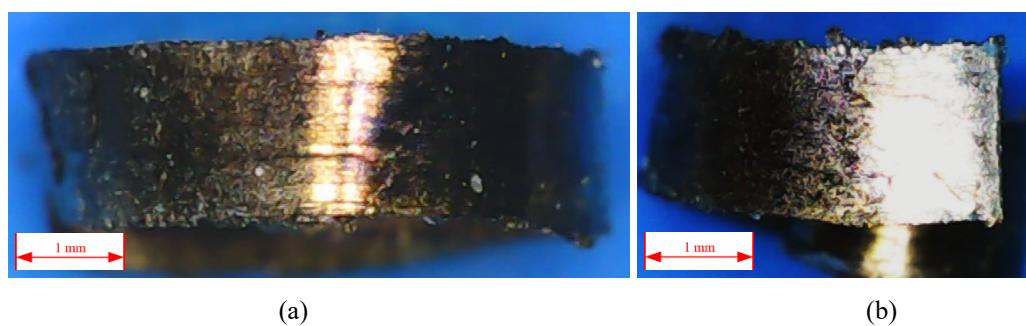


Figura 41 - (a) Superfície inferior de um cavaco sem presença de APC; (b) Extremidade final do cavaco sem APC aderida. Imagens referentes ao Ensaio 13, com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 100 m/min e avanço ( $f_n$ ) de 0,2 mm/volta.

A análise visual das Fig. 37, Fig. 38, Fig. 39 e Fig. 40 reforça a recorrência da formação da APC em diferentes regiões do cavaco, mesmo sob variações nas condições de usinagem. No entanto, a Fig. 41 permite observar o cavaco correspondente ao Ensaio 13, no qual não foi identificada a presença de APC, nem sobre a superfície inferior, nem na extremidade final do

cavaco. Neste ensaio a velocidade de corte foi de 100m/min. Nestas condições não é esperado a formação de APC.

Análises das micrografias desses cavacos serão abordadas oportunamente, em seções posteriores. Neste momento, o foco concentra-se na verificação da presença da APC na extremidade final do cavaco, bem como na identificação da faixa de velocidade de corte em que ainda se observam fragmentos da APC aderidos ao cavaco.

#### 4.1.1 Identificação da APC na extremidade final do cavaco

Para esse fim, foi realizada uma sequência de ensaios com o objetivo de avaliar a ocorrência da APC nessa região, em diferentes velocidades de corte. Uma série de imagens das extremidades dos cavacos obtidos nos Ensaios 16 a 23 é apresentada na Fig. 42. Nelas, é observada a presença de APC nos ensaios realizados com velocidades de corte entre 20 e 60 m/min, sendo a APC identificada por sua aparência opaca, em contraste com o restante da superfície do cavaco. Os resultados demonstram que o método adotado permite a detecção da APC de forma eficaz, mesmo sem o uso de dispositivos, como no método Quick-stop. Nesse caso, a identificação ocorre diretamente na extremidade do cavaco, onde a interrupção do corte ocorre.

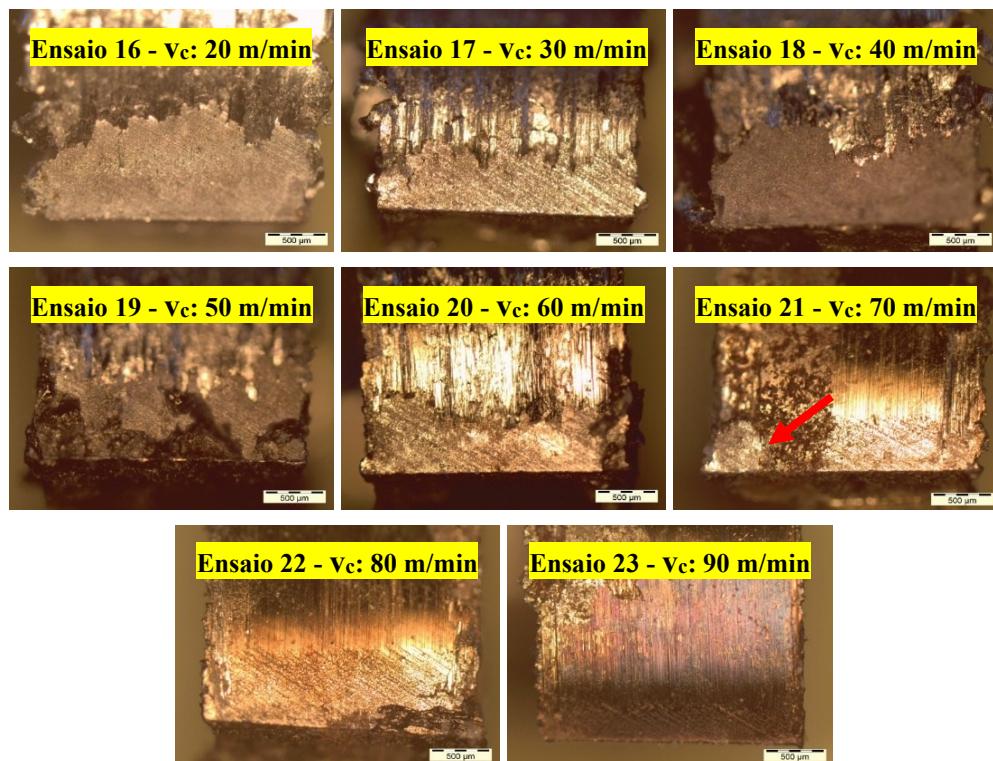


Figura 42 - Imagens da extremidade final dos cavacos obtidos nos Ensaios 16 a 23 - Ampliação 50X

No ensaio com 70 m/min, Fig. 42, um pequeno fragmento de APC é visível no canto esquerdo da extremidade do cavaco, sugerindo uma redução significativa na sua formação. Já nas velocidades de 80 e 90 m/min, não há indícios visuais da presença de APC, e a extremidade do cavaco apresenta-se substancialmente mais lisa em comparação aos ensaios anteriores, nos quais a presença da APC era evidente.

A partir da análise apresentada na Fig. 42, observa-se que a formação da APC deixa de ocorrer na interface de corte em velocidades superiores a 80 m/min, com base na avaliação visual dos cavacos. Para reforçar essa evidência, foi conduzido um ensaio complementar utilizando o mesmo material adotado neste estudo, o aço ABNT 1050, porém com ferramenta distinta e outro tipo de torneamento.

#### 4.1.2 Ensaio complementar - Velocidade de corte x Força de corte

Nesse caso, empregou-se o torneamento cilíndrico externo, permitindo a avaliação do comportamento da força de corte sob diferentes velocidades de corte. É importante destacar que o objetivo desse ensaio adicional não foi comparar a eficiência das ferramentas ou dos métodos de usinagem, mas sim analisar o comportamento do material com base na força de corte, contribuindo para a definição da faixa de velocidade na qual a APC deixa de se formar no aço ABNT 1050.

A curva da força de corte em função da velocidade de corte, obtida na usinagem cilíndrica externa, é apresentada na Fig. 43. Embora se trate de um processo distinto do corte ortogonal, essa análise é considerada relevante para a compreensão da dinâmica de formação e rompimento da APC no material.

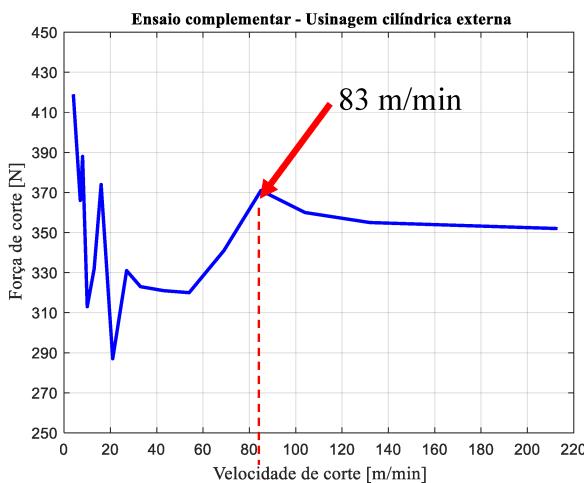


Figura 43 - Curva velocidade de corte pela força de corte no torneamento cilíndrico externo do aço ABNT 1050

Entre 4 m/min e 21 m/min, observa-se uma fase estável, com oscilações na força de corte associadas à presença contínua da APC na interface cavaco-ferramenta. Entre 21 m/min e aproximadamente 83 m/min, inicia-se uma fase instável, com redução das oscilações, devido ao rompimento parcial ou total da APC. Nessa faixa, a força de corte aumenta até atingir 83 m/min, ponto a partir do qual começa a decrescer. Esse comportamento está relacionado ao aumento da temperatura na interface de corte, que torna o material da peça mais dúctil, favorece a recristalização do material aderido e dificulta a formação da APC.

#### 4.2 Análise da microestrutura do cavaco em uma seção

A identificação das APCs por meio da microestrutura em uma única seção do cavaco foi realizada a partir dos cavacos obtidos nos Ensaios 1 a 15, nos quais se variaram a velocidade de corte e o avanço, mantendo-se constante a espessura de corte em 1,5 mm. Para demonstrar como esses resultados foram obtidos, foram selecionados os mesmos ensaios utilizados na análise visual da superfície inferior do cavaco. Verificou-se, com isso, a presença de APCs não apenas na extremidade, mas também distribuídas ao longo da extensão dos cavacos nos Ensaios 3, 5, 8 e 12. Por outro lado, no Ensaio 13, conforme apresentado anteriormente, não foram observados fragmentos de APC, nem na superfície inferior, nem na extremidade do cavaco. Essa característica pode ser confirmada por meio da comparação direta entre as evidências visuais previamente discutidas e as análises microestruturais.

A microestrutura do cavaco referente ao Ensaio 3 ( $v_c = 30 \text{ m/min}$  e  $f_n = 0,1 \text{ mm/volta}$ ) é apresentada na Fig. 44, onde são destacados os fragmentos de aresta postiça de corte (APC).

aderidos ao longo da superfície inferior, numerados de 1 a 6. As APCs exibem coloração distinta em relação ao corpo do cavaco, especialmente nos fragmentos de maior tamanho, o que facilita sua identificação. Essa diferença de tonalidade resulta do ataque químico com solução de nital a 4%, que evidencia em cor diferenciada as regiões encruadas, enquanto o corpo do cavaco mantém a coloração característica do material não encruado. Ressalta-se que o fragmento identificado como APC 6 corresponde à mesma formação em forma de “escama” assinalada como “A” na Figura 37(a), observada durante a análise macroscópica, confirmando a coerência entre as observações em diferentes escalas de análise.

A Figura 45 mostra dois fragmentos de APC ao longo da superfície inferior do cavaco obtido no Ensaio 5 ( $v_c$ : 30 m/min e  $f_n$ : 0,2 mm/volta). O fragmento identificado como APC 2 corresponde à mesma formação destacada como “B” na Fig. 38(a). Já a Fig. 46 exibe dez fragmentos de APC na microestrutura do cavaco proveniente do Ensaio 8 ( $v_c$ : 50 m/min e  $f_n$ : 0,1 mm/volta), o mesmo cavaco apresentado na Fig. 39(a). Destaca-se que as formações em “escama” indicadas como “C” e “D” na Fig. 39(a) correspondem, respectivamente, às APC8 e APC9 identificadas na Fig. 46.

Por fim, a microestrutura do Ensaio 12 ( $v_c$ : 50 m/min e  $f_n$ : 0,2 mm/volta) é apresentada na Fig. 47, evidenciando oito fragmentos ao longo da superfície inferior do cavaco. Os fragmentos identificados como APC 7 e APC 8 correspondem às mesmas formações em “escama” indicadas como “E” e “F” na Fig. 40(a).

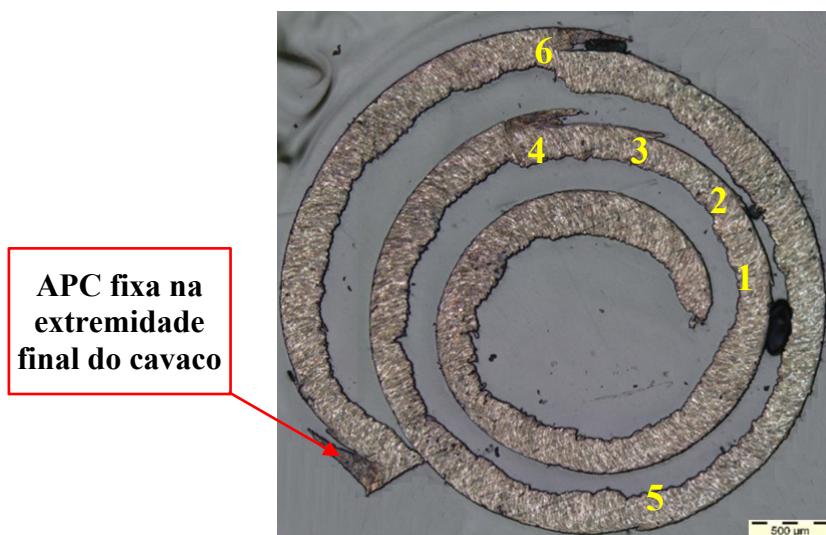


Figura 44 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 3, com seis fragmentos de APC na superfície inferior. Ampliação de 50X.

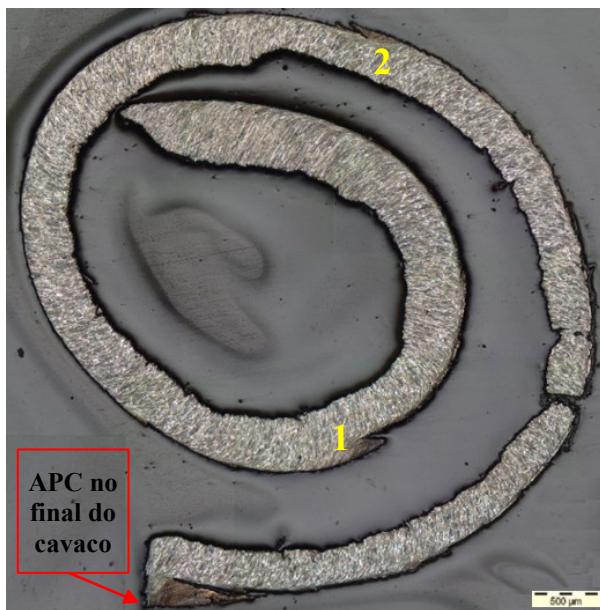


Figura 45 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 5, com dois fragmentos de APC na superfície inferior. Ampliação de 50X.

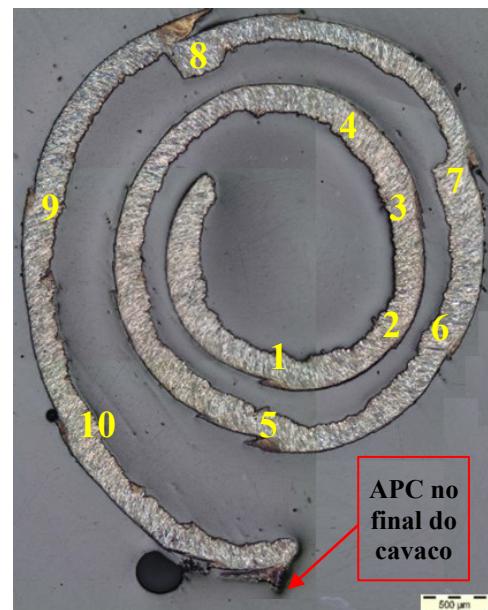


Figura 46 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 8, com dez fragmentos de APC na superfície inferior. Ampliação de 50X.

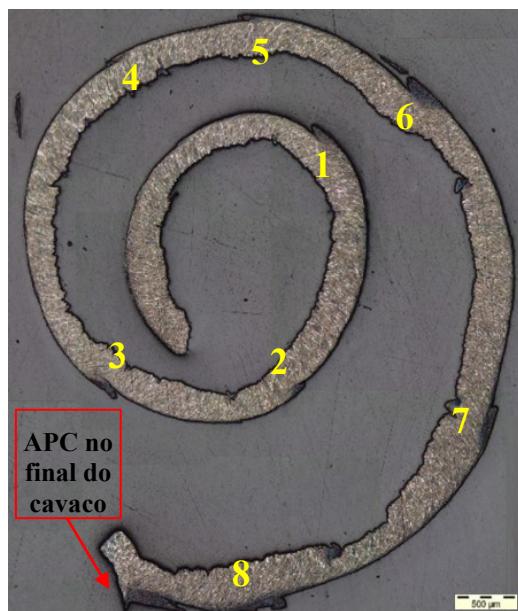


Figura 47 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 12, com oito fragmentos de APC distribuídos na superfície inferior. Ampliação de 50X.

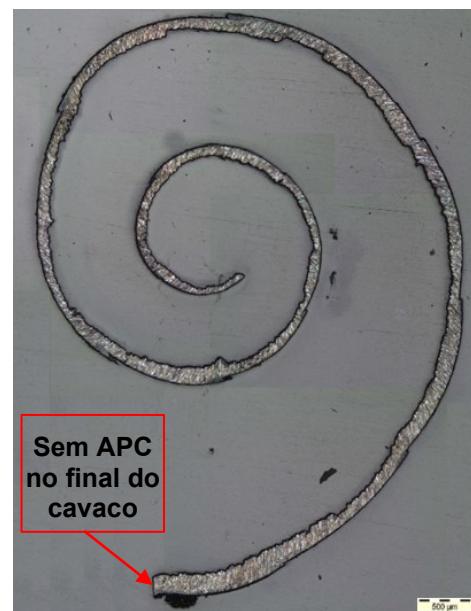


Figura 48 - Microestrutura do cavaco do Ensaio 13, sem presença de fragmentos de APC na superfície inferior ou na extremidade final. Ampliação de 50X.

A microestrutura da seção do cavaco referente ao Ensaio 13, realizado com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,2 mm/volta, é apresentada na Fig. 48. Observa-se que não há presença de APC, nem ao longo da superfície inferior, nem na extremidade final do cavaco. Esse resultado difere do observado nos ensaios representados nas Fig. 44, Fig. 45, Fig. 46 e Fig.

47, os quais apresentaram fragmentos de APC na extremidade final, corroborando as evidências obtidas nas análises macroscópicas.

#### 4.2.1 Ensaio de microdureza

Para as medições de microdureza, foram selecionados quatro cavacos provenientes dos Ensaios 1, 5, 8 e 12, representando diferentes combinações de velocidades de corte e avanços. A Figura 49 fornece os resultados das medições de microdureza, com seus respectivos desvios padrão, realizadas em três regiões distintas: no material em seu estado original de fornecimento pelo fabricante (em azul), no corpo do cavaco (em amarelo) e nos fragmentos das APCs localizadas ao longo dos cavacos (em vermelho).

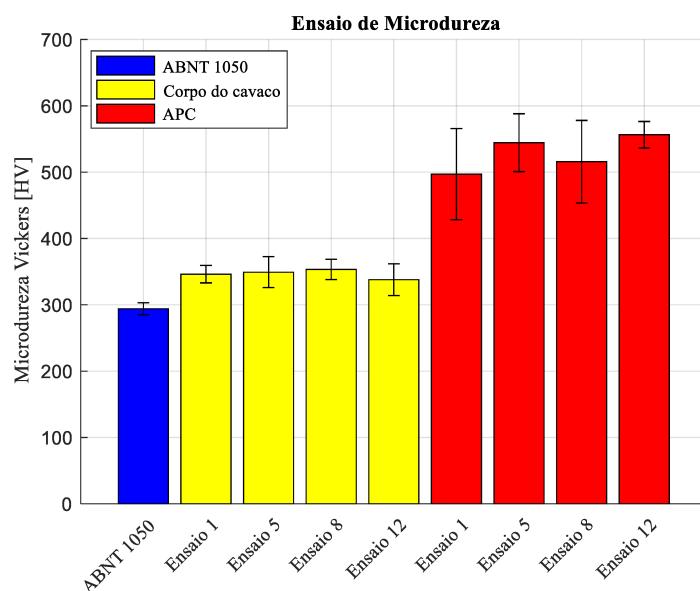


Figura 49 - Gráfico da variação da microdureza no material ABNT 1050 da peça, no corpo do cavaco e na APC

A medição da microdureza, tanto no corpo do material em seu estado original quanto no corpo do cavaco, foi realizada em regiões cuidadosamente selecionadas, compostas por grãos homogêneos de perlita e ferrita. Essa seleção foi necessária devido à tendência de áreas com maior concentração de ferrita apresentarem valores de microdureza significativamente mais baixos.

Com base na média da microdureza do material original ABNT 1050, constatou-se um aumento aproximado de 18% na microdureza média do corpo do cavaco. Já na aresta postiça de corte (APC), o aumento foi de cerca de 80%, confirmando a formação de camadas de

material encruado durante o processo de usinagem. Esses resultados estão em consonância com as observações de Trent (2000), que reportou valores de microdureza entre 600 HV e 650 HV no corpo da APC, atribuídos ao intenso encruamento.

#### 4.2.2 Quantidade, comprimento e posição dos fragmentos de APCs em uma seção

A partir das análises microestruturais, foi realizada a quantificação dos fragmentos de APC observados nas seções dos cavacos obtidos nos Ensaios 1 a 12. A Tab. 2 apresenta a distribuição da quantidade de fragmentos de APC por ensaio, bem como os comprimentos individuais de cada fragmento.

Nesta análise, foram considerados apenas os fragmentos de APC com comprimento superior a aproximadamente 0,1 mm, por se entender que os fragmentos de maior dimensão permitem melhor identificação e correlação entre as posições dos fragmentos e os sinais adquiridos, analisados por meio dos métodos aplicados neste trabalho. A relação entre o número de fragmentos e seus respectivos comprimentos é apresentada na Fig. 50.

Tabela 2 - Quantidade de fragmentos de APCs e seus comprimentos, encontradas em cada ensaio (1 a 12).

Sequência de Ensaios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V <sub>c</sub> [m/min]	30						50					
f <sub>n</sub> [mm/volta]	0,1			0,2			0,1			0,2		
APCs / Ensaio	7	5	6	5	2	7	10	10	12	7	7	8
Fragamentos	Comprimento dos fragmentos das APCs [mm]											
1 <sup>a</sup> APC	0,210	0,292	0,156	0,421	0,399	0,615	0,369	0,238	0,243	0,158	0,317	0,380
2 <sup>a</sup> APC	0,242	0,230	0,157	0,275	0,417	0,474	0,214	0,340	0,710	0,255	0,684	0,245
3 <sup>a</sup> APC	0,373	0,207	0,274	0,535		0,241	0,450	0,194	0,260	0,769	0,295	0,369
4 <sup>a</sup> APC	0,143	0,425	0,486	0,229		0,356	0,328	0,343	0,361	0,311	0,551	0,232
5 <sup>a</sup> APC	0,215	0,243	0,140	0,263		0,202	0,180	0,263	0,238	0,374	0,747	0,307
6 <sup>a</sup> APC	0,234		0,508			0,182	0,180	0,225	0,340	0,255	0,601	0,888
7 <sup>a</sup> APC	0,200					0,923	0,241	0,215	0,270	0,295	0,815	0,529
8 <sup>a</sup> APC							0,256	0,540	0,205			0,630
9 <sup>a</sup> APC							0,238	0,318	0,440			
10 <sup>a</sup> APC							0,258	0,303	0,185			
11 <sup>a</sup> APC								0,204				
12 <sup>a</sup> APC								0,180				

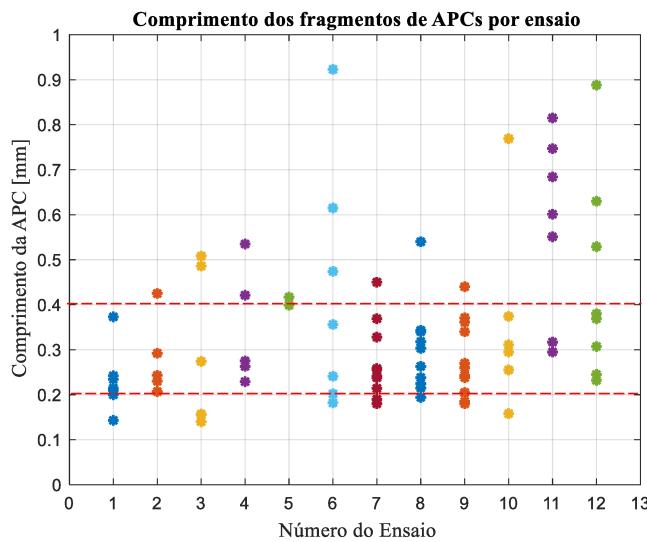


Figura 50 - Distribuição do comprimento dos fragmentos de APCs encontradas em cada ensaio de 1 a 12.

A Figura 50 mostra a seguinte organização dos grupos de ensaio: Ensaios 1 a 3 ( $v_c$ : 30 m/min;  $f_n$ : 0,1 mm/volta), Ensaios 4 a 6 ( $v_c$ : 30 m/min;  $f_n$ : 0,2 mm/volta), Ensaios 7 a 9 ( $v_c$ : 50 m/min;  $f_n$ : 0,1 mm/volta) e Ensaios 10 a 12 ( $v_c$ : 50 m/min;  $f_n$ : 0,2 mm/volta).

Observa-se que os fragmentos de APC com maiores comprimentos foram encontrados nos cavacos obtidos com velocidade de corte de 50 m/min e avanço de 0,2 mm/volta (Ensaios 10, 11 e 12), embora a quantidade total de fragmentos nesses ensaios tenha permanecido próxima da média geral, com cerca de sete APCs por cavaco. Em contrapartida, os ensaios com avanço de 0,1 mm/volta apresentaram quantidades significativamente superior de fragmentos: 30,4% a mais nos ensaios com 30 m/min e 45,4% a mais nos ensaios com 50 m/min. Quando se compararam apenas os ensaios com a mesma velocidade de corte, nota-se que o avanço de 0,2 mm/volta proporcionou um leve aumento no comprimento médio dos fragmentos das APCs, comportamento associado ao aumento da espessura de corte ( $h$ ), quanto maior esse valor, maior a quantidade de material suscetível ao encruamento e, consequentemente, ao acúmulo na ponta da ferramenta.

A Fig. 51 apresenta a distribuição dos fragmentos de APC por faixa de comprimento. Observa-se que a maioria dos fragmentos apresenta comprimentos entre 0,2 mm e 0,4 mm, correspondendo a aproximadamente 62% das ocorrências, destacadas pela maior fatia do gráfico, em laranja. Os intervalos adjacentes a essa faixa, de 0 a 0,2 mm e de 0,4 a 0,6 mm, foram os segundos mais representativos, cada um abrangendo cerca de 14% dos comprimentos

medidos. Esses resultados evidenciam uma tendência de concentração dos comprimentos das APCs na faixa predominante entre 0,2 mm e 0,4 mm, conforme demonstrado na Figura 51.

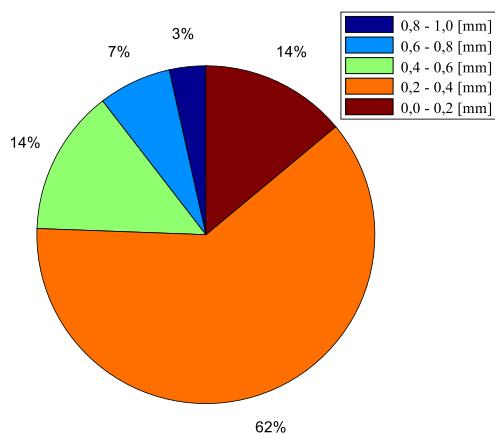


Figura 51 - Concentração dos comprimentos das arestas postiças de corte considerando todos os ensaios de 1 a 12

O posicionamento dos fragmentos de APC foi determinado e utilizado como referência para as análises subsequentes dos sinais, aplicando-se os métodos convencional (nos domínios do tempo e da frequência), Análise de Componentes Principais (PCA) e Transformada Contínua de Wavelet (CWT). A determinação do posicionamento foi realizada de forma temporal, considerando o instante em que cada fragmento passou pela aresta de corte, uma vez que o início e o término do corte foram definidos com base no sinal do *trigger* registrado durante a aquisição dos dados.

As imagens microestruturais dos cavacos foram processadas no *software* SolidWorks 2018, que permitiu a interpolação de pontos ao longo da superfície inferior (lisa) do cavaco, possibilitando identificar com precisão as posições dos fragmentos de APC por meio do rastreamento desde o início do corte até a extremidade final do cavaco. Dessa forma, assegurou-se que toda a superfície inferior do cavaco esteve em contato contínuo com a aresta de corte durante o intervalo correspondente ao registro experimental.

Com base na posição dos fragmentos de APC ao longo da superfície inferior, foi possível converter essas localizações em instantes temporais, correspondentes ao momento em que cada fragmento ficou aderido ao cavaco. Na Tab. 3 são apresentados os tempos totais de corte referentes aos Ensaios 1 a 12, bem como os respectivos instantes iniciais em que cada APC foi fixada ao cavaco.

Tabela 3 - Tempo total de usinagem e instantes iniciais dos fragmentos das APCs referentes aos ensaios 1 ao 12

Sequência de Ensaios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V <sub>c</sub> [m/min]	30						50					
f <sub>n</sub> [mm/volta]	0,1			0,2			0,1			0,2		
Tempo total [ms]	83,1	82,1	84,0	95,8	96,1	93,5	51,4	51,7	51,0	51,3	52,3	51,2
Fragments	Instante inicial dos fragmentos das APCs [ms]											
1 <sup>a</sup> APC	14,4	13,3	24,2	16,1	23,0	12,7	3,5	4,7	3,6	5,0	4,7	8,3
2 <sup>a</sup> APC	23,0	23,5	26,3	27,4	58,6	21,7	9,4	9,7	4,8	6,2	9,3	14,5
3 <sup>a</sup> APC	36,5	41,3	29,0	49,7		28,6	17,8	12,1	6,9	19,7	24,5	18,8
4 <sup>a</sup> APC	48,7	56,0	31,2	74,9		32,5	22,1	23,0	9,2	26,6	27,5	27,3
5 <sup>a</sup> APC	69,8	75,7	49,4	79,6		38,6	31,0	27,4	14,5	40,4	33,8	30,2
6 <sup>a</sup> APC	73,1		65,8			41,7	35,0	31,1	15,6	45,4	41,4	33,0
7 <sup>a</sup> APC	80,7					66,3	37,0	35,6	18,7	48,4	46,2	41,5
8 <sup>a</sup> APC							40,9	37,1	22,7			47,9
9 <sup>a</sup> APC							43,0	42,1	28,6			
10 <sup>a</sup> APC							46,3	46,4	34,2			
11 <sup>a</sup> APC								39,4				
12 <sup>a</sup> APC								47,9				

### 4.3 Análise por componentes principais (PCA)

Considerando que as posições dos fragmentos das APCs ao longo do cavaco foram previamente identificadas e que os sinais provenientes dos diferentes sensores foram adquiridos de forma simultânea, a aplicação da PCA teve como objetivo investigar possíveis tendências, padrões ou variações no espaço das componentes principais associadas aos momentos em que fragmentos de APC se desprendem da região de corte durante o processo de usinagem. Buscou-se realizar uma comparação entre os sinais adquiridos nas mesmas direções (eixos Y e Z), além da PS, em diferentes ensaios, contemplando tanto os casos em que foram identificados fragmentos de APC nas seções longitudinais dos cavacos quanto aqueles em que tais fragmentos não foram observados.

Assim, a PCA foi aplicada a conjuntos de variáveis formados pelos sinais no domínio do tempo registrados pelos acelerômetros nas direções Y e Z, bem como pelo microfone que captou a PS. Inicialmente, a análise foi realizada de forma individual para cada ensaio. Cada ponto do vetor de uma variável foi tratado como um objeto da PCA, e os comprimentos das APCs identificadas nas seções longitudinais dos cavacos foram utilizados para delimitar subconjuntos específicos desses objetos.

Nos sinais obtidos em um mesmo ensaio, a aplicação da PCA teve como objetivo verificar se os subconjuntos correspondentes aos comprimentos dos fragmentos de APC apresentavam tendências significativas em relação às demais regiões dos sinais, nas quais não foram identificados fragmentos na seção analisada. Os resultados das projeções dos dados originais no espaço das componentes principais (*scores*), relacionando as três primeiras componentes principais (CP1, CP2 e CP3), e as respectivas contribuições das variáveis originais para cada componente principal (*loadings*) são apresentados nas Figuras 52 a 63, referentes aos Ensaios 1 e 9.

Os valores dos *scores* normalizados não apresentaram características capazes de distinguir os subconjuntos de dados (objetos) correspondentes aos comprimentos dos fragmentos de APC. As projeções ficaram concentradas em torno da origem (zero), tanto no eixo das abscissas quanto no das ordenadas, sem formação de agrupamentos evidentes ou padrões relevantes. As representações dos *loadings*, apresentadas à direita de cada gráfico de *scores*, indicam que a variável com maior valor absoluto é a que mais contribui para a formação da componente principal, enquanto aquela com menor valor absoluto tem a menor contribuição. O sinal desses coeficientes revela se a contribuição da variável na formação da componente principal é positiva ou negativa.

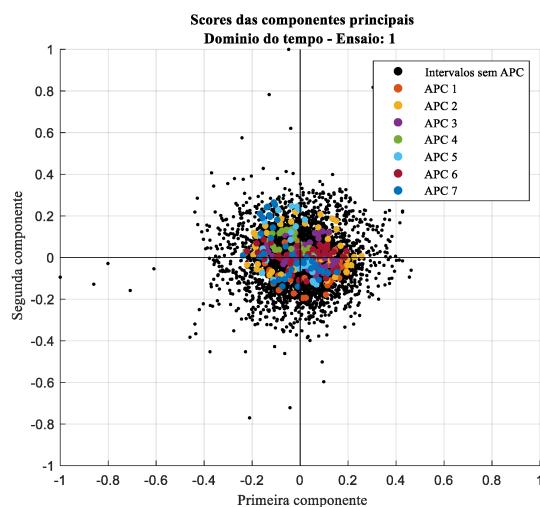


Figura 52 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo - Ensaio 1

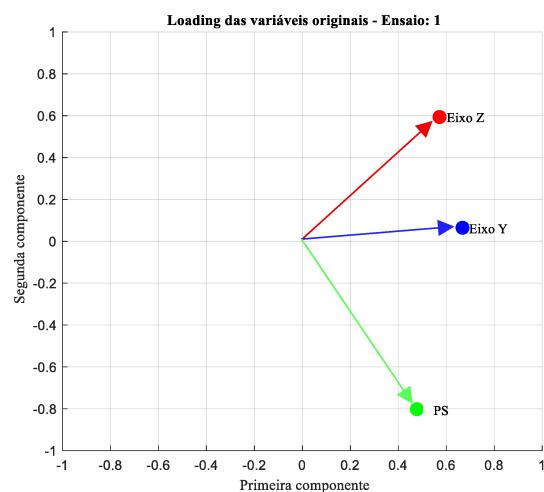


Figura 53 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 1

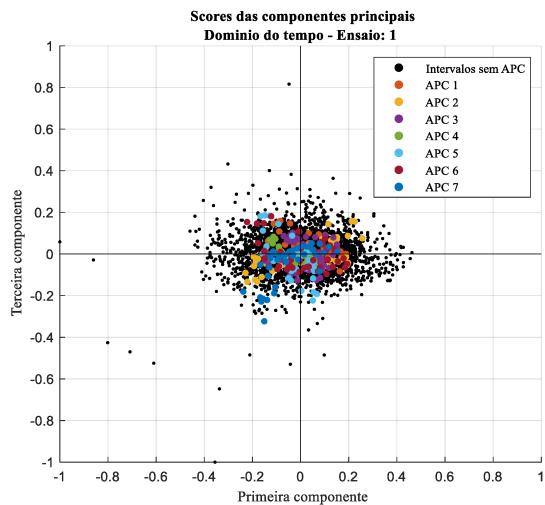


Figura 54 - Scores das CP1 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 1

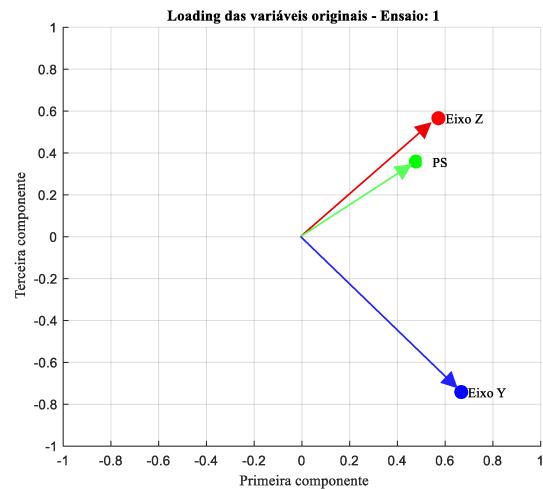


Figura 55 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP3 – Domínio do tempo - Ensaio 1

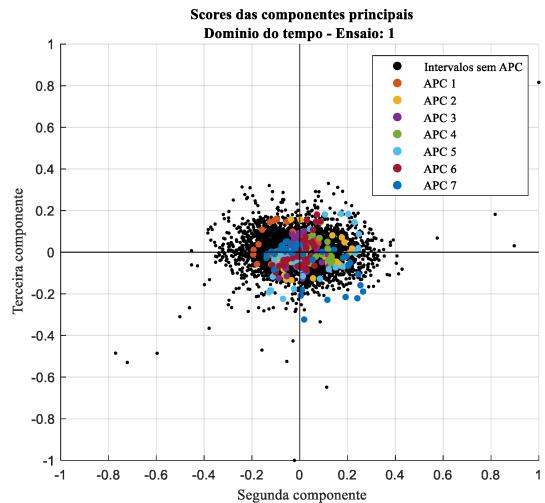


Figura 56 - Scores das CP2 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 1

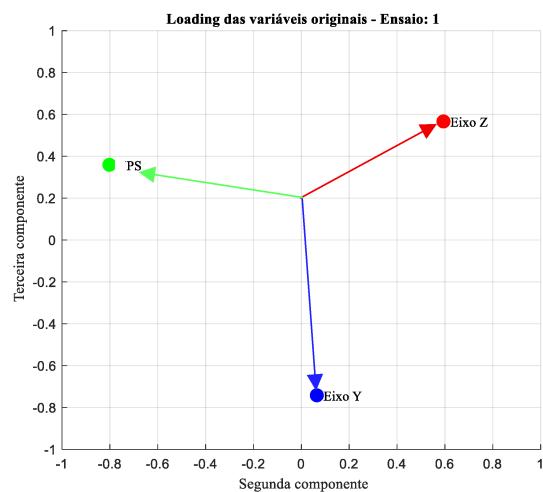


Figura 57 - Contribuição de cada variável original para as CP2 e CP3 – Domínio do tempo - Ensaio 1

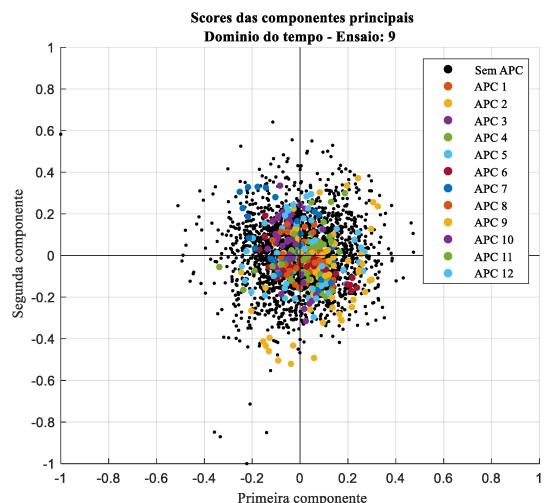


Figura 58 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo - Ensaio 9

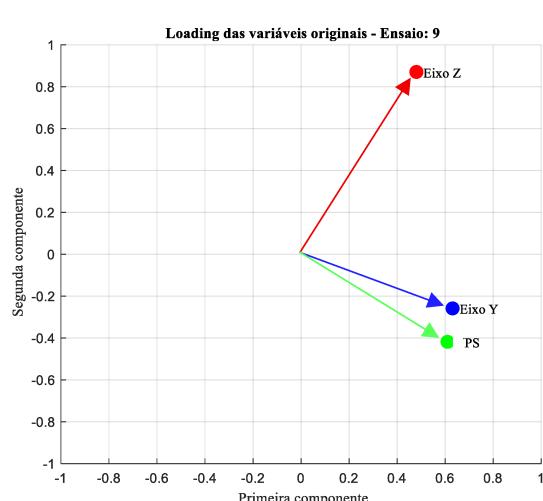


Figura 59 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 9

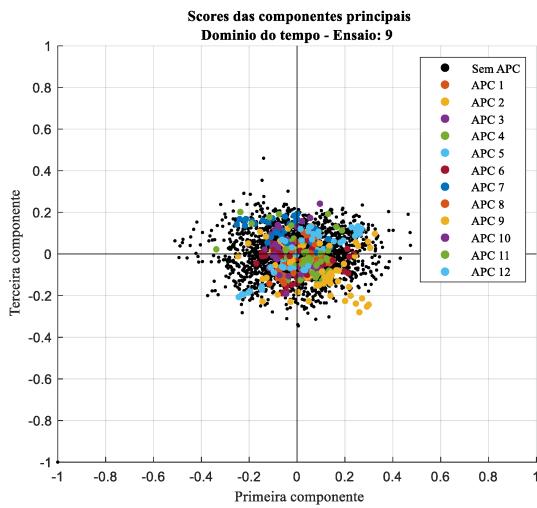


Figura 60 - Scores das CP1 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 9

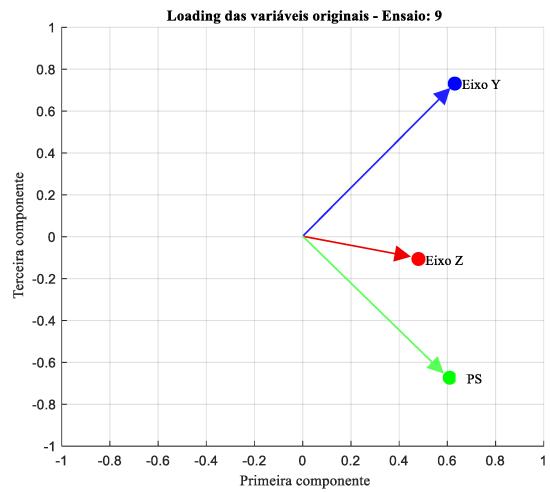


Figura 61 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 9

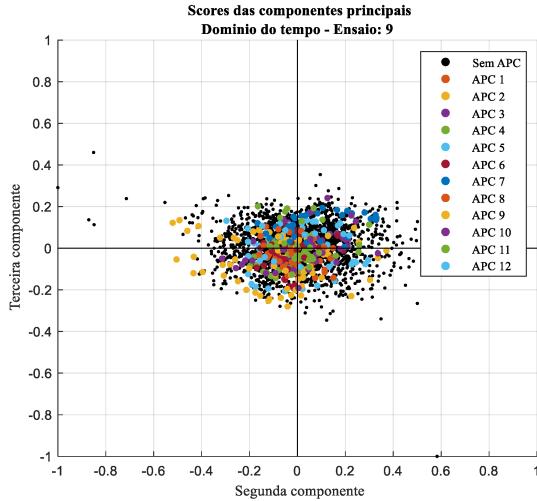


Figura 62 - Scores das CP2 x CP3 no domínio do tempo - Ensaio 9

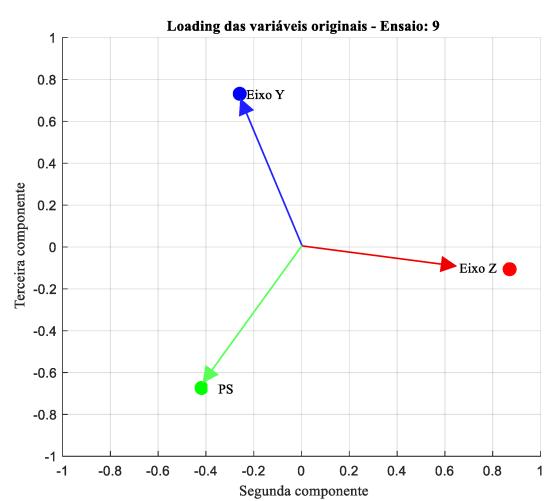


Figura 63 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 9

Para fins de comparação, os resultados da PCA aplicada ao Ensaio 14, realizado com velocidade de corte de 100 m/min, são apresentados nas Fig. 64 e 65, nas quais não foram identificados fragmentos de APC na microestrutura da seção longitudinal do cavaco. Considerando que, na maioria dos casos, as duas primeiras componentes principais concentram a maior parcela da variância explicada, a partir deste ponto a análise será focada na projeção da primeira componente (CP1) em relação à segunda (CP2). Observa-se que, nesse ensaio, os scores das componentes principais apresentaram uma distribuição semelhante àquela observada nos Ensaios 1 e 9. Apesar de uma dispersão ligeiramente maior, a maioria dos dados manteve-se concentrada nas proximidades da origem.

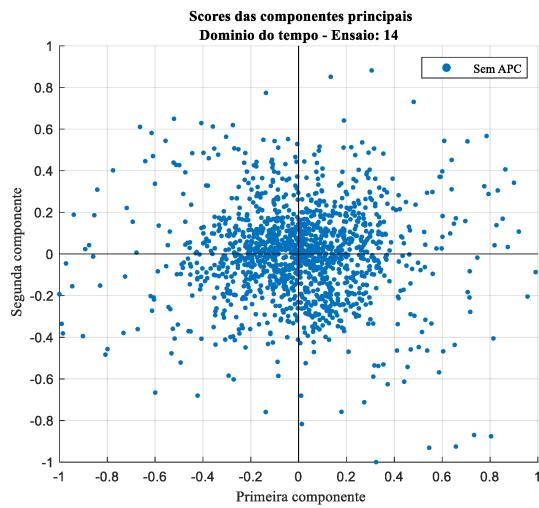


Figura 64 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo - Ensaio 14

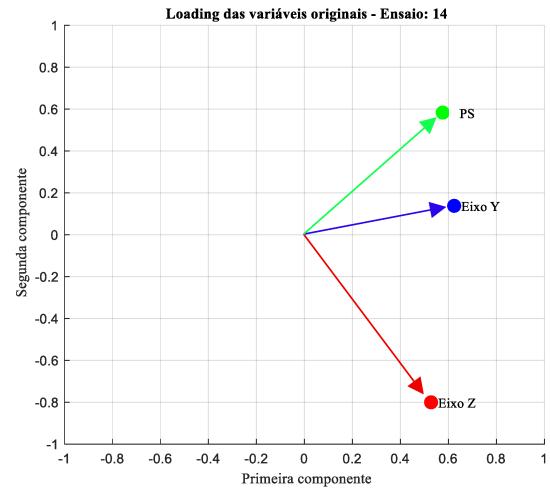


Figura 65 - Contribuição de cada variável original para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo - Ensaio 14

Para a análise da PCA no domínio da frequência, foram utilizados os mesmos dados dos Ensaios 1, 9 e 14, utilizados anteriormente. Nessa análise, as posições dos fragmentos das APCs foram desconsideradas, uma vez que não seria possível associar as frequências específicas aos trechos do sinal correspondentes às posições dos fragmentos das APCs. Os scores e seus respectivos *loadings*, obtidos a partir dos dados no domínio da frequência dos sinais de aceleração nos eixos Y e Z, bem como do sinal de pressão sonora (PS), são apresentados nas Fig. 66 a 71, correspondentes aos ensaios mencionados.

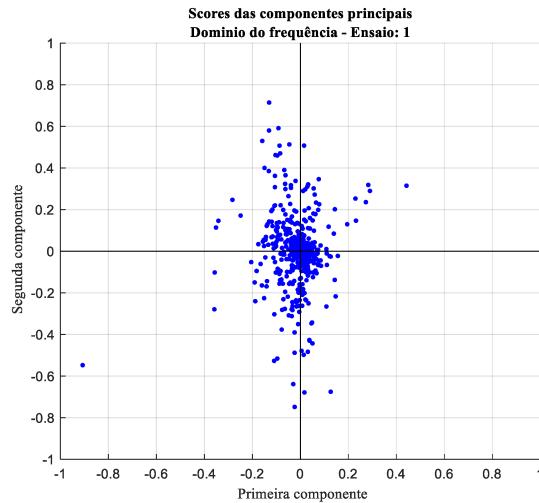


Figura 66 - Scores das CP1 x CP2 no domínio da frequência - Ensaio 1 – Eixo Y

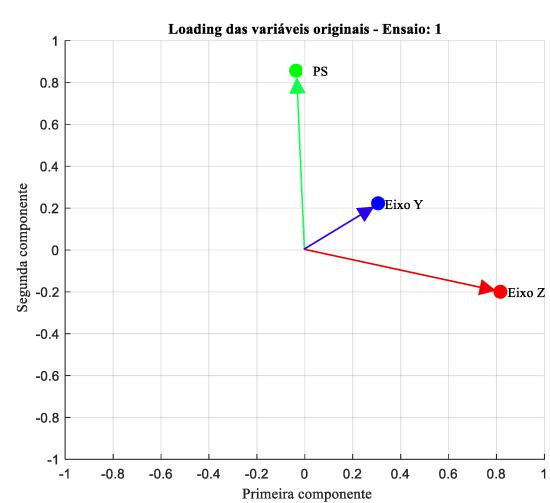


Figura 67 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio da frequência - Ensaio 1

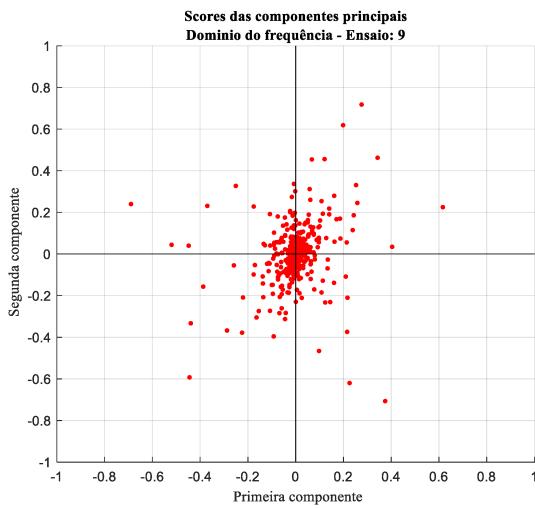


Figura 68 - Scores das CP1 x CP2 no domínio da frequência - Ensaio 9 – Eixo Z

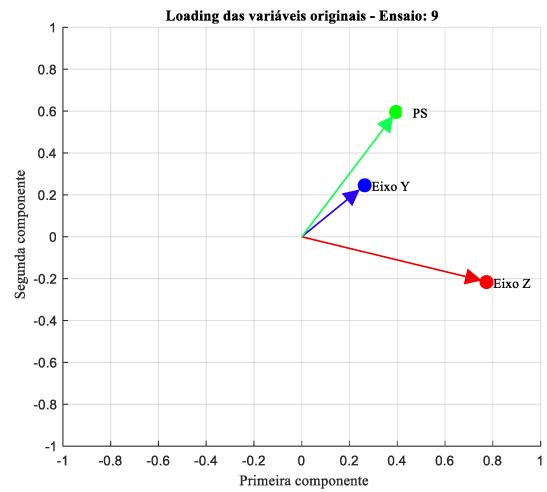


Figura 69 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio da frequência - Ensaio 9

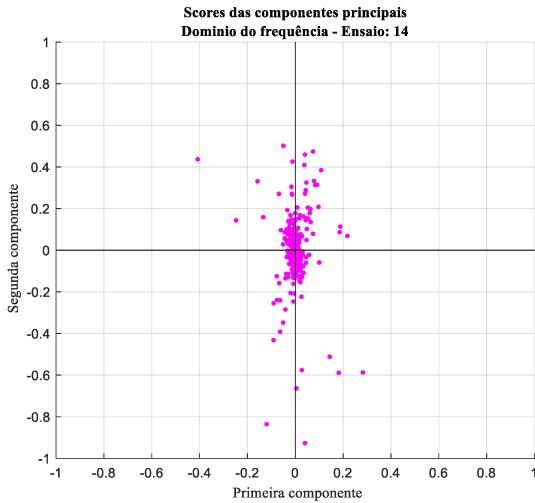


Figura 70 - Scores das CP1 x CP2 no domínio da frequência - Ensaio 14 - PS

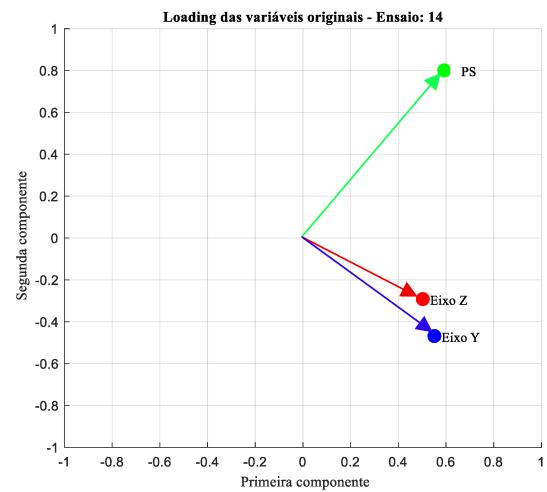


Figura 71 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio da frequência - Ensaio 14

Embora as Fig. 66 e Fig. 68 apresentem maior dispersão dos *scores* no espaço das componentes principais para os ensaios com presença de fragmentos de APC, quando comparadas à dispersão observada na Fig. 70 referente ao Ensaio 14, no qual não houve identificação de fragmentos, a análise demonstrou que a simples consideração da dispersão dos *scores* não constitui um critério confiável para indicar a presença de APCs durante o corte ortogonal, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

Com o objetivo de ampliar a análise, foi utilizada uma nova configuração de variáveis, na qual se considerou um único eixo por vez, combinando dados provenientes de diferentes ensaios. Para viabilizar essa abordagem, foi necessário garantir que todos os vetores de dados

possuíssem o mesmo número de objetos (amostras), o que exigiu a aplicação de técnicas de interpolação e decimação. Essa etapa foi essencial, visto que velocidades de corte mais elevadas resultam em menor número de amostras adquiridas durante a usinagem.

Os resultados da PCA aplicados a essas combinações, considerando separadamente os sinais dos eixos Z, Y e da PS, oriundos dos Ensaios 1, 9 e 14, são apresentados nas Fig. 72 a 77. A comparação entre a primeira e a segunda componente principal dessas combinações não revelou evidências que permitam identificar, com base nessa configuração, a presença de fragmentos de APCs no processo de corte ortogonal. Os gráficos de *scores* (Fig. 72, Fig. 74 e Fig. 76) exibem dispersões significativas, porém sem formação de padrões ou agrupamentos que permitissem associar essas variações à presença ou ausência de fragmentos de APC.

A análise dos *loadings* dessas novas configurações possibilitou apenas identificar a contribuição relativa de cada ensaio para a formação das componentes principais. Considerando a primeira componente, o Ensaio 14 no qual não foram encontrados fragmentos de APC, foi o que mais contribuiu positivamente para os sinais dos eixos Z, Y e PS. Já na segunda componente principal, o Ensaio 9 apresentou a maior contribuição positiva para o Eixo Z. Para o Eixo Y e a PS, o Ensaio 1 foi o que mais contribuiu para a formação da segunda componente, de forma positiva e negativa, respectivamente.

Por fim, a aplicação da PCA aos conjuntos de dados no domínio do tempo e da frequência, tanto considerando os sinais individualmente (eixos Y, Z e PS) por ensaio quanto em agrupamentos entre ensaios (Ensaios 1, 9 e 14), não se mostrou eficaz para a identificação da presença de fragmentos de APCs durante o corte ortogonal. Embora a PCA seja um método robusto para análise de variância e covariância entre variáveis, os dados analisados nesta etapa apresentaram forte concentração em torno da origem, sem variações significativas que pudessem ser associadas à formação de APCs. Isso sugere que, para os sinais utilizados e o elevado número de objetos avaliados, a PCA não foi sensível o suficiente para capturar a influência da presença de APCs, mesmo após diversas tentativas de combinação de dados e reformulação das variáveis analisadas. Destaca-se, ainda, que os ensaios incluídos nesta etapa foram selecionados de forma aleatória, e que outras combinações, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, também foram avaliadas, resultando em comportamentos semelhantes aos aqui apresentados.

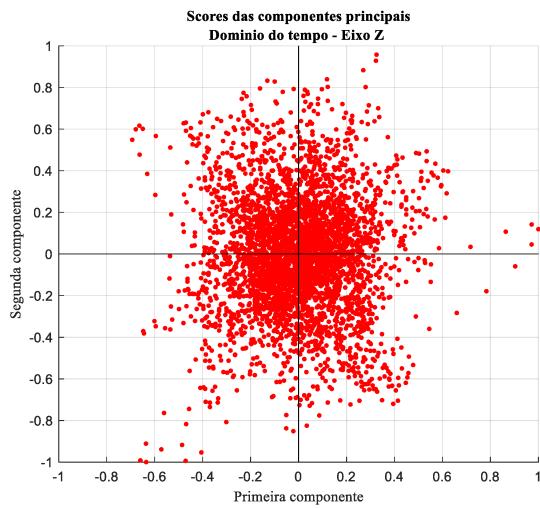


Figura 72 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo – Eixo Z

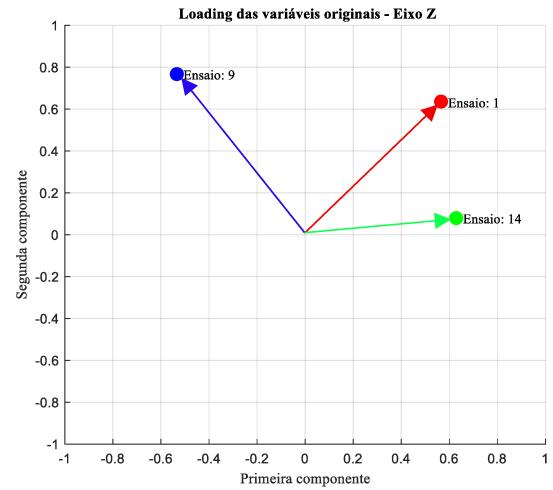


Figura 73 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo – Eixo Z

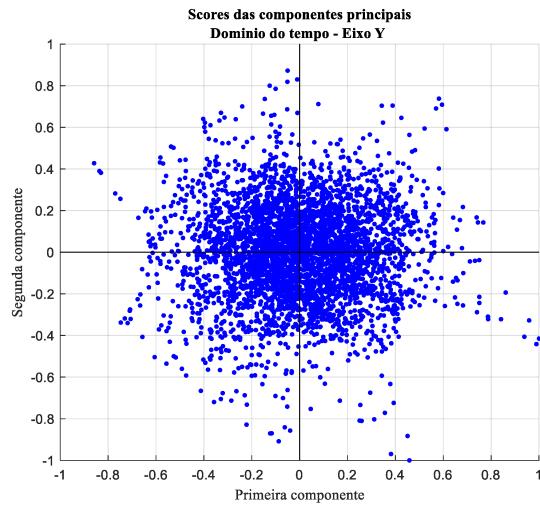


Figura 74 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo – Eixo Y

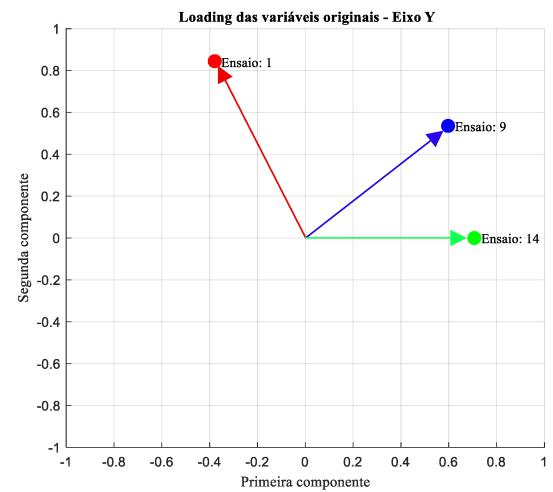


Figura 75 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo – Eixo Y

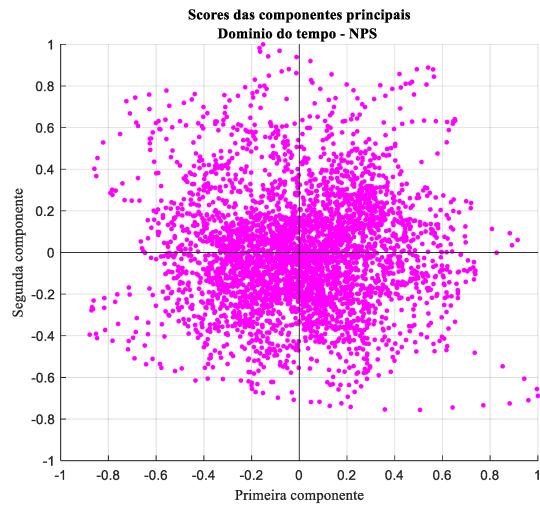


Figura 76 - Scores das CP1 x CP2 no domínio do tempo – PS

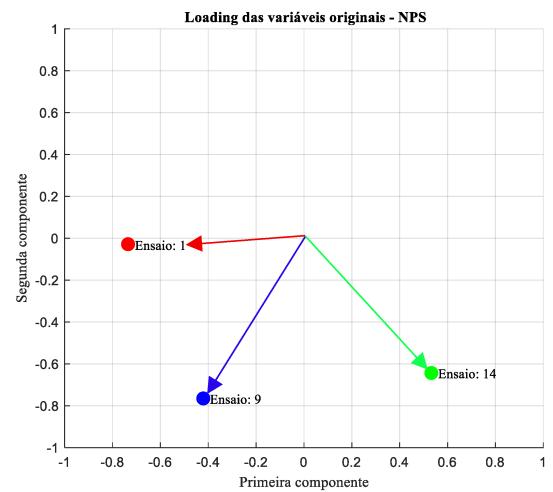


Figura 77 - Contribuição de cada variável para as CP1 e CP2 – Domínio do tempo – PS

#### 4.4 Teste de impacto na ferramenta com suporte fixo na máquina

Na análise modal realizada por meio de impactos aplicados sobre a aresta de corte nas direções Y e Z, conforme descrito no capítulo de Metodologia, foi possível identificar as primeiras frequências naturais do sistema nesses eixos. A Função de Resposta em Frequência (FRF), acompanhada da coerência (gráfico superior) e do ângulo de fase (gráfico inferior), é apresentada na Fig. 78, no gráfico central.

Observando os picos da FRF, verifica-se que os valores de coerência nesses pontos são elevados, iguais ou muito próximos de 1, indicando boa correlação entre o sinal de excitação e a resposta obtida. Além disso, o ângulo de fase apresenta variações próximas de  $90^\circ$  nas regiões de ressonância, conforme esperado em respostas modais. Com base nesses critérios, foram identificadas duas frequências naturais na direção Y, com picos em 1840 Hz e 6660 Hz (Fig. 78), respectivamente. Já na direção Z (direção de corte), foi identificado um pico correspondente a uma frequência natural de 2780 Hz (Fig. 78), variável de grande relevância para o desenvolvimento deste trabalho, por sua influência direta sobre os sinais de vibração captados durante a usinagem.

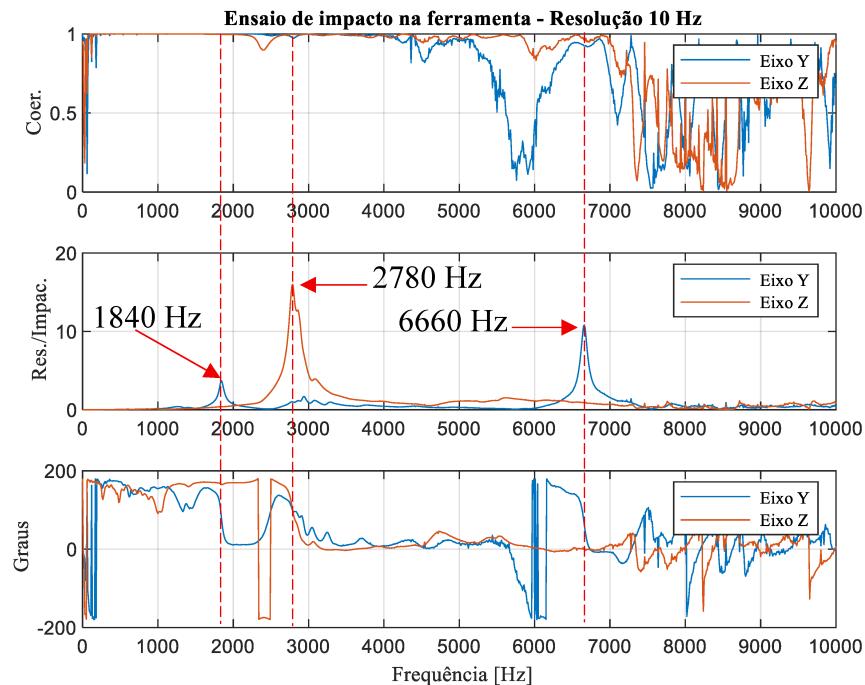


Figura 78 - FRF do ensaio de impacto na montagem da ferramenta e seu suporte, com balanço de 40 mm.

#### 4.5 Análise no domínio do tempo e frequência

Os sinais obtidos nas direções Y, Z e da PS para os Ensaios 2, 6, 8 e 13, juntamente com as posições dos fragmentos de APC identificados em uma seção do cavaco e sinalizadas por linhas verticais pretas, são apresentados nas Fig. 79, 80, 81 e 82. Esses ensaios foram realizados com diferentes combinações de velocidade de corte e avanço. Observa-se que, na direção Y, as amplitudes dos sinais são significativamente menores em comparação à direção Z, o que se explica pelo fato de o corte ortogonal ocorrer nesta última direção.

No Ensaio 13, ilustrado na Fig. 83, não foram identificados fragmentos de APC na microestrutura da seção longitudinal do cavaco, conforme previamente evidenciado na Fig. 48. Ao comparar os sinais no domínio do tempo, verifica-se que os ensaios com presença de fragmentos de APC apresentam perturbações mais pronunciadas na direção Z, comportamento que não se repete na direção Y, mesmo quando há fragmentos de APCs presentes. No Ensaio 13, tanto as direções Y quanto Z apresentam sinais mais estáveis, com menores perturbações. Já os sinais de PS mantêm um padrão semelhante entre todos os ensaios, sem variações significativas relacionadas à presença ou ausência de APC nas análises no domínio do tempo.

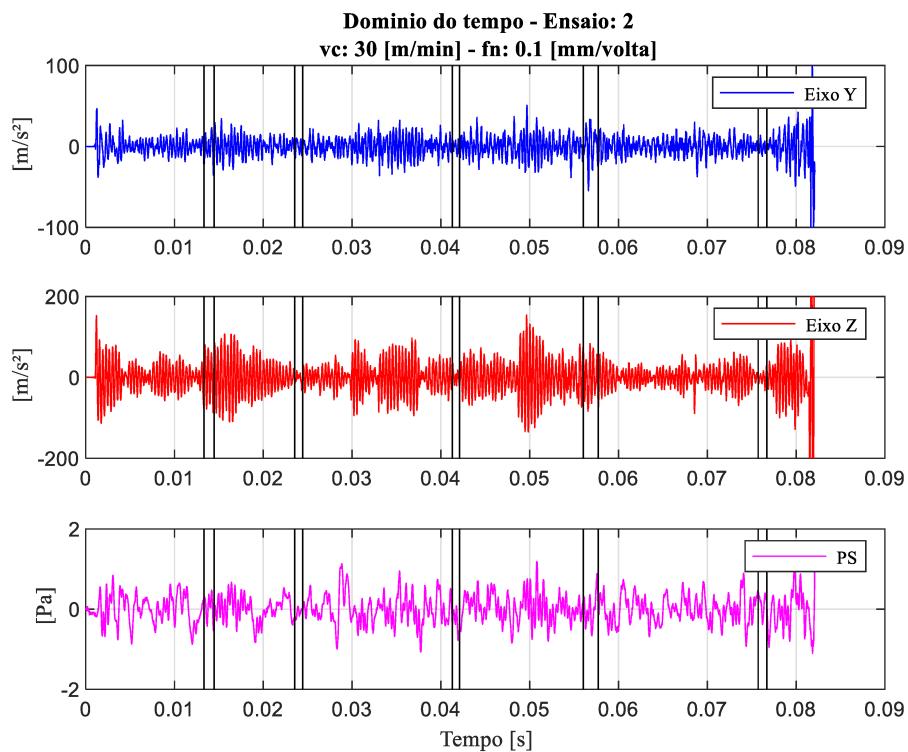


Figura 79 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 2, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC.

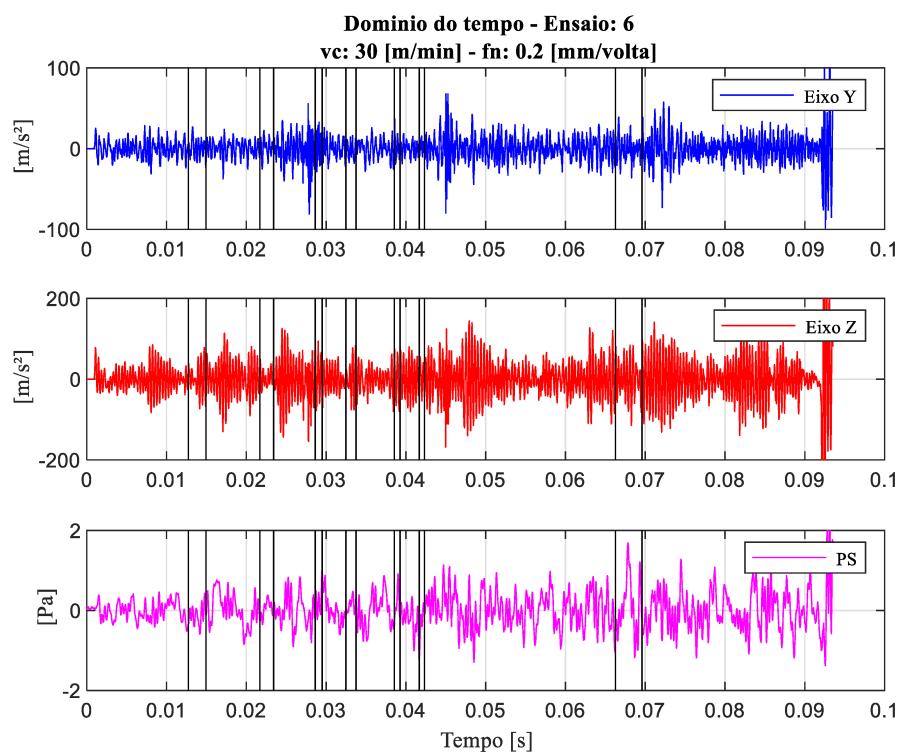


Figura 80 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 6, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC.

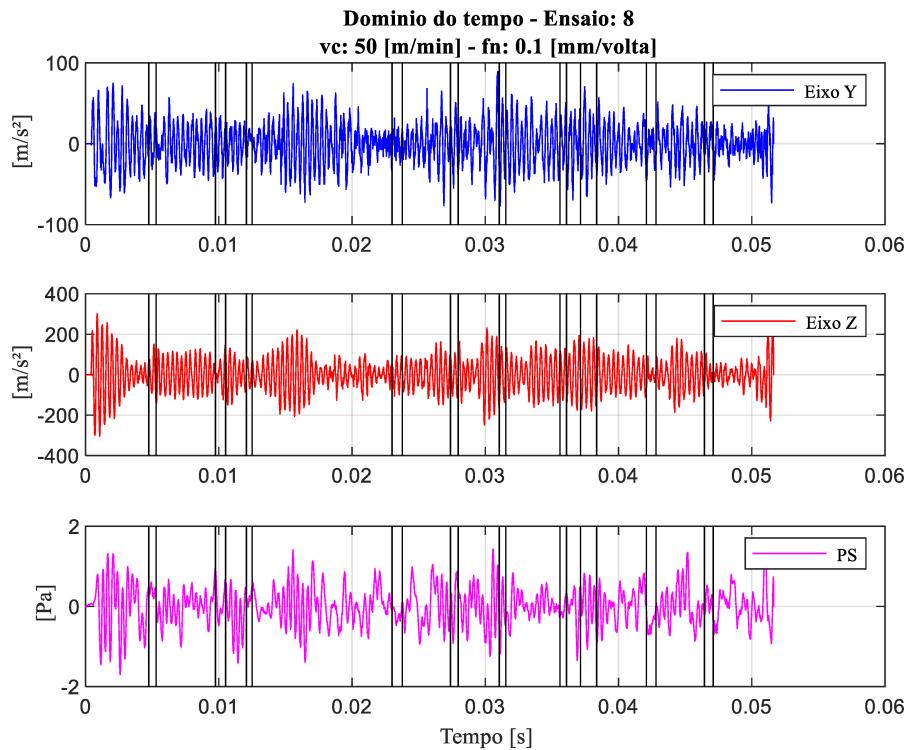


Figura 81 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 2, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC.

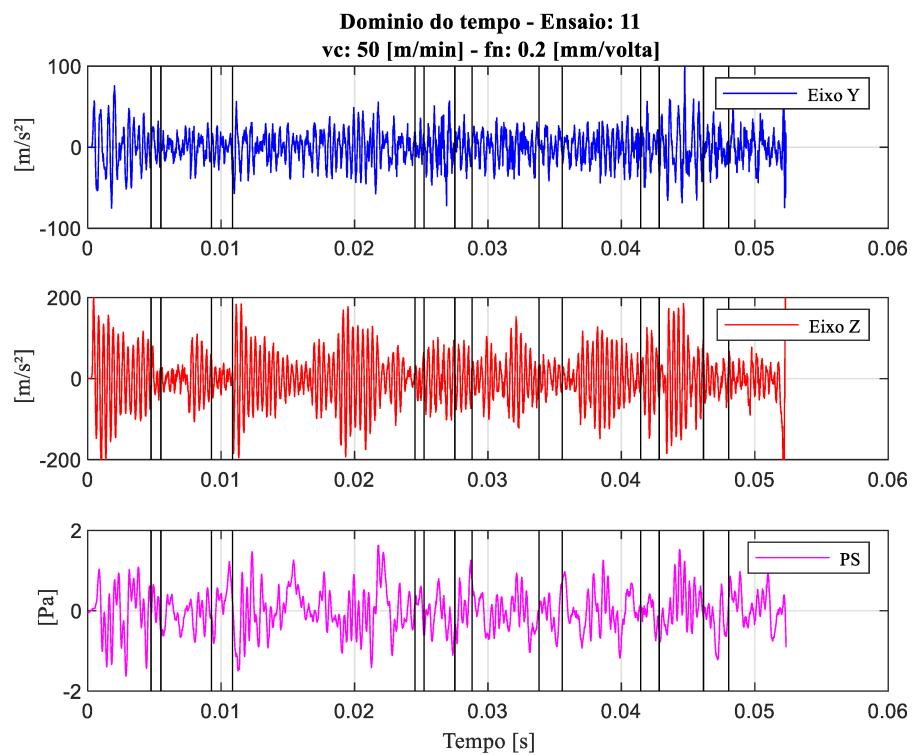


Figura 82 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 11, indicando as posições temporais dos fragmentos de APC.

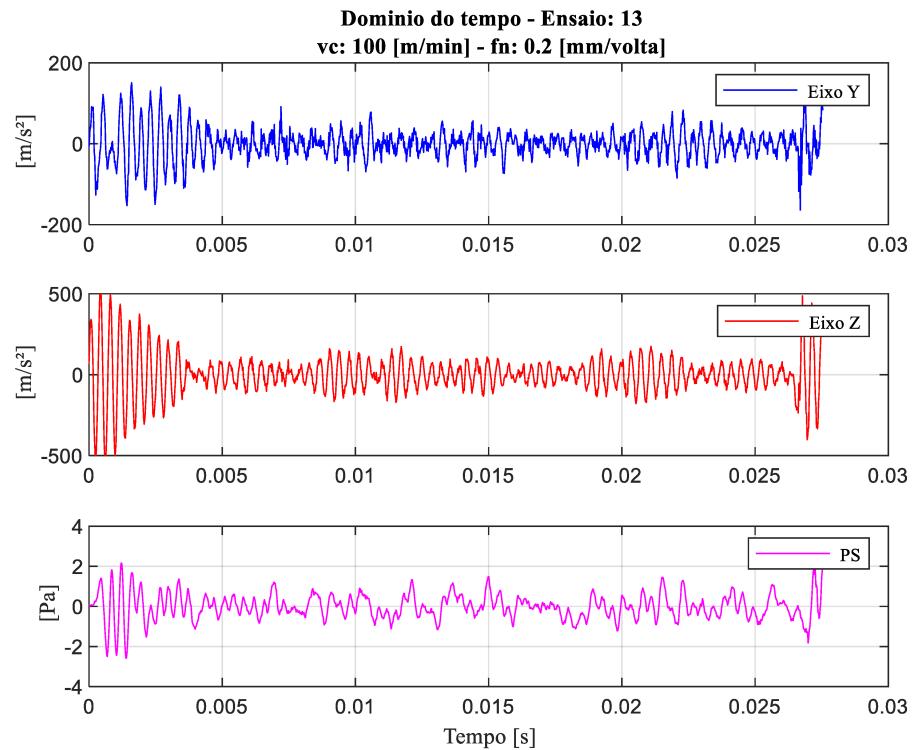


Figura 83 - Resultado no domínio do tempo para os sinais dos eixos Y e Z, além do sinal de PS do Ensaio 13.

A FFT foi aplicada aos sinais adquiridos no domínio do tempo, com o objetivo de convertê-los para o domínio da frequência. Os espectros correspondentes aos Ensaios 1 a 15 são representados nas Fig. 84, Fig. 85 e Fig. 86, referentes às direções Y, Z e ao sinal de PS, respectivamente. Observa-se que, independentemente da direção de aquisição, há predominância de componentes espectrais próximas à frequência natural identificada na direção Z (2780 Hz), Fig. 84. No espectro da direção Y, Fig. 85, observa-se adicionalmente um pico em torno de 1840 Hz, associado à frequência natural característica desse eixo e ao seu modo específico de vibração. Esses resultados indicam que as faixas de frequência com maior amplitude estão fortemente relacionadas às frequências naturais do sistema, tanto nas direções Z quanto Y. Ressalta-se, ainda, que o espectro de frequência do sinal de PS, Fig. 86, embora apresente diversos picos nas faixas iniciais, evidencia uma componente significativa próxima à frequência natural observada na direção Z.

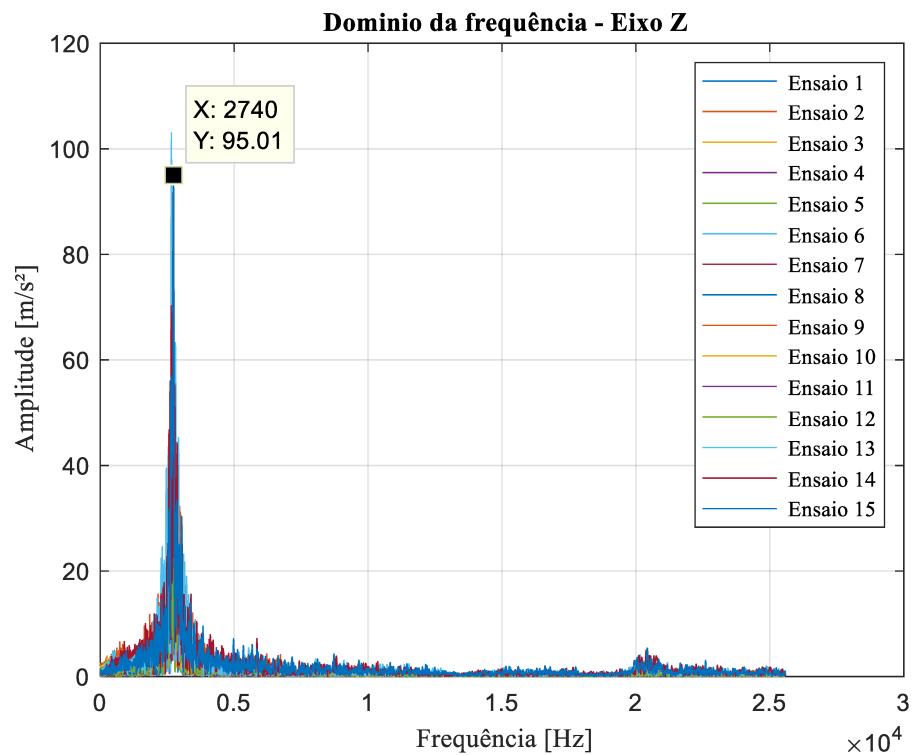


Figura 84 - Espectros obtidos a partir dos sinais adquiridos na direção do eixo Z - Ensaios 1 a 15.

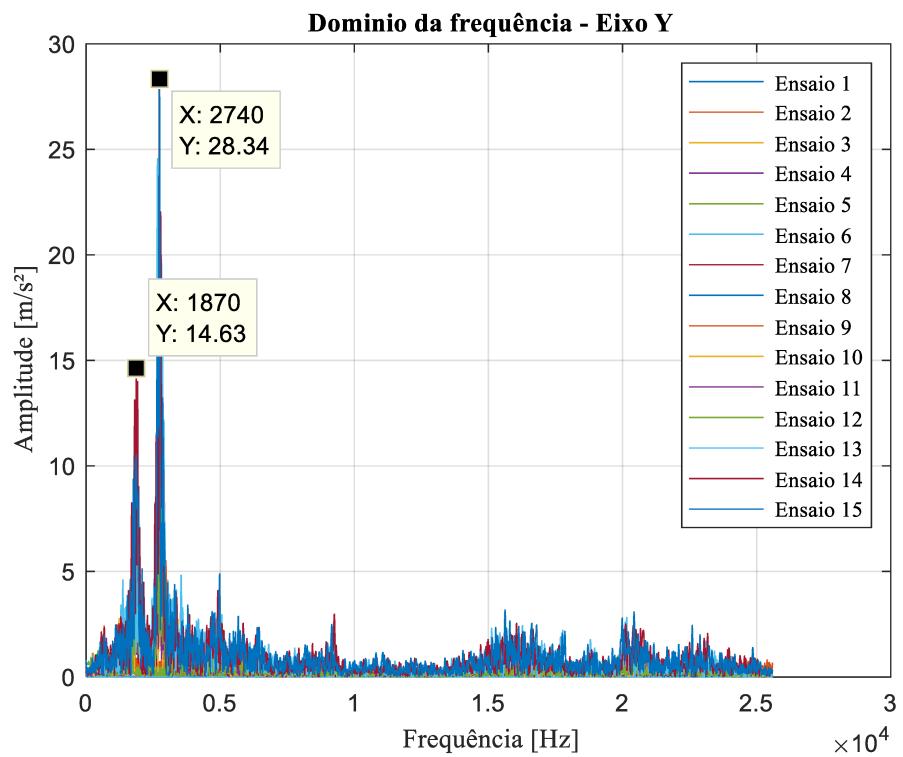


Figura 85 - Espectros obtidos a partir dos sinais adquiridos na direção do eixo Y - Ensaios 1 a 15.

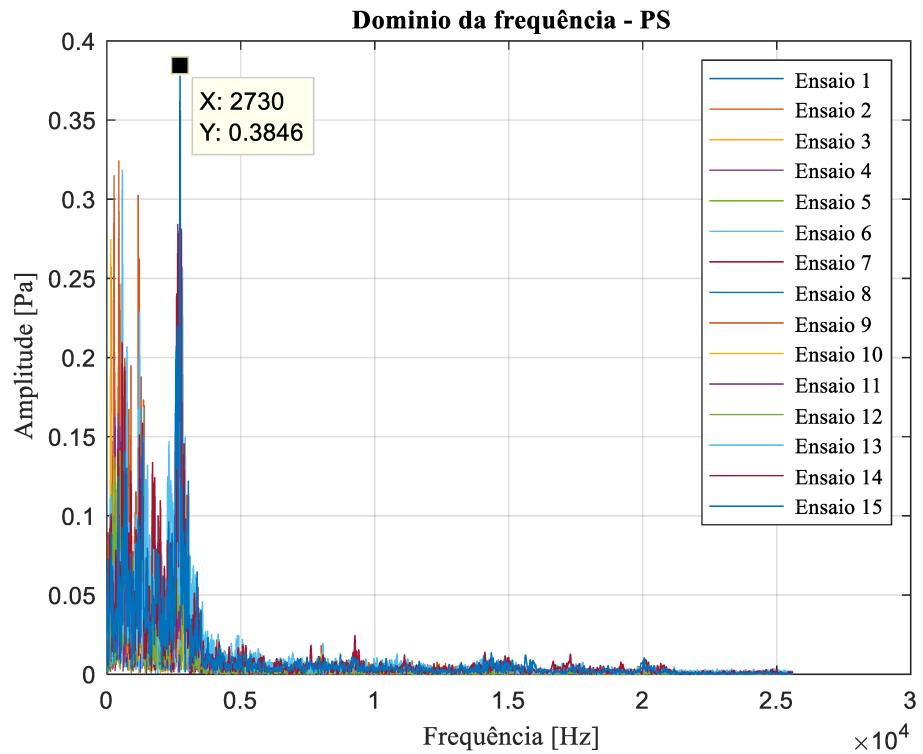


Figura 86 - Espectros obtidos a partir dos sinais de PS referentes aos Ensaios 1 a 15.

Para facilitar a interpretação dos espectros, os dados foram organizados em sequência, permitindo uma visualização mais clara dos picos concentrados nas proximidades de 2780 Hz. As Fig. 87, Fig. 88 e Fig. 89 evidenciam essa tendência nos espectros nas direções Y, Z e na PS, respectivamente. Para os sinais de aceleração nas direções Y (Fig. 87) e Z (Fig. 88), observa-se um aumento gradual na amplitude das componentes espectrais à medida que a velocidade de corte é elevada, comportamento consistente ao longo dos Ensaios 1 a 15. Em contrapartida, o espectro de PS (Fig. 89) não apresenta variações expressivas de amplitude em função da velocidade de corte, embora os picos em torno de 2780 Hz também estejam presentes.

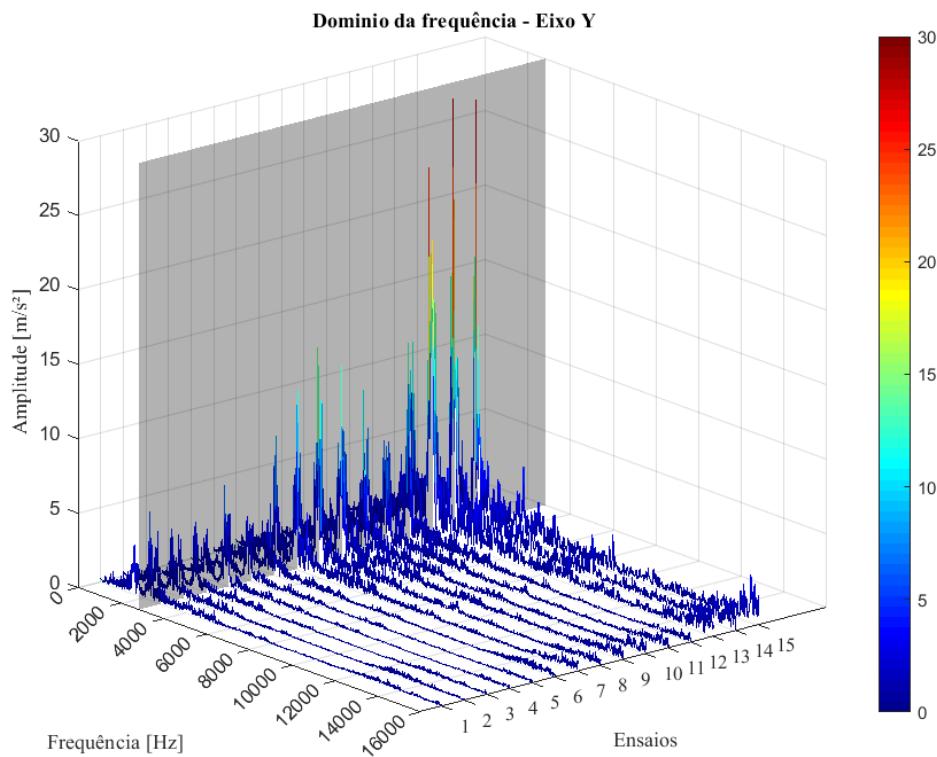


Figura 87 - Representação dos espectros em cascata na direção Y - Ensaios 1 a 15.

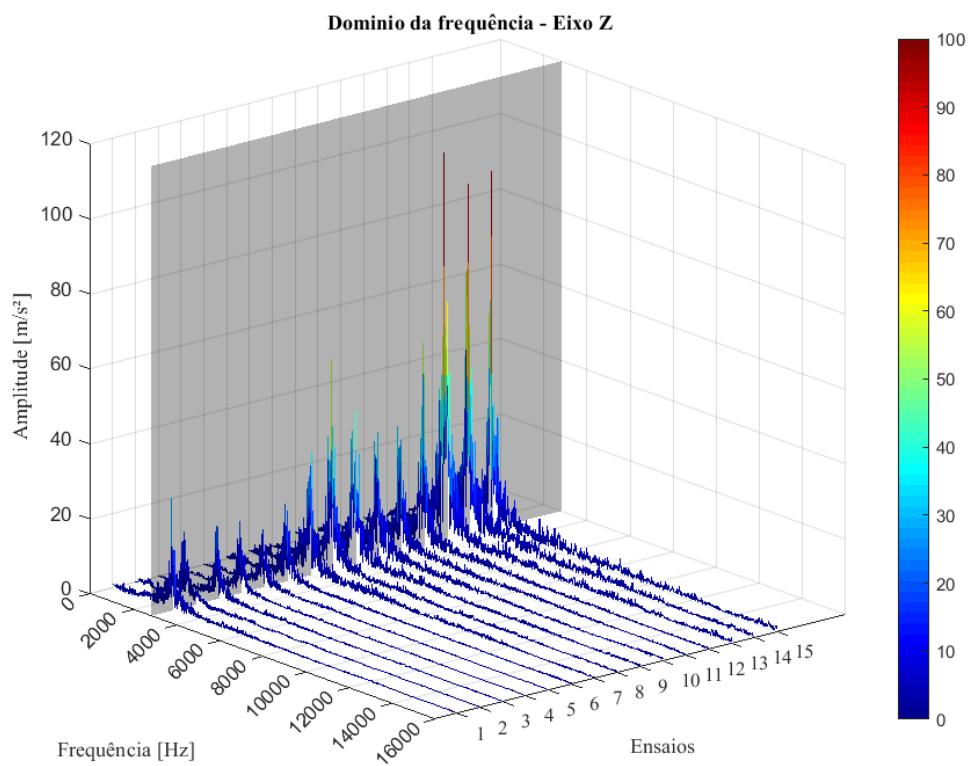


Figura 88 - Representação dos espectros em cascata na direção Z - Ensaios 1 a 15.

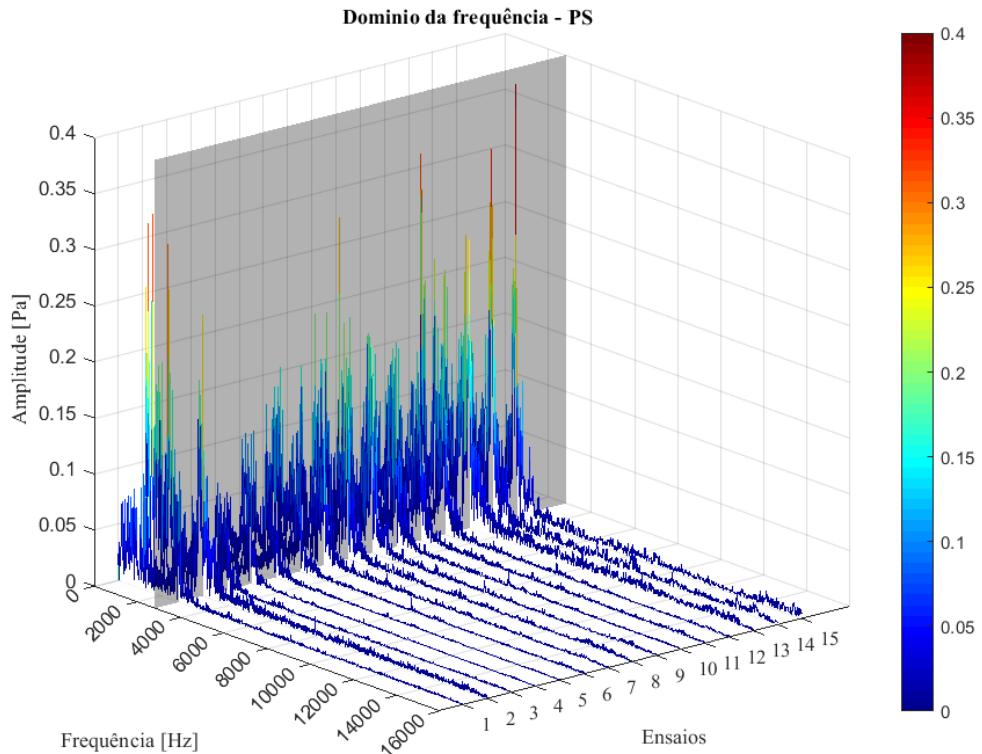


Figura 89 - Representação dos espectros em cascata do sinal de PS - Ensaios 1 a 15.

As frequências situadas nas proximidades das frequências naturais do sistema ferramenta-suporte constituem o principal foco deste estudo. No entanto, observou-se, no domínio do tempo, a ocorrência de perturbações ou reduções significativas de amplitude nos trechos em que foram identificados fragmentos de APCs, denominados “silêncios”. Esses comportamentos são evidentes nas Fig. 79, Fig. 80, Fig. 81 e Fig. 82, que exibem também os sinais registrados na direção Z, correspondente à direção do corte ortogonal adotado neste trabalho.

Essas correlações serão aprofundadas nas seções subsequentes, com o objetivo de relacioná-las aos resultados obtidos no domínio da frequência, por meio de técnicas de análise de sinais.

#### **4.5.1 Análise na região com presença de APC no cavaco**

Considerando as perturbações observadas no domínio do tempo, nas regiões em que foram identificados fragmentos de APCs, realizou-se uma investigação mais aprofundada, com foco na análise do comportamento do sinal no domínio da frequência antes, durante e após o instante em que o fragmento se desprende da interface de corte e se incorpora ao cavaco.

Para essa análise, foram selecionados dois ensaios cujos sinais no domínio do tempo, na direção do eixo Z, estão representados nas Fig. 90 e Fig. 91, juntamente com as posições dos fragmentos de APCs identificados na seção longitudinal dos cavacos. Essas posições foram numeradas diretamente no sinal temporal, possibilitando a avaliação das alterações espectrais associadas a cada ocorrência. A análise considera, para cada fragmento, janelas de tempo com durações equivalentes a duas e três vezes o comprimento do fragmento, localizadas imediatamente antes e depois da posição em que ele foi registrado no cavaco, permitindo identificar variações no conteúdo espectral.

Cabe destacar que, em grande parte da superfície inferior dos cavacos, não foram observados fragmentos de APCs. Entretanto, não se descarta a possibilidade de que partes da APC tenham permanecido aderidas à interface de corte ou sido removidas juntamente com a superfície da peça usinada, hipóteses que não foram exploradas neste estudo, mas que podem ter sido captadas pelo sinal adquirido.

No sinal no domínio do tempo, os fragmentos foram classificados com base em sua relação com o comportamento dinâmico local: (i) aqueles associados a regiões com redução acentuada de amplitude (silêncio), indicados por setas pretas; (ii) fragmentos localizados em

regiões próximas a algum silêncio ou a perturbações evidentes, marcados com setas verdes; e (iii) fragmentos identificados no cavaco, mas posicionados em trechos sem silêncio ou perturbações claras no sinal, indicados por setas azuis. Além disso, foram selecionadas duas regiões nos sinais em que não foram identificados fragmentos de APCs, indicadas pelas letras A e B nas Fig. 90 e Fig. 91, com o propósito de comparação entre os espectros.

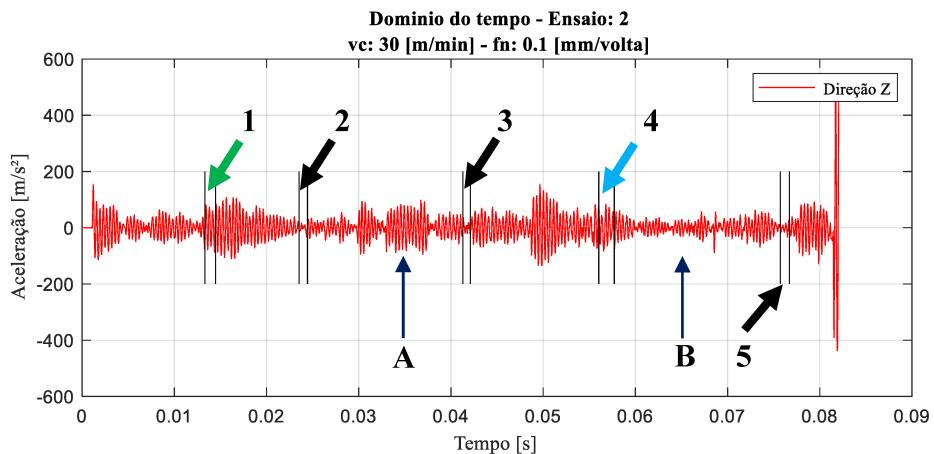


Figura 90 - Sinal no domínio do tempo do Ensaio 2, com posições dos fragmentos de APC e regiões sem fragmentos selecionadas para análise espectral.

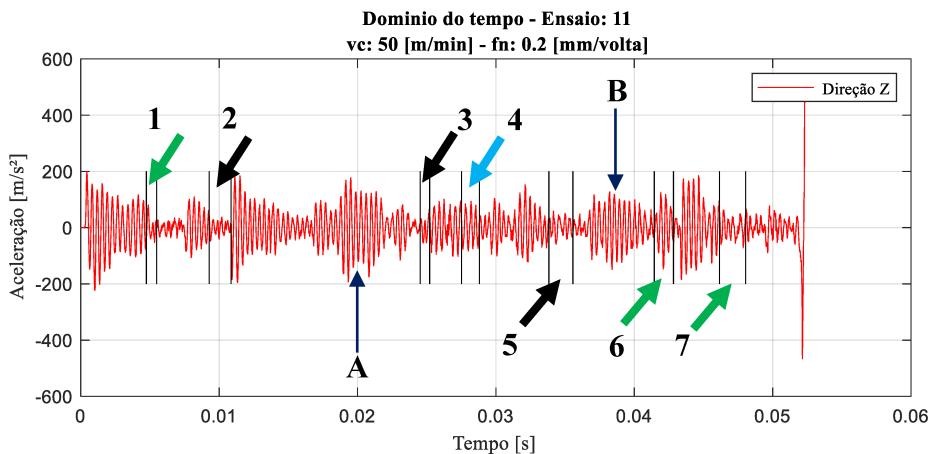


Figura 91 - Sinal no domínio do tempo do Ensaio 11, com posições dos fragmentos de APC e regiões sem fragmentos selecionadas para análise espectral.

A análise foi concentrada na faixa de até 6000 Hz, a qual abrange as primeiras frequências naturais do conjunto ferramenta-suporte: 1840 Hz e 2780 Hz, associadas aos eixos Y e Z, respectivamente. As Fig. 92 e Fig. 93 mostram os espectros obtidos nos pontos onde foram identificados fragmentos de APCs, bem como nas regiões adjacentes, a partir dos sinais

adquiridos na direção Z, correspondente à direção de corte no ensaio ortogonal. Nessas representações, a região central, que corresponde à posição do fragmento, está destacada em vermelho. As janelas imediatamente anterior e posterior, com duração temporal equivalente ao dobro da região central, são indicadas em azul. Já as janelas mais amplas, com duração equivalente ao triplo da região central, aparecem em preto. Essa segmentação permite avaliar as variações espectrais associadas ao desprendimento da APC e seus efeitos sobre as regiões vizinhas à sua fixação no cavaco.

Na direção do eixo Z, observaram-se intervalos com baixas amplitudes no sinal temporal, denominados silêncios, em diversas regiões associadas à presença de fragmentos de APCs na seção longitudinal do cavaco. Na Fig. 92, referente ao Ensaio 2, os fragmentos das APCs 2, 3 e 5 exibem coincidência entre sua posição no cavaco e os trechos silenciosos do sinal, além de redução da amplitude espectral em torno de 2780 Hz, em comparação com as regiões imediatamente anterior e posterior. Esse comportamento reforça a hipótese de que o desprendimento da APC interrompe momentaneamente o contato de corte, gerando um silêncio no sinal, seguido pela retomada da interação com o material.

Por outro lado, nas Regiões A e B, apresentadas nas Fig. 92 e 93, onde não foram identificados fragmentos de APC no cavaco, não se observou a ocorrência de silêncios nos sinais de vibração. Nessas regiões, ao comparar a região central com as adjacentes, observa-se que a amplitude espectral é sempre superior no trecho central, tanto anteriormente quanto posteriormente, indicando ausência de fragmentos e contato contínuo entre ferramenta e material ao longo do corte.

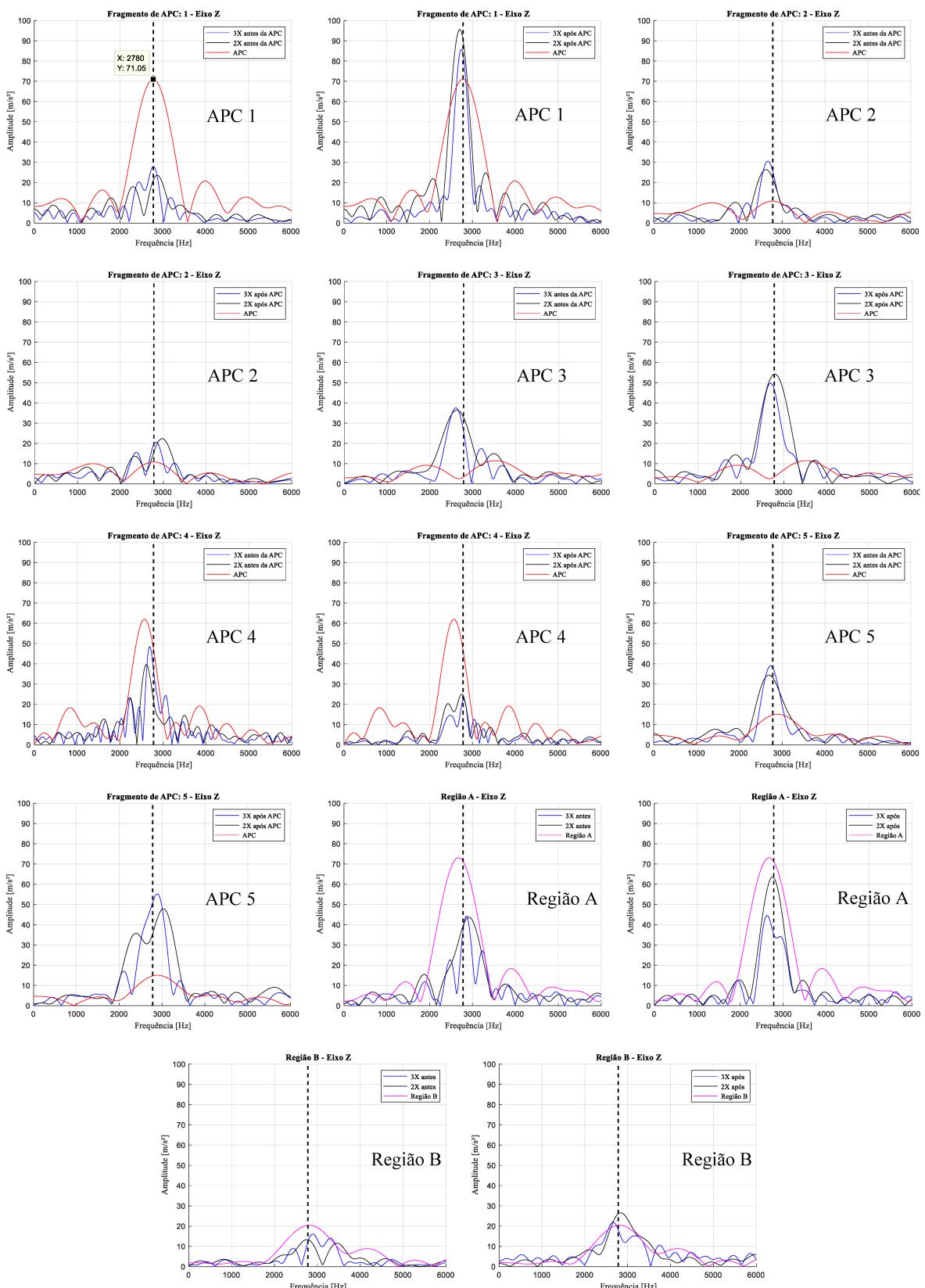
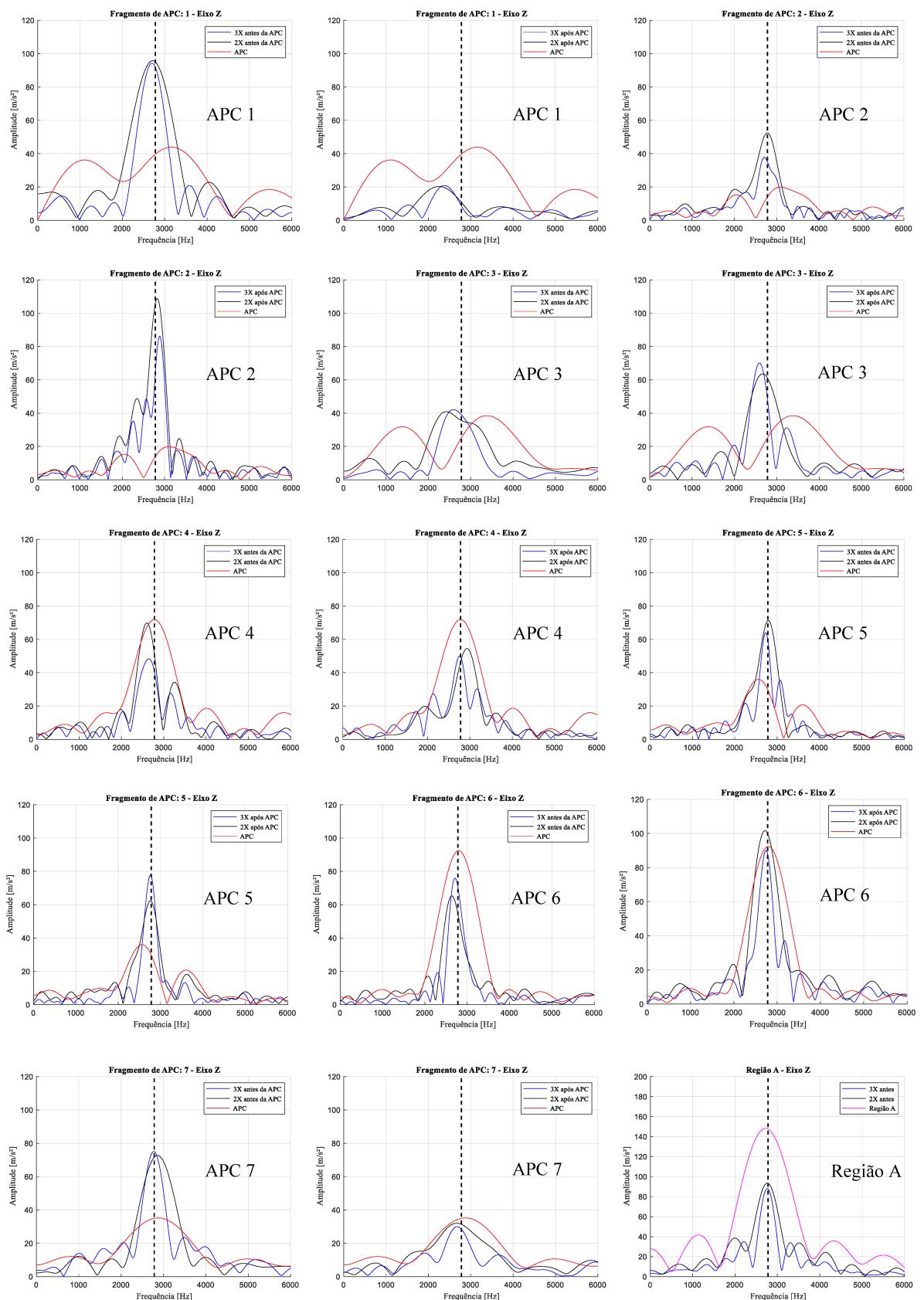


Figura 92 - Espectros (eixo Z) ao redor de fragmentos de APC e regiões sem APC – Ensaio 2. Zero padding – Resolução: 1 Hz.



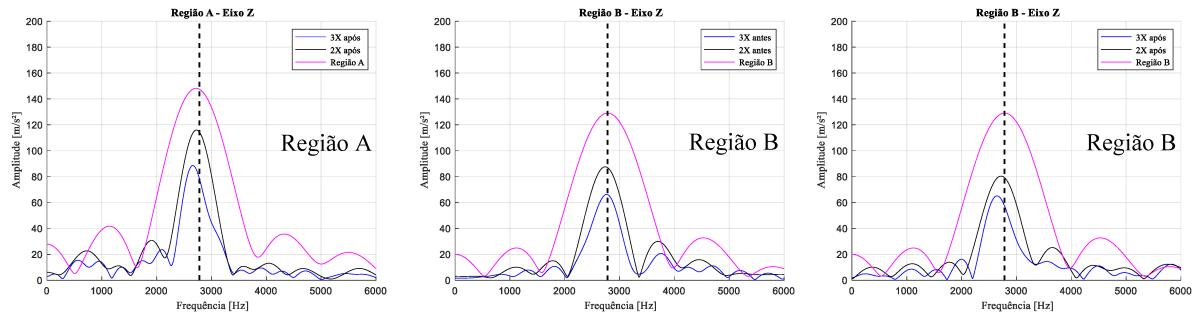


Figura 93 - Espectros (eixo Z) ao redor dos fragmentos das APCs e regiões sem APC – Ensaio 11 - (vc: 50 m/min e fn: 0,2 mm/volta). Zero padding – Resolução: 1 Hz.

O silêncio foi mais evidente em baixas velocidades de corte, nas quais a interrupção do contato é mais facilmente perceptível no domínio do tempo. À medida que a velocidade de corte aumenta, observa-se que o tempo de interrupção torna-se extremamente curto, dificultando a redução significativa da amplitude no domínio temporal. Ainda assim, a presença de fragmentos de APC gera perturbações detectáveis no sinal, que, quando analisadas no domínio da frequência, apresentam comportamento semelhante ao observado durante os eventos de silêncio.

O fenômeno também foi identificado no Ensaio 11 (Fig. 93) para os fragmentos das APCs 2, 3 e 5, os quais apresentaram indícios do mesmo padrão espectral em torno da mesma frequência de 2780 Hz. No caso da APC 1 do Ensaio 2, o fragmento foi localizado ligeiramente antes ou depois do trecho silencioso do sinal, comportamento igualmente verificado para as APCs 1 e 7 do Ensaio 11. Essa proximidade entre o fragmento e o silêncio ou perturbação está relacionada à forma como o material se desprende e se fixa ao cavaco, muitas vezes ficando comprimido entre este e a superfície de saída da ferramenta. Nessa condição, os fragmentos podem apresentar bordas irregulares, semelhantes a pequenas escamas aderidas à superfície inferior do cavaco.

A Figura 94 ilustra como o formato da borda influencia a correlação entre a posição do fragmento e o silêncio no sinal. Os fragmentos A, C e D são classificados como pontuais, por exemplo, pois podem não ser identificados em mais de uma seção longitudinal do cavaco. O fragmento B possui borda curva, o que pode resultar em variações na posição aparente do fragmento entre diferentes seções, afetando a correspondência com o trecho silencioso. Já os fragmentos E e F apresentam bordas inclinadas transversalmente à superfície inferior do

cavaco, o que pode provocar um deslocamento na posição correlacionada ao silêncio, como observado nos Ensaios 2 e 11.

Ressalta-se que nem todo trecho silencioso no sinal está, necessariamente, associado à presença visível de um fragmento na seção analisada do cavaco. Por exemplo, na seção 1 da Fig. 94, os fragmentos B e D podem não ser detectados, embora estejam potencialmente relacionados a regiões de silêncio no sinal. Além disso, fragmentos pontuais, como o fragmento D, podem não ser identificados em seções longitudinais consecutivas, como nas seções 2 e 3. Isso evidencia que, a depender da seção avaliada, é possível observar um trecho silencioso ou uma perturbação significativa no sinal, mesmo sem a identificação direta de fragmentos de APC na respectiva posição na seção do cavaco.

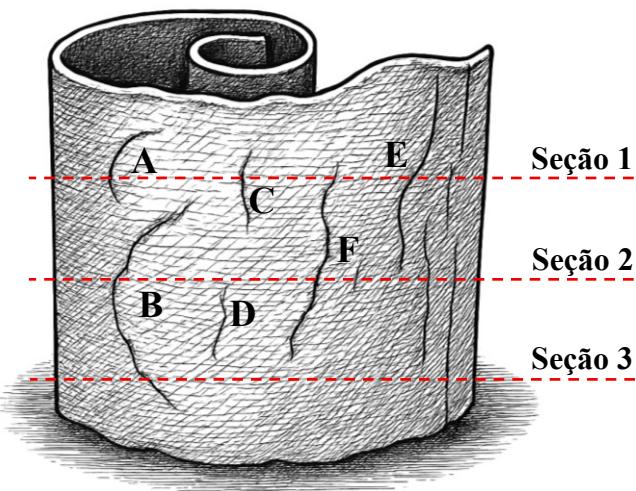


Figura 94 - Ilustração de um cavaco evidenciando bordas dos fragmentos de APC ao longo da superfície inferior.

Em relação à correlação entre os fragmentos de APCs e os trechos de silêncio ou perturbações no sinal, observou-se que, em alguns casos, fragmentos foram identificados no cavaco sem coincidência ou proximidade com essas regiões no sinal temporal. Esse comportamento foi registrado na APC 4 no Ensaio 2 e na APC 4 e 6 no Ensaio 11.

Essa ausência de correlação indica que o desprendimento do fragmento pode ter ocorrido fora da região ativa de corte, possivelmente em uma área inferior, localizada na superfície de saída da ferramenta. A Fig. 95(a) e Fig. 95(b) ilustram essa hipótese, destacando a região 2 (cauda da APC aderida), onde o material encruado pode se acumular entre o cavaco

e a superfície de saída, originando fragmentos que se fixam ao cavaco sem interferir diretamente no corte.

Já a região 1, também indicada na Fig. 95, representa a zona onde o material encruado substitui a aresta de corte da ferramenta, caracterizando a formação da APC. Quando uma porção significativa da APC é removida dessa região, total ou parcialmente, como ilustrado na Fig. 95(c), o fragmento pode ser visualizado integralmente no cavaco. Neste exemplo, o reinício da formação da APC na região 1 foi interrompido devido ao final do corte, provocado pelo método experimental adotado neste estudo.

Independentemente de a APC se desprender por completo ou parcialmente, esse evento interrompe momentaneamente o contato entre a ferramenta e a peça, resultando em um breve intervalo sem corte, caracterizado como silêncio. Durante esse período, a frequência natural do sistema ferramenta-suporte deixa de ser excitada pela dinâmica de corte, o que se reflete na redução da amplitude do sinal. Esse intervalo é geralmente seguido por picos elevados nas regiões anteriores e posteriores ao silêncio, decorrentes do impacto gerado pela descontinuidade do corte e sua retomada. Ressalta-se que todo esse fenômeno ocorre em frações de milésimos de segundo.

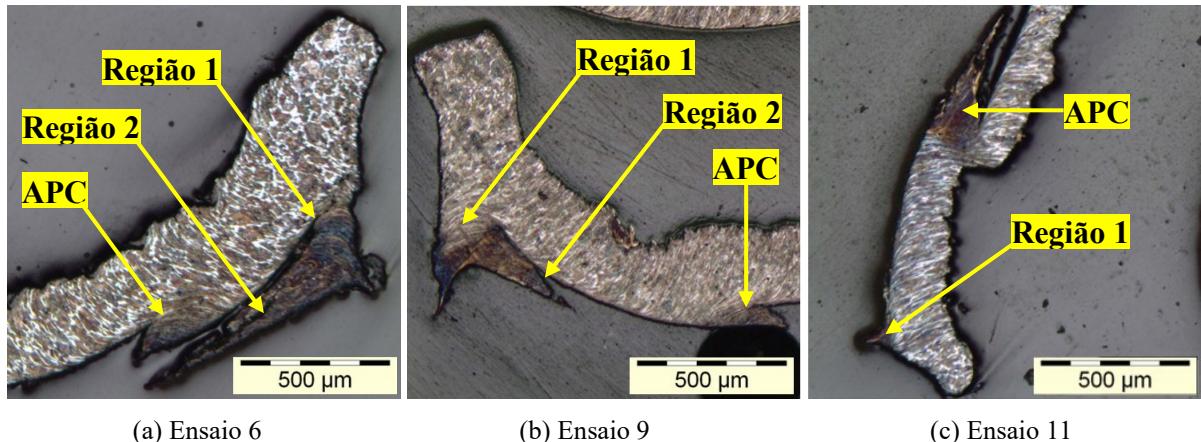


Figura 95 - Imagens microestruturais do final do cavaco do Ensaio 6 (vc: 30 m/min e fn: 0,2 mm/volta) (a), Ensaio 9 (vc: 50 m/min e fn: 0,1 mm/volta) (b), Ensaio 11 (vc: 50 m/min e fn: 0,1 mm/volta) (c).

Com base nas representações anteriores e na coincidência entre os “silêncios” no sinal e as posições dos fragmentos de APCs, inclusive nos casos em que esses trechos ocorrem nas proximidades dos fragmentos, considera-se válida a correlação entre esse fenômeno e a presença de APCs. No Ensaio 2, foi obtido um índice de correspondência de 80%, enquanto no

Ensaio 11 esse valor atingiu 71,4%, considerando-se a associação entre os fragmentos identificados em uma única seção longitudinal do cavaco e os sinais adquiridos na direção do eixo Z. A Tab. 4 fornece os índices de correspondência entre os silêncios e/ou perturbações e as posições dos fragmentos de APCs no domínio da frequência para os sinais dos eixos Y e Z.

Tabela 4 - Coincidência percentual entre “silêncios” e alterações espectrais associadas a fragmentos de APCs.

Ensaios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$v_c$ [m/min]	30						50					
$f_n$ [mm/volta]	0,1			0,2			0,1			0,2		
Nº de APC	7	5	6	5	2	7	10	10	12	7	7	8
<b>Correlação [%]</b>												
Eixo Y	43	60	33	40	50	57	30	20	42	71	71	50
Eixo Z	71	80	83	80	50	57	30	80	67	43	71	63

Embora os silêncios não tenham sido identificados no sinal temporal na direção Y, a análise espectral foi realizada com base nos critérios estabelecidos para a identificação de fragmentos de APC. Essa análise, relacionada aos fragmentos observados nas seções longitudinais do cavaco, está demonstrada no Apêndice I (Ensaio 2) e no Apêndice II (Ensaio 11).

A ocorrência dos silêncios e/ou perturbações mostrou-se fortemente associada à direção de corte ortogonal (eixo Z) e à velocidade de corte. No eixo Y, perpendicular à direção de avanço, também foram observadas influências desses fenômenos nos sinais espectrais, embora com menor taxa de correspondência em comparação ao eixo Z. Conforme apresentado na Tab. 4, os índices médios de coincidência foram de 47% para o eixo Y e 65% para o eixo Z. Ressalta-se que esses valores se referem à análise de uma única seção longitudinal do cavaco e que, em alguns casos, o número de fragmentos identificados foi reduzido.

No caso do sensor de PS, não foi possível identificar trechos de silêncio no domínio do tempo, tampouco observar correlações espectrais com as posições dos fragmentos, diferentemente do que foi verificado com os sinais adquiridos pelos acelerômetros nos eixos Y e Z.

Observa-se ainda que há trechos do sinal com ocorrência de silêncio sem que fragmentos de APCs tenham sido detectados na seção analisada, o que evidencia a limitação da análise baseada em apenas uma seção longitudinal do cavaco. Para superar essa restrição e permitir

uma avaliação mais abrangente dos silêncios nos domínios do tempo e da frequência, foram realizados oito novos ensaios (Ensaios 24 a 31), conforme descrito na seção de Metodologia. Esses ensaios visaram preencher lacunas na identificação da presença de APCs durante o corte ortogonal, por meio da análise de múltiplas seções do cavaco, da variação das velocidades de corte e da aplicação da Transformada Contínua de *Wavelet* (CWT), que permite avaliar a distribuição espectral ao longo do tempo.

#### **4.6 Análise por transformada *Wavelet* contínua (CWT)**

Os Ensaios 24 a 31 foram utilizados na aplicação da Transformada *Wavelet* Contínua (CWT), permitindo a análise dos sinais adquiridos nos eixos Y, Z e PS no domínio da frequência em função do tempo. Essa abordagem possibilita uma identificação mais abrangente dos trechos de silêncio. No entanto, antes da aplicação da CWT, foi realizada a análise microestrutural das seções longitudinais dos cavacos, com o objetivo de refinar a identificação das posições dos fragmentos de APC e reforçar a hipótese da curvatura desses fragmentos aderidos à superfície inferior do cavaco.

##### **4.6.1 Análise microestrutural do cavaco em várias seções**

De forma semelhante à análise apresentada na Seção 4.2, neste caso foi realizada a caracterização microestrutural de três seções longitudinais de cada cavaco. A proposta inicial previa a análise de três seções por cavaco, no entanto, em algumas amostras, a preparação metalográfica da terceira seção foi inviabilizada devido ao desgaste parcial ou ao despreendimento do cavaco do embutimento.

Os resultados da análise microestrutural das seções dos cavacos correspondentes aos Ensaios 25, 26, 28 e 30 são apresentados nas Fig. 96, 97, 98 e 99, respectivamente. Nessas figuras, são indicadas as posições dos fragmentos de APC identificados em cada uma das três seções analisadas dos cavacos. Ressalta-se que, nas terceiras seções dos cavacos exibidos nas Fig. 96 e Fig. 98, houve desgaste parcial do cavaco durante a preparação metalográfica, o que impossibilitou a visualização completa da superfície inferior, dificultando a identificação dos fragmentos de APC nessa seção.

Os fragmentos de APC observados nessas seções foram considerados desde os menores até os mais evidentes. Essa abordagem se mostrou necessária, pois, mesmo fragmentos de pequenas dimensões podem indicar a presença de uma APC maior, a qual pode ser identificada

com maior clareza nas demais seções analisadas. Em diversos casos, observou-se que um mesmo fragmento aparece em duas seções consecutivas, apresentando semelhança de forma e morfológica, o que reforça a identificação. No entanto, em situações em que essa semelhança não foi evidente, a confirmação foi realizada com base na posição relativa do fragmento ao longo do cavaco.

Verificou-se, ainda, que todos os ensaios e seções analisadas apresentaram fragmentos de APC localizados na extremidade final do cavaco, reforçando essa região como um indicativo consistente da ocorrência de APC durante a usinagem nas velocidades de corte investigadas.

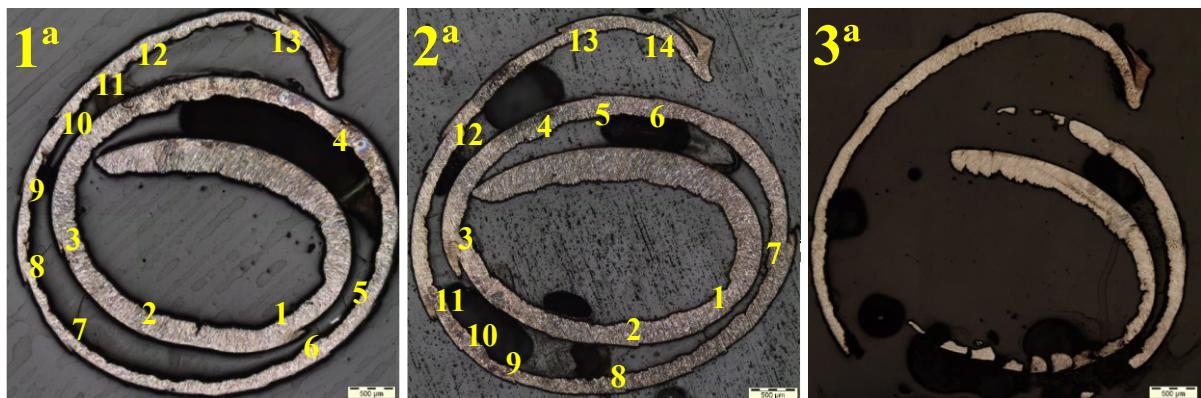


Figura 96 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 25 –  $v_c$ : 20 [m/min],  $f_n$ : 0,2 [mm/volta].

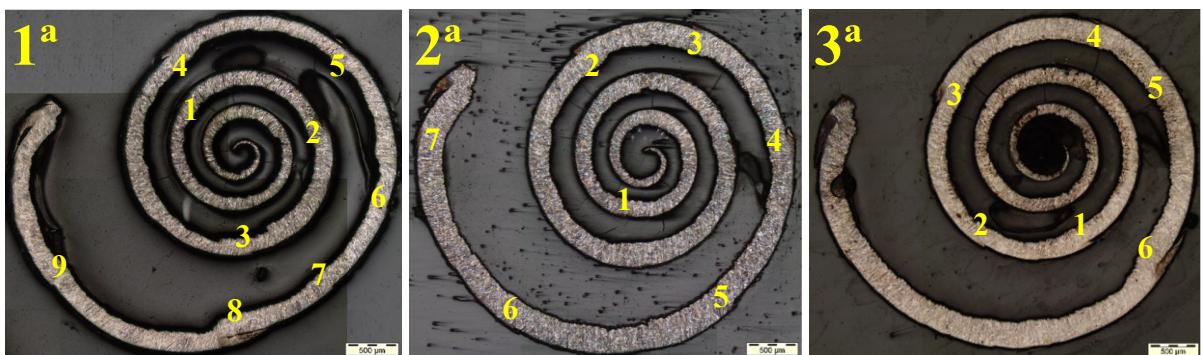


Figura 97 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 26 –  $v_c$ : 30 [m/min],  $f_n$ : 0,2 [mm/volta].



Figura 98 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 28 –  $v_c$ : 40 [m/min],  $f_n$ : 0,2 [mm/volta].

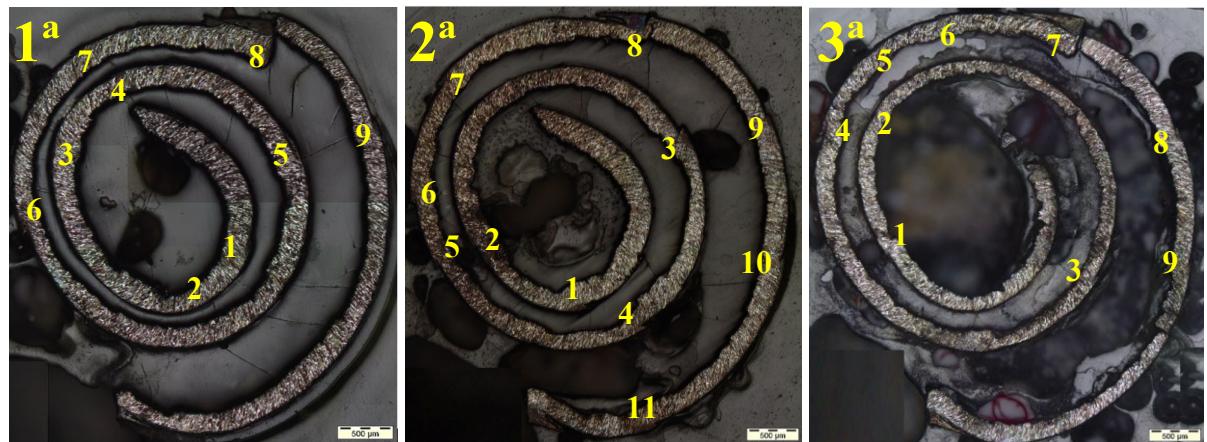


Figura 99 - Microestruturas de três seções do cavaco obtido no Ensaio 30 –  $v_c$ : 50 [m/min],  $f_n$ : 0,2 [mm/volta].

#### 4.6.1.1 Quantidade, comprimento e posição dos fragmentos das APCs em três seções

Assim como realizado anteriormente para a determinação dos comprimentos e das posições dos fragmentos de APC em uma única seção, localizada aproximadamente na região central da largura do cavaco, os ensaios subsequentes ampliaram a análise para três seções longitudinais, com espaçamento entre 0,3 mm e 0,4 mm entre elas. Com base nas análises microestruturais, foram quantificados e mensurados os comprimentos dos fragmentos de APC identificados nas seções dos cavacos obtidos nos Ensaios 24 a 31.

O gráfico fornecido na Fig. 100 mostra a distribuição dos comprimentos dos fragmentos de APC nas três seções analisadas de cada ensaio. Observa-se que a maior concentração de fragmentos se encontra na faixa de 0,1 mm a 0,4 mm. Esse comportamento é semelhante ao verificado nos Ensaios 1 a 15, nos quais a concentração predominante variou entre 0,2 mm e 0,4 mm. A diferença observada entre os dois conjuntos de ensaios decorre do critério adotado

para a análise, nesta segunda avaliação, foram considerados também fragmentos de menor comprimento, a partir de 0,060 mm (APC4 da seção 1 do ensaio 24 – Tab. 5), os quais não haviam sido incluídos na primeira análise. A inclusão desses fragmentos teve como objetivo contemplar a possibilidade de que representem porções de fragmentos maiores, que podem ser visualizados de forma mais completa em outras seções longitudinais do mesmo cavaco.

Essa distribuição é detalhada na Fig. 101, a qual evidencia que 92% dos fragmentos encontram-se na faixa de 0,1 mm a 0,4 mm. Fragmentos com comprimentos superiores a 0,4 mm e abaixo de 0,1 mm representam menos de 9% do total.

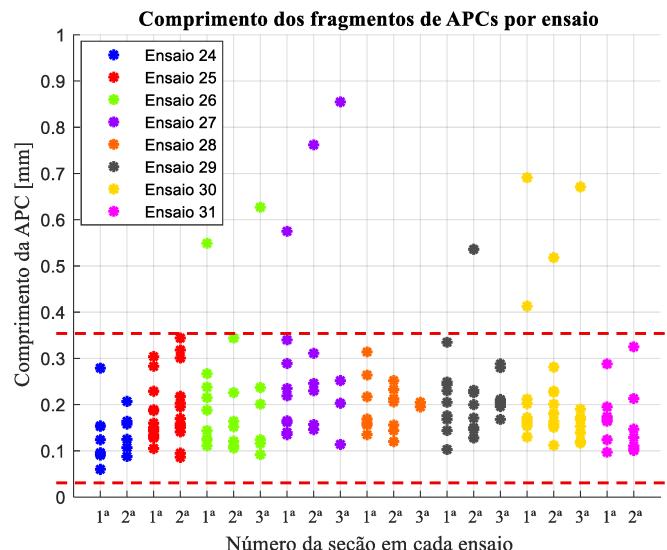


Figura 100 - Distribuição do comprimento dos fragmentos das APCs encontradas em cada ensaio de 24 a 31.

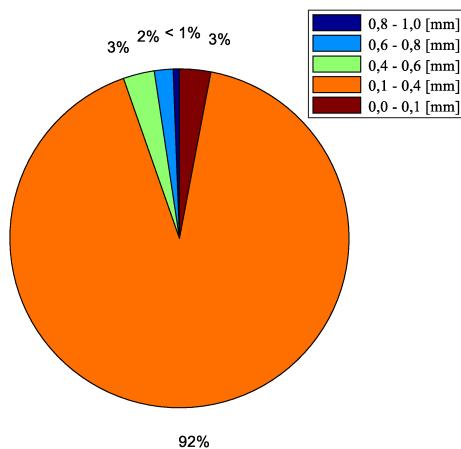


Figura 101 - Concentração dos comprimentos dos fragmentos de APCs considerando todos os ensaios de 24 a 31

Tabela 5 - Quantidade de fragmentos de APC e respectivos comprimentos identificados em cada uma das três seções dos cavacos referentes aos Ensaios 24 a 31

Ensaios	Total de APCs	Seção	Comprimento dos fragmentos das APCs [mm]													
			APC1	APC2	APC3	APC4	APC5	APC6	APC7	APC8	APC9	APC10	APC11	APC12	APC13	APC14
24	8	1 <sup>a</sup>	0,153	0,124	0,091	0,060	0,279	0,154	0,096	0,093						
	6	2 <sup>a</sup>	0,207	0,107	0,158	0,125	0,164	0,088								
25	13	1 <sup>a</sup>	0,304	0,189	0,187	0,283	0,160	0,128	0,130	0,134	0,143	0,150	0,144	0,105	0,229	
	14	2 <sup>a</sup>	0,155	0,150	0,344	0,141	0,158	0,170	0,301	0,218	0,156	0,095	0,318	0,195	0,203	0,086
26	9	1 <sup>a</sup>	0,238	0,188	0,126	0,215	0,267	0,111	0,124	0,549	0,144					
	7	2 <sup>a</sup>	0,152	0,164	0,121	0,344	0,111	0,106	0,226							
	6	3 <sup>a</sup>	0,201	0,116	0,237	0,124	0,092	0,627								
27	9	1 <sup>a</sup>	0,235	0,340	0,219	0,289	0,140	0,162	0,135	0,165	0,575					
	6	2 <sup>a</sup>	0,246	0,230	0,311	0,157	0,146	0,762								
	4	3 <sup>a</sup>	0,114	0,252	0,203	0,855										
28	8	1 <sup>a</sup>	0,314	0,264	0,169	0,160	0,135	0,158	0,156	0,217						
	7	2 <sup>a</sup>	0,156	0,144	0,252	0,206	0,120	0,213	0,233							
	2	3 <sup>a</sup>	0,195	0,205												
29	9	1 <sup>a</sup>	0,230	0,243	0,144	0,168	0,249	0,103	0,176	0,205	0,335					
	8	2 <sup>a</sup>	0,226	0,231	0,200	0,146	0,128	0,150	0,171	0,536						
	8	3 <sup>a</sup>	0,196	0,209	0,211	0,168	0,206	0,288	0,203	0,280						
30	9	1 <sup>a</sup>	0,172	0,130	0,202	0,154	0,413	0,212	0,161	0,691	0,165					
	11	2 <sup>a</sup>	0,227	0,181	0,281	0,164	0,112	0,157	0,201	0,518	0,151	0,180	0,229			
	9	3 <sup>a</sup>	0,168	0,190	0,117	0,172	0,139	0,171	0,671	0,153	0,121					
31	8	1 <sup>a</sup>	0,097	0,164	0,174	0,124	0,288	0,195	0,170	0,166						
	7	3 <sup>a</sup>	0,129	0,101	0,325	0,111	0,147	0,104	0,213							

Tabela 6 - Tempo total de usinagem e instantes iniciais dos fragmentos de APC referentes Ensaios 24 ao 31

Ensaios	Tempo total [ms]	Seção	Instante inicial dos fragmentos das APCs [ms]												
			APC1	APC2	APC3	APC4	APC5	APC6	APC7	APC8	APC9	APC10	APC11	APC12	APC13
24	125,0	1 <sup>a</sup>	36,4	42,4	65,3	89,3	104,4	108,3	111,6	115,3					
		2 <sup>a</sup>	36,6	65,8	88,6	96,7	108,8	117,6							
25	131,4	1 <sup>a</sup>	24,0	33,9	40,8	65,0	76,9	80,9	97,3	102,1	107,2	111,9	115,4	118,2	127,1
		2 <sup>a</sup>	24,8	30,6	42,1	54,2	58,0	61,4	74,1	88,6	95,2	98,9	101,3	112,4	122,0
26	78,8	1 <sup>a</sup>	17,4	23,6	29,6	39,6	46,3	52,9	56,2	59,0	67,4				
		2 <sup>a</sup>	13,5	42,5	47,2	52,5	59,3	68,3	76,0						
		3 <sup>a</sup>	30,2	34,5	40,7	48,0	51,1	57,6							
27	84,9	1 <sup>a</sup>	13,2	31,7	62,0	41,3	44,3	49,0	64,5	69,1	80,9				
		2 <sup>a</sup>	13,3	34,6	43,7	52,3	65,3	80,0							
		3 <sup>a</sup>	15,9	43,7	48,3	79,7									
28	62,4	1 <sup>a</sup>	10,8	29,4	33,4	37,6	39,2	43,4	50,5	57,2					
		2 <sup>a</sup>	11,4	17,4	18,6	27,2	36,9	38,9	49,9						
		3 <sup>a</sup>	15,4	50,8											
29	61,3	1 <sup>a</sup>	7,1	10,0	12,6	14,9	25,7	42,5	49,2	14,0	55,3				
		2 <sup>a</sup>	7,2	11,3	17,3	24,3	27,9	44,2	51,8	54,4					
		3 <sup>a</sup>	6,2	7,3	11,8	24,5	32,9	44,1	49,4	55,8					
30	51,2	1 <sup>a</sup>	4,3	5,9	11,4	13,6	17,9	28,6	33,0	36,0	40,5				
		2 <sup>a</sup>	6,3	9,3	17,8	22,5	27,8	29,4	32,0	35,9	40,4	43,6	48,3		
		3 <sup>a</sup>	7,5	10,9	23,0	30,3	32,6	34,1	36,0	40,3	43,4				
31	49,3	1 <sup>a</sup>	6,0	12,0	13,8	22,0	25,5	29,1	31,6	42,7					
		2 <sup>a</sup>	5,5	14,7	23,3	27,1	29,4	33,8	45,2						

Na Tab. 5 são apresentadas a quantidade de fragmentos de APC identificados nas três seções de cada ensaio, bem como os comprimentos individuais de cada fragmento. Por sua vez, os instantes temporais iniciais correspondentes a cada fragmento de APC identificado, considerados informações essenciais para as discussões subsequentes dos resultados e para a comprovação das hipóteses levantadas ao longo deste trabalho, são apresentados na Tab. 6.

Os instantes temporais iniciais de cada fragmento, fornecidos anteriormente na Tab. 6, são parâmetros fundamentais para a identificação de regiões de silêncio ou perturbações nos sinais, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, viabilizando uma análise simultânea ao longo de todo o processo de corte ortogonal por meio da Transformada Contínua de *Wavelet* (CWT). No entanto, antes da aplicação direta desses dados, torna-se necessário representar graficamente a distribuição dos fragmentos ao longo do tempo de corte, com o intuito de verificar fenômenos já discutidos, como a ocorrência de silêncios próximos, embora não exatamente coincidentes, aos fragmentos identificados no cavaco, bem como sua relação com a morfologia da borda desses fragmentos.

A identificação dos fragmentos foi realizada com base na semelhança morfológica observada nas microestruturas das seções longitudinais e na correspondência entre os instantes temporais iniciais, permitindo estabelecer uma correlação fragmento a fragmento entre as diferentes seções analisadas de cada cavaco.

As posições dos fragmentos de APC identificados nos Ensaios 25, 27, 29 e 30, representando a localização de cada fragmento nas três seções longitudinais de cada cavaco, são apresentadas nas Fig. 102 a 105. Nessas figuras, é possível observar dois padrões distintos: os fragmentos destacados em azul correspondem a formações pontuais, identificadas em apenas uma das seções. Esses casos indicam fragmentos de dimensões reduzidas, que não se estendem para as demais seções ou que, possivelmente, tiveram parte de sua estrutura aderida à peça, em vez do cavaco.

Por outro lado, os fragmentos representados em vermelho correspondem a formações maiores, identificadas em mais de uma seção longitudinal. Embora, na forma como estão representados, não seja possível visualizar com precisão o contorno completo desses fragmentos, observa-se que sua posição no tempo pode variar conforme a seção em que foram detectados, gerando pequenos deslocamentos temporais em relação à posição no sinal. Essa variação influencia diretamente a identificação precisa dos trechos de silêncio nos sinais. Considerando que tais fragmentos se estendem por mais de uma seção, os silêncios são mais

fortemente associados à região em que se observa maior volume ou corpo do fragmento da APC entre as seções.

Essa constatação reforça a necessidade de considerar como regiões de silêncio aquelas que, no tempo de usinagem, estão próximas às posições em que os fragmentos são detectados no cavaco, uma vez que tais eventos estão diretamente relacionados à presença localizada da APC. Representações complementares das posições dos fragmentos de APC estão ilustradas nos Apêndices III e IV, os quais contêm as distribuições detalhadas dos fragmentos identificados nos Ensaios 24, 26, 28 e 31.

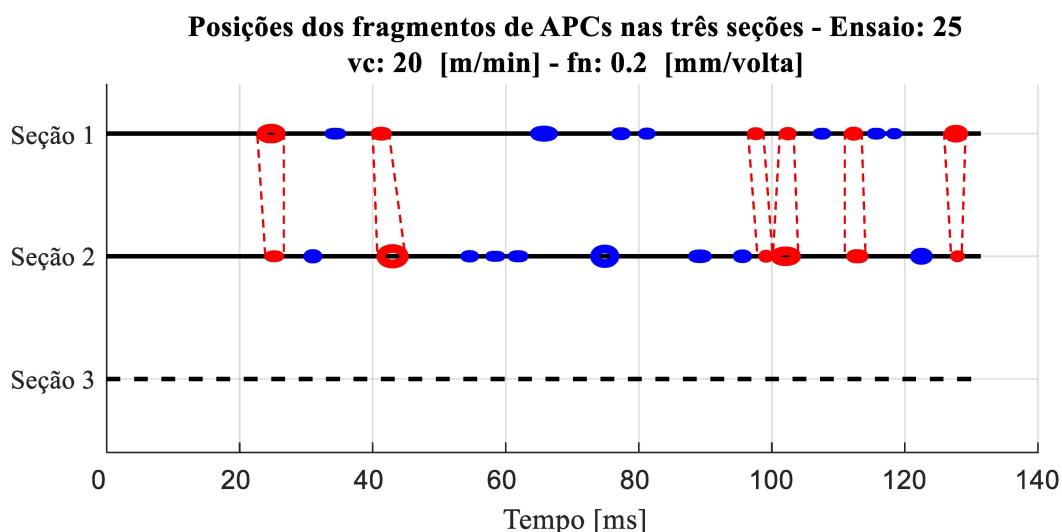


Figura 102 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c: 20$  [m/min] e  $f_n: 0,2$  [mm/volta]).

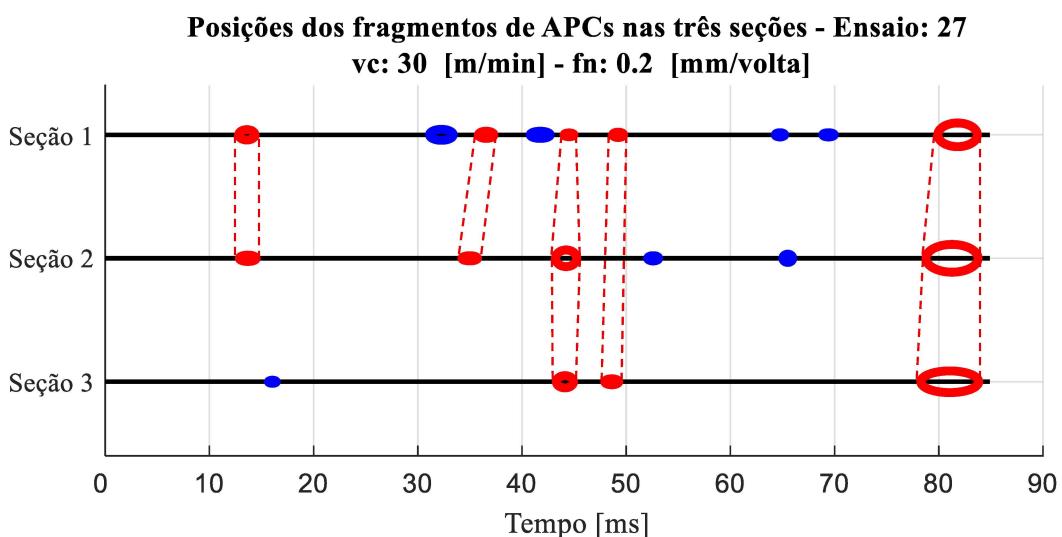


Figura 103 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c: 20$  [m/min] e  $f_n: 0,2$  [mm/volta]).

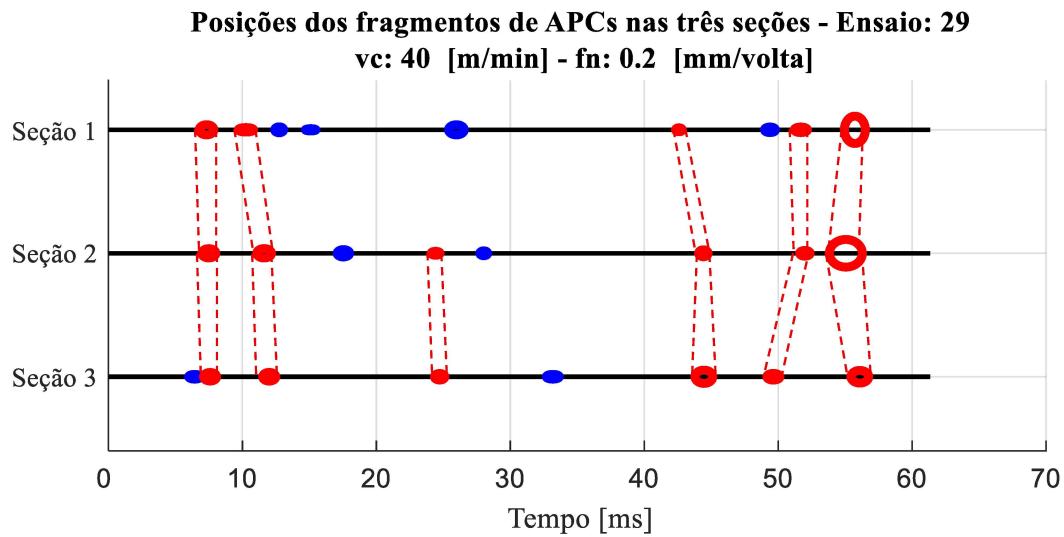


Figura 104 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c: 20$  [m/min] e  $f_n: 0,2$  [mm/volta]).

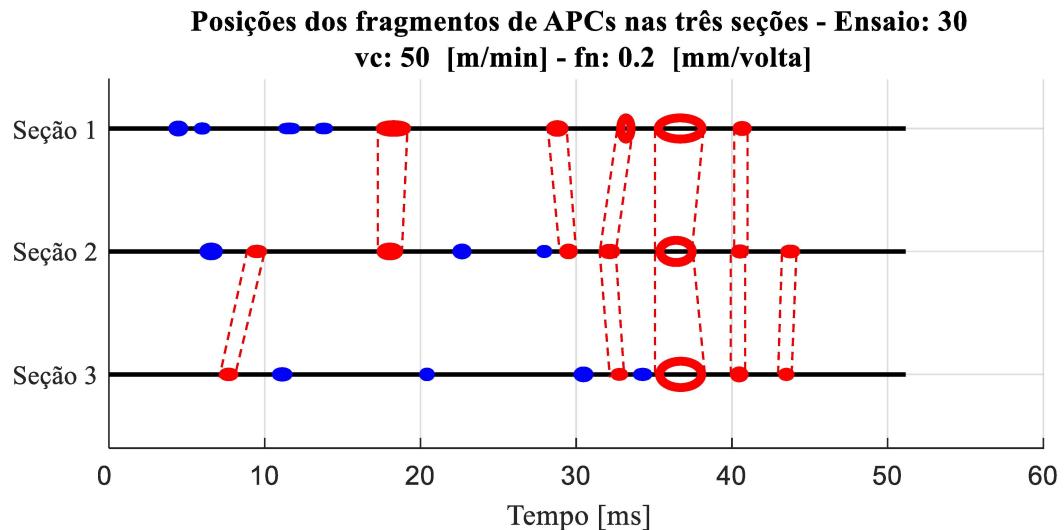


Figura 105 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c: 20$  [m/min] e  $f_n: 0,2$  [mm/volta]).

#### 4.6.2 Transformada Wavelet contínua (CWT)

A aplicação da CWT aos sinais no domínio do tempo permite uma análise detalhada das regiões de silêncio que coincidem com a posição dos fragmentos de APC, bem como daquelas que ocorrem nas proximidades desses fragmentos. Essa abordagem possibilita uma correlação mais precisa entre os silêncios observados nos sinais e a presença física da APC.

O escalograma do Ensaio 2, obtido por meio da aplicação da CWT e utilizando a função-mãe Morlet como base para a análise espectrotemporal, é apresentado na Fig. 106. Nesse ensaio, as posições dos fragmentos de APC, assim como as regiões imediatamente anteriores e posteriores, foram previamente analisadas por meio da FFT, a qual revelou a predominância da frequência natural do suporte em torno de 2780 Hz na direção do eixo Z, destacada no gráfico por um plano transparente. Foi justamente nessa faixa de frequência que se observou o comportamento característico dos trechos de silêncio.

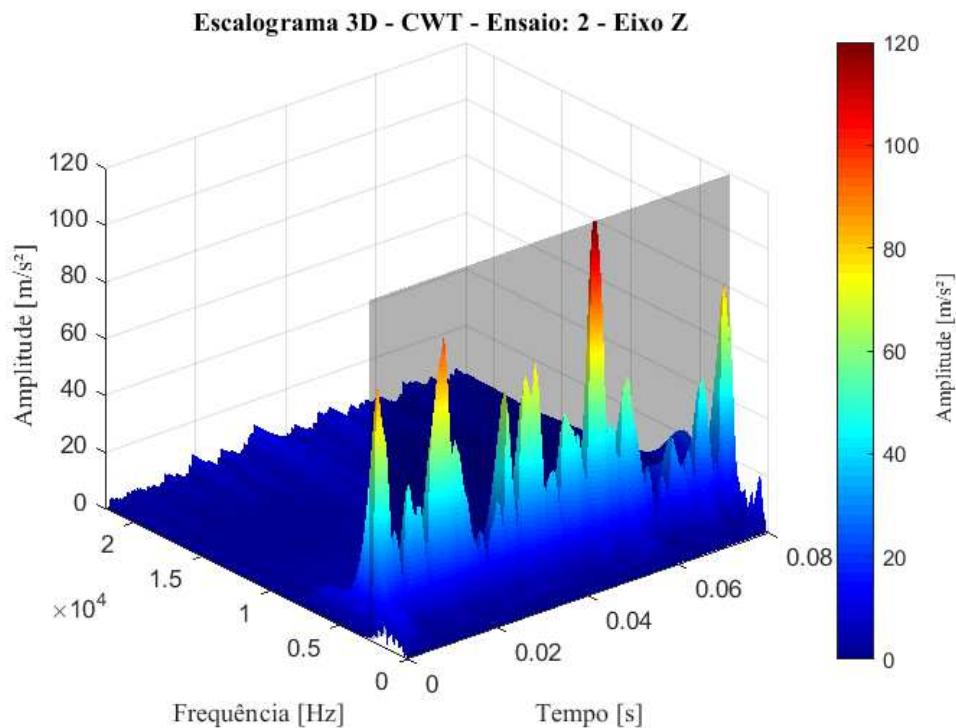


Figura 106 - Escalograma tridimensional obtido por meio da CWT aplicada ao sinal do eixo Z no Ensaio 2 – vc:30 m/min e fn: 0,1 mm/volta – df: 12 Hz.

A partir do formato do gráfico fornecido na Fig. 106, iniciou-se a análise sistemática da CWT por meio de cortes em planos horizontais no escalograma, definidos em níveis específicos de amplitude. O critério adotado para definição desses cortes foi a média dos valores RMS (média quadrática) calculados para cada janela do sinal, correspondente à posição dos fragmentos de APC identificados no cavaco de cada ensaio.

Esse procedimento, aplicado ao Ensaio 2, com o corte realizado na amplitude de 35,4  $\text{m/s}^2$ , é apresentado na Fig. 107. Nesse gráfico, observa-se o destaque para a faixa de frequência

natural do sistema (2780 Hz), bem como a indicação das posições dos fragmentos de APC por meio de setas pretas. Verifica-se que o primeiro fragmento está localizado próximo a uma janela de silêncio, precisamente na faixa da frequência natural do sistema. Os segundo, terceiro e quinto fragmentos de APC coincidem exatamente com as regiões de silêncio no sinal, evidenciando uma correspondência direta entre a presença da APC e a ausência de resposta vibracional. Por outro lado, o quarto fragmento foi identificado em uma região em que não se observam trechos de silêncio ou perturbações, nem em sua posição nem nas regiões adjacentes.

Esses resultados, evidenciados com maior clareza por meio da análise pela CWT, são consistentes com as observações previamente discutidas na Seção 4.5.1. Ressalta-se que, para esse ensaio, foi preparada apenas uma seção longitudinal do cavaco, a qual proporcionou uma visualização mais clara da ocorrência de silêncio associada à presença dos fragmentos de APC.

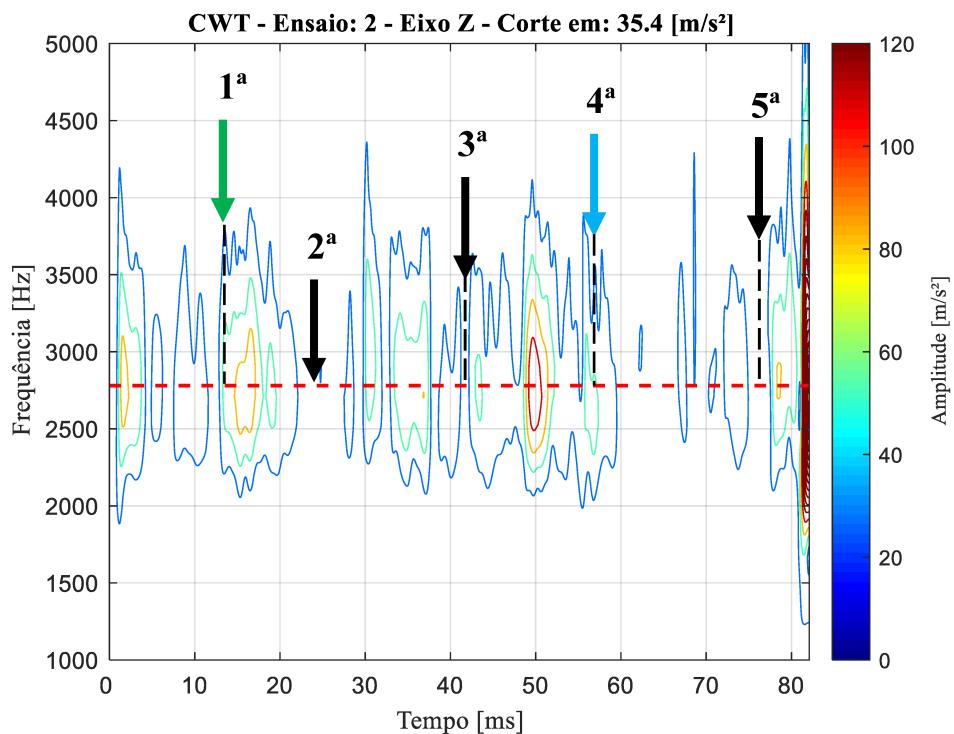


Figura 107 - Análise por CWT com corte na amplitude de 35,4 m/s<sup>2</sup> aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 2 na direção do eixo Z – vc:30 m/min e fn: 0,1 mm/volta – df: 12 Hz.

Diferentemente do que foi observado na Seção 4.5.1, em que os resultados para o eixo Y e para o sinal de PS não apresentaram respostas significativas em amplitude na frequência natural do sistema nas posições dos fragmentos de APC, nem em suas regiões adjacentes, a

aplicação da análise por CWT revelou uma tendência distinta. As respostas obtidas por meio da CWT apresentaram os mesmos padrões de silêncio verificados para o eixo Z no Ensaio 2, o qual representa a direção mais propícia para a detecção desses silêncios em razão de sua correspondência com a direção de corte ortogonal.

A Figura 108 mostra o corte do escalograma referente ao eixo Y, na amplitude de 11,3 m/s<sup>2</sup>, mantendo as representações das posições dos cinco fragmentos de APC identificados no Ensaio 2. Observa-se que as indicações de silêncio seguem o mesmo comportamento discutido anteriormente, confirmando a consistência das correlações entre os fragmentos e os eventos de ausência de resposta vibracional, mesmo em direções distintas de medição.

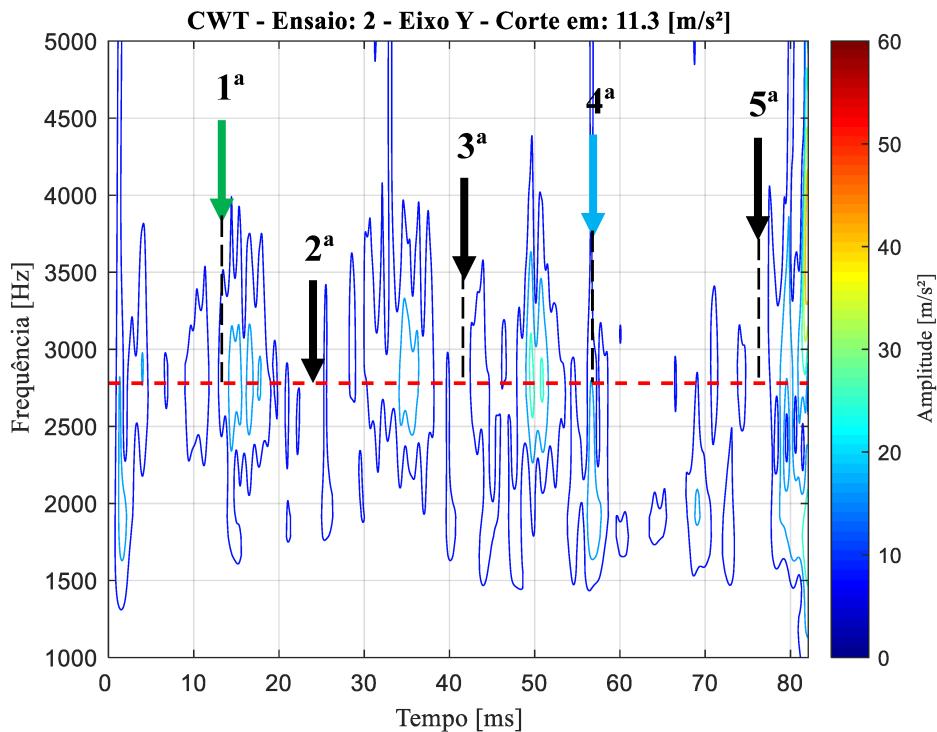


Figura 108 - Análise por CWT com corte na amplitude de 11,3 m/s<sup>2</sup> aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 2 na direção de Y – vc:30 m/min e fn: 0,1 mm/volta – df: 12 Hz.

Esse padrão também foi verificado para o sinal de PS, cujo corte no escalograma foi realizado na amplitude de 0,22 Pa, conforme apresentado na Fig. 109. Esse resultado é particularmente relevante, pois, mesmo sem contato direto entre o microfone e o sistema de fixação da ferramenta, foi possível identificar silêncios relacionados com as posições dos fragmentos de APC.

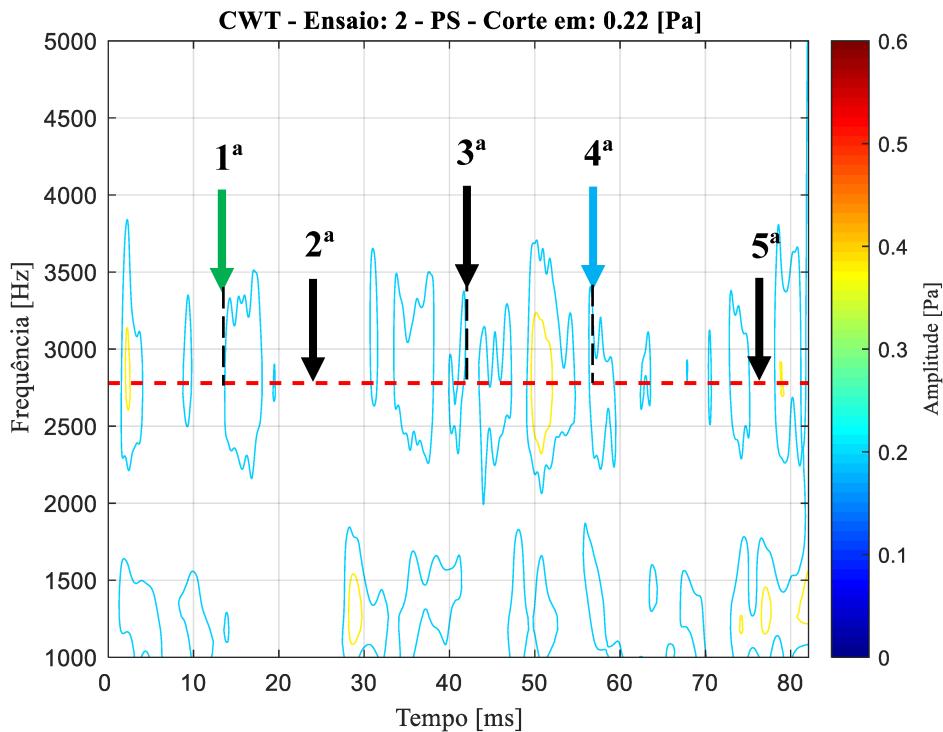


Figura 109 - Análise por CWT com corte na amplitude de 0,22 Pa aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 2 em PS – vc:30 m/min e fn: 0,1 mm/volta – df: 12 Hz.

Para os ensaios realizados em velocidades de corte superiores a 83 m/min, nos quais não foram identificados fragmentos de APC nas análises microestruturais, não foi aplicado um nível específico de corte por amplitude na análise por CWT. Isso se deve à ausência de fragmentos que possibilitessem o cálculo da média dos valores RMS, conforme adotado anteriormente. No entanto, para fins de comparação, foi utilizado no Ensaio 13, no eixo Z, o mesmo nível de corte em amplitude aplicado no eixo z do Ensaio 2, de 35,4 m/s<sup>2</sup>, conforme apresentado na Fig. 110.

Observa-se que a frequência natural do sistema, situada em torno de 2780 Hz, permanece continuamente presente ao longo de praticamente todo o intervalo de tempo analisado. Esse comportamento corrobora os resultados discutidos anteriormente, indicando que, nas condições de usinagem em que não há formação de fragmentos de APC, os sinais mantêm características estáveis na faixa próxima à frequência natural do sistema.

Esse padrão ocorre porque não há desprendimento de material que interrompa o processo de corte e provoque perturbações abruptas no sinal. Assim, a ausência de trechos de silêncio reforça a hipótese de que tais eventos estão diretamente associados à presença e ao destacamento de fragmentos de APC durante o corte ortogonal.

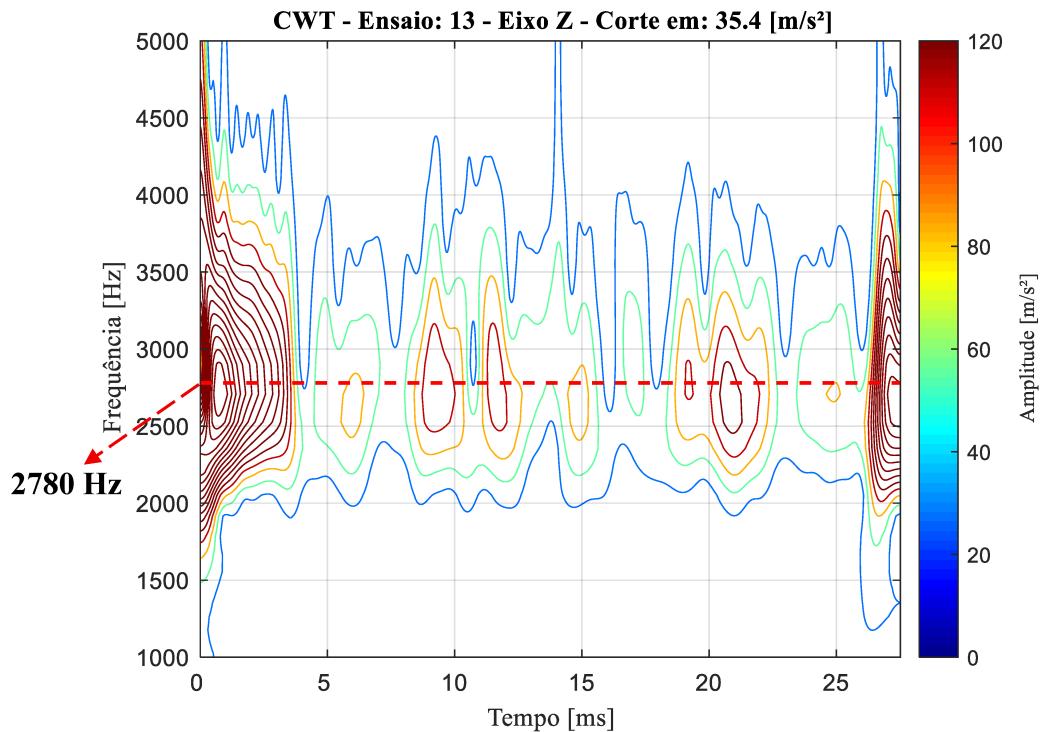


Figura 110 - Análise por CWT com corte na amplitude de 35,4 m/s<sup>2</sup> aplicado ao gráfico tridimensional do Ensaio 13 no eixo Z – vc:100 m/min e fn: 0,2 mm/volta – df: 32 Hz.

Para uma identificação mais abrangente dos trechos de silêncio, a CWT foi aplicada aos ensaios nos quais foram preparadas três seções longitudinais dos cavacos. Essa abordagem possibilitou correlacionar todos os fragmentos de APC identificados em cada seção com os trechos de silêncio e/ou perturbações observadas nos sinais registrados durante a usinagem.

As Figuras 111 a 119 exibem os cortes nos escalogramas, obtidos a partir das amplitudes médias calculadas com base nos valores RMS de cada janela do sinal, correspondentes às posições dos fragmentos de APC identificados em cada ensaio. Nessas figuras, estão representadas as posições dos fragmentos observados nas três seções longitudinais analisadas de cada cavaco. As setas voltadas para baixo indicam os fragmentos localizados na primeira seção, as setas voltadas para cima referem-se à segunda seção, e as setas inclinadas na parte inferior dos gráficos representam os fragmentos identificados na terceira seção.

Assim como adotado anteriormente na análise das regiões do sinal onde os fragmentos foram encontrados, as setas pretas indicam coincidência direta entre o fragmento e um trecho de silêncio identificado no corte do escalograma gerado pela CWT. As setas verdes indicam fragmentos posicionados próximos aos trechos de silêncio, os quais, devido à curvatura da borda (formato de escama) e/ou à inclinação da borda na superfície, também são considerados

como coincidências. Já as setas azuis representam fragmentos que não coincidem, nem se aproximam, de qualquer região de silêncio no sinal.

Nesse último caso, considera-se que o fragmento identificado no cavaco pode ter se desprendido da extremidade final (cauda) da APC ainda aderida à ponta da ferramenta. Assim, o desprendimento não causaria uma interrupção perceptível no corte, não gerando, portanto, um trecho de silêncio característico no sinal, como discutido anteriormente.

Os escalogramas dos sinais obtidos nos eixos Z, Y e PS, respectivamente, para o Ensaio 24 ( $v_c = 20 \text{ m/min}$ ), com cortes nas amplitudes de  $22 \text{ m/s}^2$  no eixo Z,  $7,9 \text{ m/s}^2$  no eixo Y e  $0,2 \text{ Pa}$  na PS, são apresentados nas Fig. 111 a 113. Neste ensaio, foi possível analisar apenas duas das três seções longitudinais preparadas, uma vez que a terceira seção foi danificada, impossibilitando a identificação dos fragmentos de APC.

No eixo Z, considerando todos os fragmentos identificados nas duas seções disponíveis, foi observada uma taxa de coincidência de 78,6% entre os fragmentos e os trechos de silêncio, indicando que, por alguns milissegundos, a amplitude na frequência natural do sistema (2780 Hz) permaneceu abaixo do limiar estabelecido. Para o eixo Y, a coincidência foi de 71,4%, enquanto, na PS, essa taxa atingiu 92,86%, evidenciando uma forte correlação entre a presença dos fragmentos de APC e a ocorrência de silêncio, mesmo sem contato físico entre o microfone e o sistema de fixação da ferramenta.

Os escalogramas dos sinais adquiridos nos eixos Z, Y e na PS para o Ensaio 27 ( $v_c = 30 \text{ m/min}$ ), com cortes em  $48 \text{ m/s}^2$  no eixo Z,  $15 \text{ m/s}^2$  no eixo Y e  $0,4 \text{ Pa}$  na PS, são apresentados nas Fig. 114 a 116. Neste caso, a coincidência entre os fragmentos de APC e os trechos de silêncio alcançou 78,9% no eixo Z, 57,9% no eixo Y e 94,7% na PS, mantendo a consistência dos padrões de correlação observados.

Já nas Figuras 117 a 119, referentes ao Ensaio 29 ( $v_c = 40 \text{ m/min}$ ), os cortes foram aplicados nas amplitudes de  $69,2 \text{ m/s}^2$  para o eixo Z,  $21,4 \text{ m/s}^2$  para o eixo Y e  $0,5 \text{ Pa}$  para a PS. Os resultados demonstraram uma taxa de coincidência de 84% no eixo Z, 72% no eixo Y e 80% na PS, confirmando a tendência de que a presença da APC está associada à ocorrência de silêncios, especialmente na direção do corte ortogonal (eixo Z), mas também perceptível nos sinais adquiridos por outras direções e sensores.

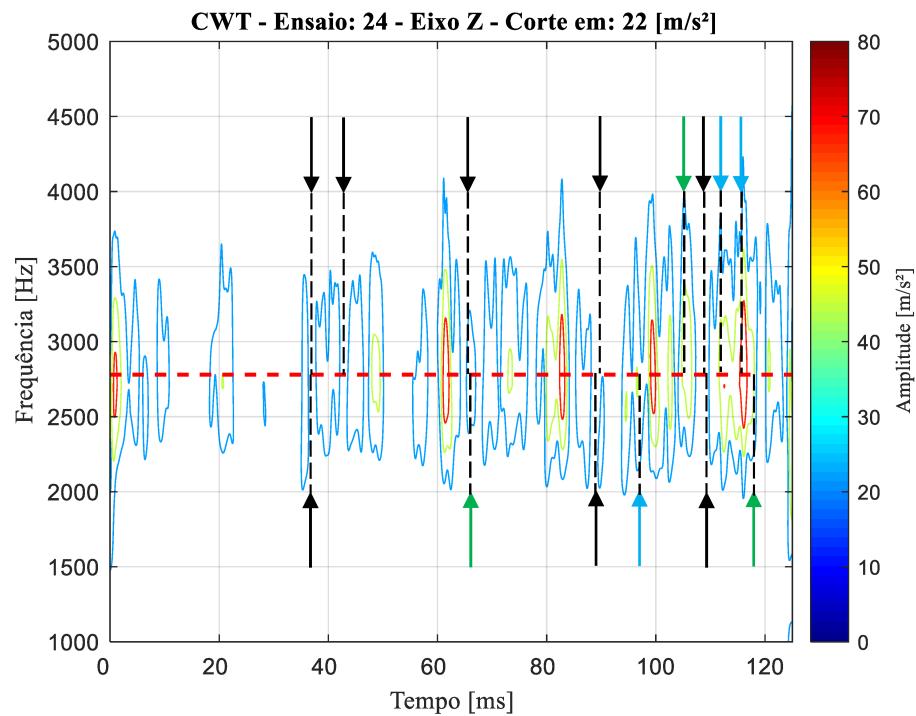


Figura 111 – Corte em 22 m/s<sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Z do ensaio 24 – vc:20 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 8 Hz.

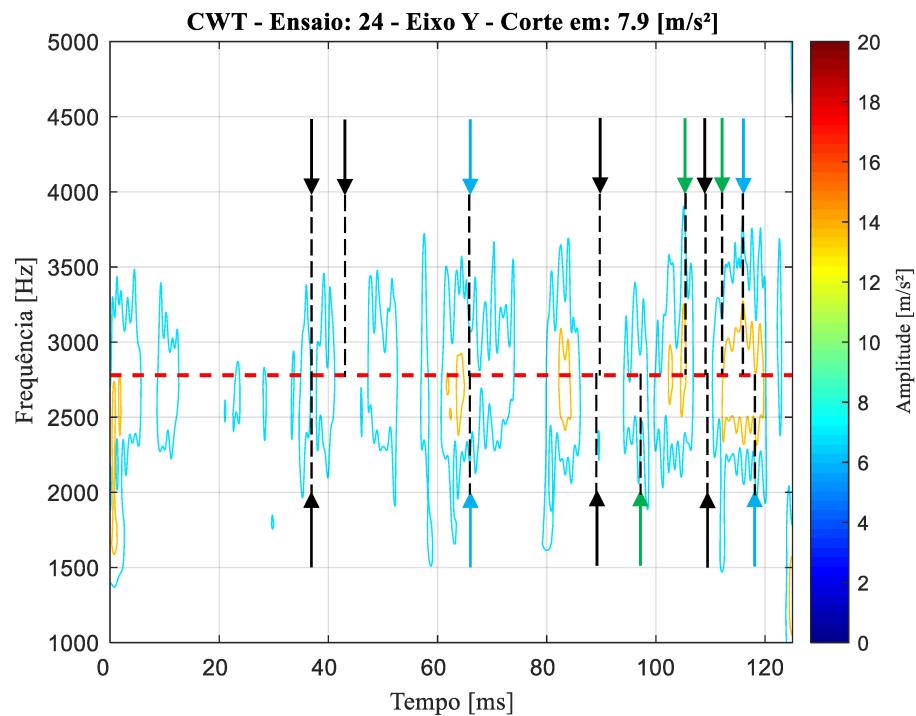


Figura 112 – Corte em 7,9 m/s<sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Y do ensaio 24 – vc:20 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 8 Hz.

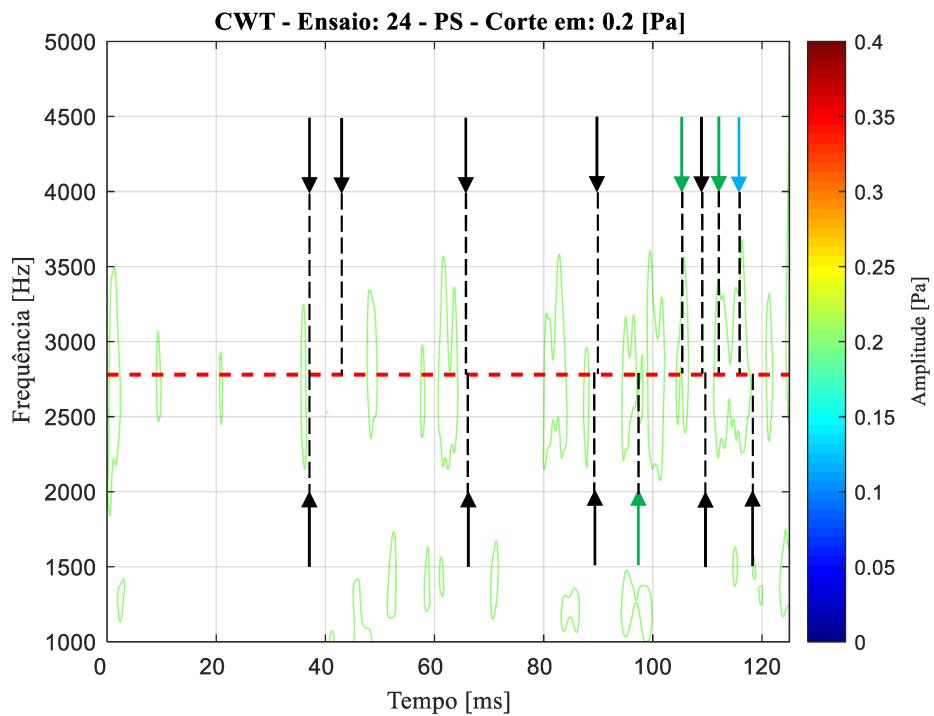


Figura 113 – Corte em 0,2 Pa do escalograma tridimensional do sinal de PS do ensaio 24– vc:20 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 8 Hz.

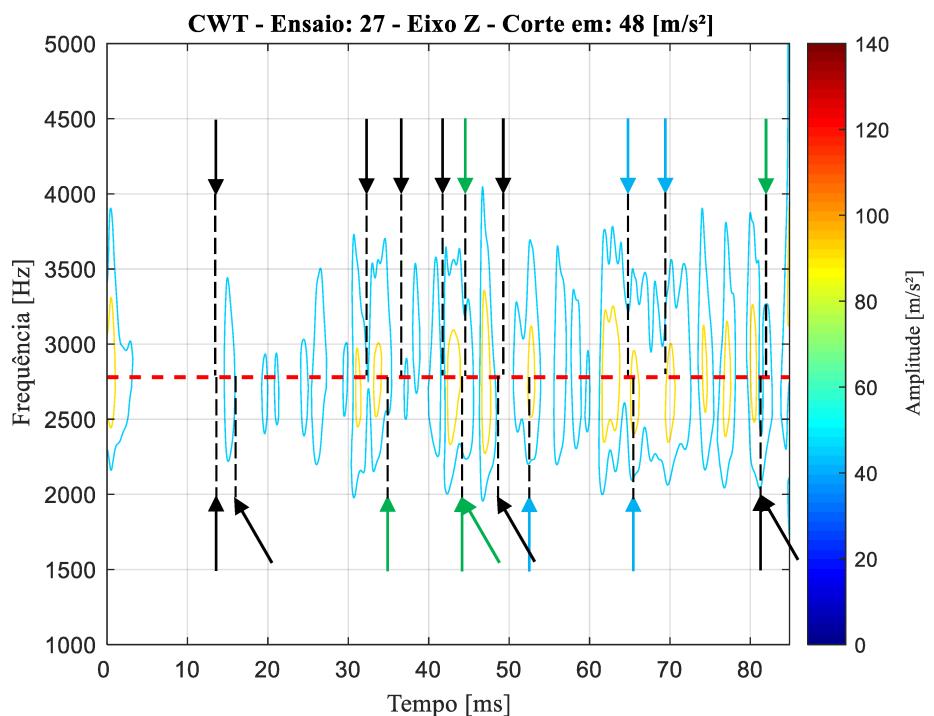


Figura 114 - Corte em 48 m/s<sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Z do ensaio 27– vc:30 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 12 Hz.

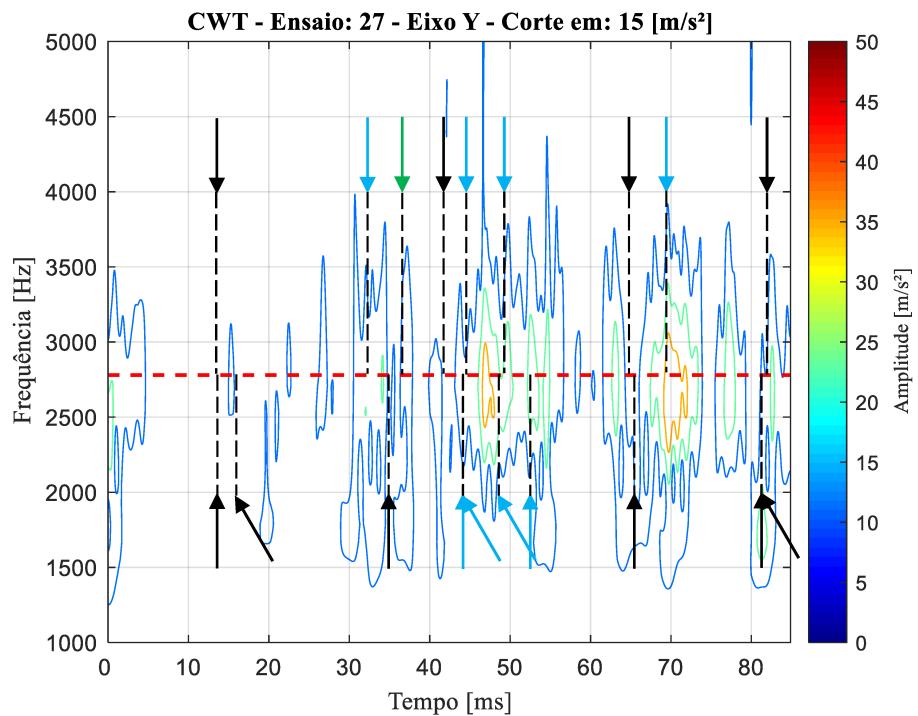


Figura 115 - Corte em 15 m/s<sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Y do ensaio 27 – vc:30 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 12 Hz.

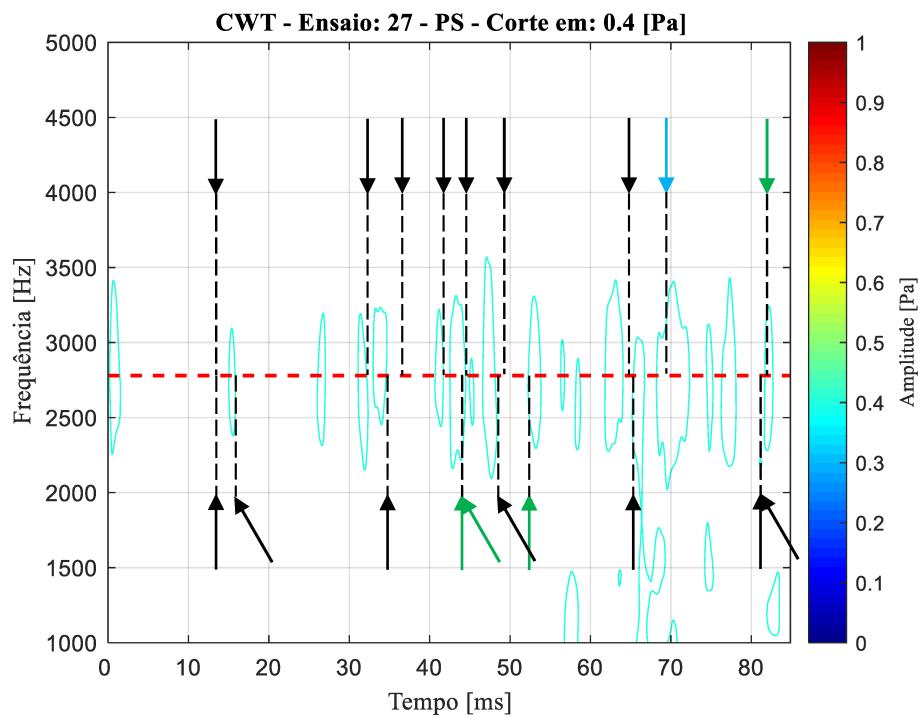


Figura 116 – Corte em 0,4 Pa do escalograma tridimensional do sinal de PS do ensaio 27 – vc:30 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 12 Hz.

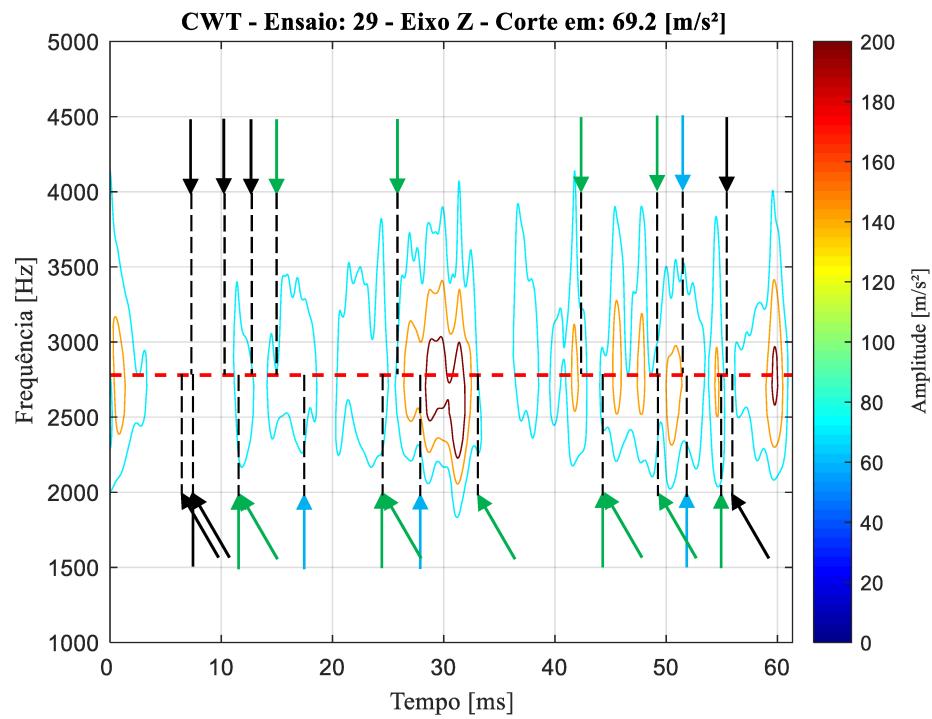


Figura 117 - Corte em 69,2 m/s<sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Z do ensaio 29 – vc:40 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 16 Hz.

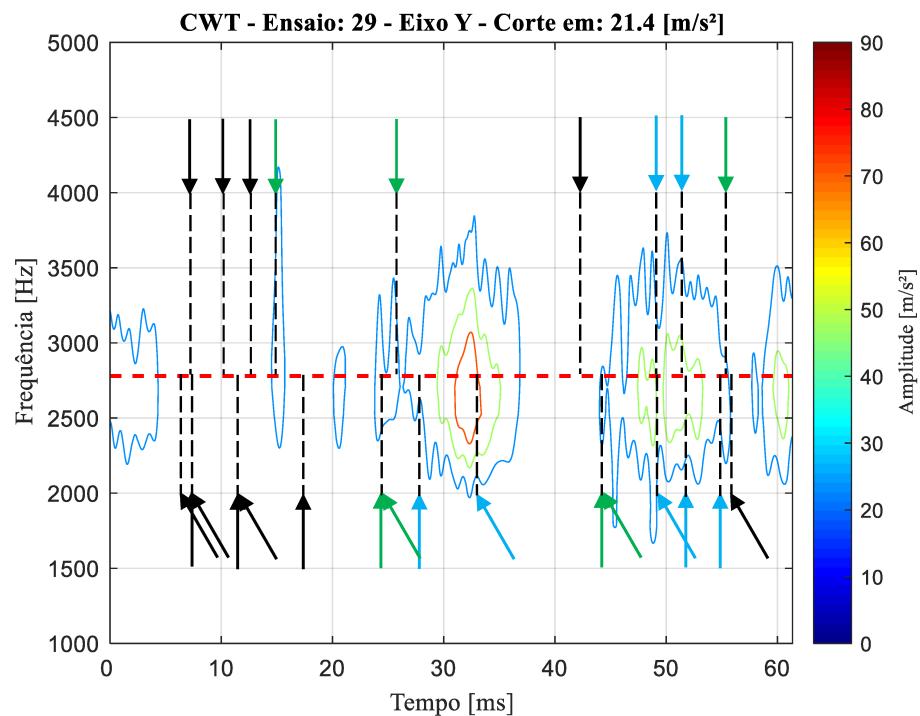


Figura 118 - Corte em 21,4 m/s<sup>2</sup> do escalograma tridimensional do sinal do eixo Y do ensaio 29 – vc:40 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 16 Hz.

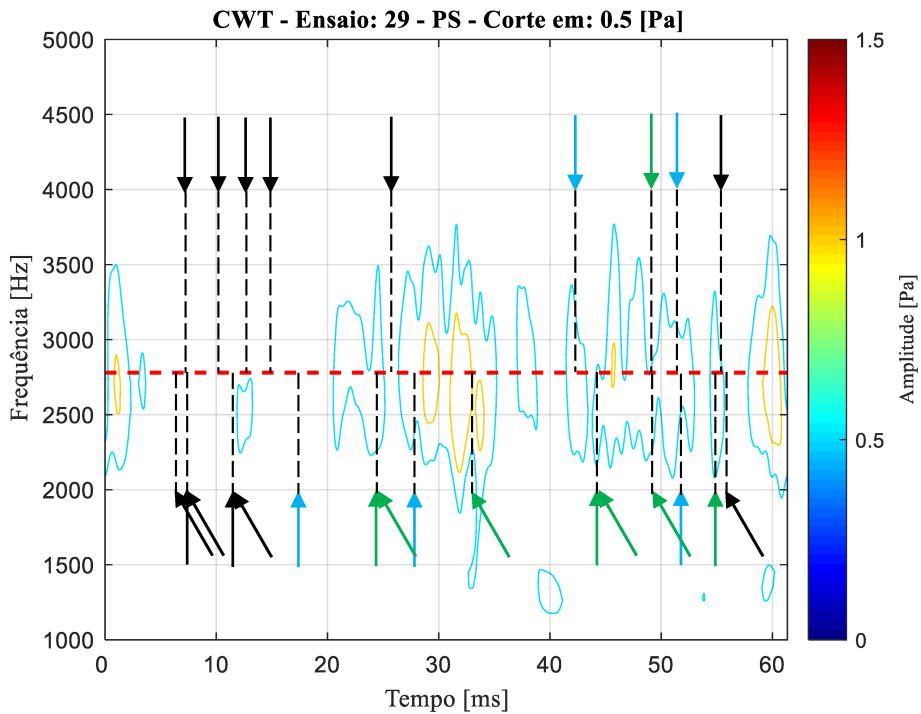


Figura 119 - Corte em 0,5 Pa do escalograma tridimensional do sinal de PS do ensaio 29– vc:40 m/min e fn: 0,2 mm/volta - df: 16 Hz.

As Figuras 111 a 119 apresentam os cortes nos escalogramas dos ensaios realizados com velocidades de corte de 20 m/min, 30 m/min e 40 m/min, com avanço constante de 0,2 mm/volta, faixas nas quais a formação da APC é favorecida. Os cortes foram definidos pela média dos valores RMS correspondentes aos intervalos em que foram identificados fragmentos de APC ao longo da superfície inferior dos cavacos, as três seções avaliadas.

Observa-se um padrão consistente de correlação entre os fragmentos de APC e as regiões de “silêncio” registradas na frequência natural do sistema ( $\approx 2780$  Hz), especialmente na direção do eixo Z, associada ao corte ortogonal. Essa coincidência reforça a hipótese de que o desprendimento da APC provoca interrupções momentâneas no corte, manifestadas nos sinais como reduções abruptas de amplitude.

Mesmo em diferentes condições de corte, a presença da APC influencia o comportamento vibracional do sistema, afetando os sinais medidos nos eixos Y, Z e na PS. Os resultados confirmam que a CWT identifica de forma consistente os eventos transitórios associados à formação e ao destacamento da APC, apresentando maior sensibilidade e resolução temporal que métodos convencionais, como a FFT.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Este trabalho propôs e validou uma metodologia experimental para identificação da formação da aresta postiça de corte (APC) por meio da análise de fragmentos aderidos à superfície inferior e à extremidade do cavaco, gerados em ensaios de corte ortogonal no aço ABNT 1050. A abordagem utilizou análise microestrutural dos cavacos em conjunto com sinais de vibração (eixos Y e Z) e de pressão sonora (PS), permitindo identificar comportamentos característicos associados à presença e ao desprendimento da APC.

O corpo de prova desenvolvido demonstrou-se eficiente para o estudo da APC, especialmente por sua geometria com início de corte suavizado e limitação controlada do número e comprimento dos cavacos. A análise de microdureza confirmou a formação da APC ao revelar aumentos significativos: cerca de 18% no corpo do cavaco em relação ao material em estado de fornecimento e aproximadamente 80% nas regiões com APC.

A análise macroscópica e os dados da curva força de corte versus velocidade de corte mostraram que a APC deixou de se formar em velocidades superiores a 83 m/min. Em velocidades inferiores, a presença da APC foi recorrente em todos os ensaios, tanto na superfície inferior quanto na extremidade do cavaco. A caracterização micrográfica evidenciou a presença de material encruado com coloração distinta, facilitando a contagem e medição dos fragmentos. A maioria dos fragmentos apresentou comprimento entre 0,1 mm e 0,4 mm, representando 75% das APCs observadas nos ensaios com uma seção longitudinal. Nos ensaios com três seções longitudinais, esse intervalo se manteve predominante, abrangendo 92% dos fragmentos registrados.

A influência dos parâmetros de corte foi evidente. Ensaios com velocidade de 50 m/min e avanço de 0,2 mm/volta (Ensaios 10, 11 e 12) geraram os fragmentos de maior comprimento. Em contrapartida, os ensaios com avanço de 0,1 mm/volta apresentaram quantidades significativamente superior de fragmentos: 30,4% a mais nos ensaios com 30 m/min e 45,4% a mais nos ensaios com 50 m/min. O aumento do avanço intensificou a espessura de corte não deformada, favorecendo o acúmulo de material na ponta da ferramenta e o consequente crescimento da APC..

A análise das posições dos fragmentos revelou que a APC se forma rapidamente após o início do corte e tende a se desprender parcialmente, deixando vestígios no cavaco. Em alguns casos, o primeiro fragmento foi identificado poucos milissegundos após o início da usinagem, como observado no ensaio 30, aos 4,3 ms. O fenômeno do silêncio nos sinais, caracterizado por uma breve interrupção no corte efetivo, mostrou-se associado ao desprendimento de porções da APC da interface de corte.

O fenômeno do silêncio foi mais evidente em velocidades de corte mais baixas, devido ao maior tempo de resposta dos sensores, o que favorece sua detecção no domínio do tempo. Com o aumento da velocidade, o silêncio torna-se menos perceptível nesse domínio. Entretanto, sua ocorrência ainda pode ser identificada no domínio da frequência, por meio de perturbações no sinal temporal que se manifestam como variações de amplitude em torno da frequência natural do sistema suporte-ferramenta. Na ausência de formação da APC, o sinal apresenta picos característicos concentrados em torno da frequência natural do sistema, reflexo da continuidade do contato entre ferramenta e material durante o corte, sem interrupções abruptas que perturbariam a resposta dinâmica do processo.

A análise pontual nas regiões com e sem fragmentos da APC, bem como em áreas adjacentes, apresentou resultados consistentes nos sinais do eixo Z, como esperado devido à sua coincidência com a direção do corte e à forte relação com o fenômeno do silêncio, caracterizado pela interrupção momentânea no corte provocada pelo desprendimento da APC da interface de contato. Esse fenômeno refletiu-se na redução da amplitude em torno da frequência natural do sistema ferramenta-suporte, identificada em 2780 Hz. Nos ensaios em que foi analisada uma única seção longitudinal do cavaco, a taxa média de acerto entre a posição dos fragmentos e a ocorrência do silêncio no eixo Z foi de aproximadamente 65%, com acertos pontuais que chegaram a 83% em determinados ensaios. O eixo Y, embora perpendicular à

direção de corte, apresentou uma média de 47% de acurácia, com acertos pontuais que chegaram a 71% em alguns casos.

Por outro lado, o sinal de PS não se mostrou eficaz na identificação da APC por meio da análise pontual. Observou-se ainda que os fragmentos nem sempre estavam perfeitamente alinhados ao instante do silêncio no domínio do tempo, o que pode ser atribuído à geometria escamada da APC. A curvatura ou inclinação das escamas pode fazer com que o fragmento apareça em apenas uma das seções longitudinais do cavaco, ou em posições levemente deslocadas, dificultando a correspondência exata entre a posição física do fragmento e o instante registrado no sinal.

A Análise por Componentes Principais (PCA) apresentou resultados inconclusivos para a identificação direta dos fragmentos da APC. Os *scores* permaneceram aglomerados próximos à origem, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, sem evidências claras de agrupamentos associados à presença da APC. Os *loadings* revelaram que o sinal do eixo Z foi o que mais contribuiu positivamente para a primeira componente principal. Acredita-se que a limitação da PCA neste contexto decorra do tamanho elevado dos vetores e da semelhança entre os sinais, o que dificulta a extração de variabilidade significativa entre as observações.

Por outro lado, a Transformada Contínua de Wavelet (CWT) apresentou resultados consistentes em todas os sinais analisados. Os cortes nos escalogramas, realizados com base na média da amplitude RMS das janelas com presença de fragmentos, indicaram reduções de amplitude em torno da frequência natural de 2780 Hz, coincidindo com as posições dos fragmentos. A média de coincidência foi de 84% no eixo Z, 72% no eixo Y e 80% na PS, evidenciando a eficácia da CWT para identificar alterações associadas ao desprendimento da APC, especialmente na direção do corte ortogonal.

Portanto, a metodologia proposta neste trabalho demonstrou grande potencial para a identificação da APC por meio da análise do cavaco e de sinais dinâmicos adquiridos durante a usinagem. A combinação entre caracterização microestrutural, análise espectral e ferramentas avançadas como a CWT contribui de forma significativa para o monitoramento de processos de corte, abrindo novas possibilidades para o estudo da formação e do controle da APC em diferentes condições operacionais.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

1) Aplicar a metodologia de análise de sinais no domínio da frequência e com Transformada Contínua de Wavelet (CWT) em outros processos de usinagem, especialmente no torneamento cilíndrico externo, avaliando o conceito de silêncio associado à presença da APC.

2) Integrar a PCA com outras variáveis do processo, como rugosidade superficial, topografia da peça usinada e parâmetros de força, de forma a validar a análise para fragmentos aderidos à superfície da peça e correlacionar esses fenômenos ao comportamento dos sinais.

3) Empregar o corpo de prova desenvolvido neste estudo em outros materiais, avaliando sua resposta em faixas de velocidade de corte mais elevadas, com o objetivo de investigar a formação da zona de fluxo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, Y. S., ALAM, Md. S., ARIF, A. F. M., VELDHUIS, S, C. New observations on built-up edge structures for improving machining performance during the cutting of superduplex stainless steel. **Tribology International**, v. 137, p. 212–227, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.04.039>
- ALTINTAS, Y. **Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 338 p.
- ALVES, L. O. **Metodologia de compressão de sinais baseada em transformada de wavelet discreta utilizando otimização por evolução diferencial**. 2022. 55 f. Monografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- ASLAN, A. Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: a comprehensive study. **Measurement**, v. 163, art. 107959, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107959>
- AZAM, S. H. M., AHMADLOO, E. Analysis of chip removal operations via new Quick-Stop device. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 31, n. 13, p. 1782–1791, 2016. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1127959>
- BONDA, A. G. Y., NANDA, B. K., JONNALAGADDA, S. Vibration signature-based stability studies in internal turning with a wavelet denoising preprocessor. **Measurement**, v. 154, art. 107520, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107520>
- BOUHAROUTI, N. E., MORINIGO-SOTELO, D., BELAHCEN, A. Multi-Rate Vibration Signal Analysis for Bearing Fault Detection in Induction Machines Using Supervised Learning Classifiers. **Machines**, v. 12, n. 1, art. 17, 2023. <https://doi.org/10.3390/machines12010017>
- BRITO, L. C. **Determinação da condição de desgaste da ferramenta de corte via monitoramento de vibração e inteligência artificial**. 2018. 109 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia
- CAGGIANO, A., ANGELONE, R., NAPOLITANO, F., NELE, L., TETI, R. Dimensionality reduction of sensorial features by principal component analysis for ANN machine learning in tool condition monitoring of CFRP drilling. **Procedia CIRP**, v. 78, p. 307–312, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.072>

CAROU, D., RUBIO, E. M., LAURO, C. H., BRANDÃO, L. C., DAVIM, J. P. Study based on sound monitoring as a means for superficial quality control in intermittent turning of magnesium workpieces. **Procedia CIRP**, v. 62, p. 262–268, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.061>

CERVELIN, J. E. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento.** 2009. 123 f. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CHERN, G. L. Study on mechanisms of burr formation and edge breakout near the exit of orthogonal cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 176, p. 152-157, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.127>

EGLES, J. M. **Automação da medição de forças e vibrações no torneamento com plataforma em LABVIEW.** 2017. 57 f. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FANG, N., SRINIVASA, P., MOSQUEA, S. The effect of built-up edge on the cutting vibrations in machining 2024-T351 aluminum alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, p. 63–71, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2394-z>

FERRARESI, C. A. P. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 474 p.

FILIPPOV, A. V., NIKONOV, A. Y., RUBTSOV, V. E., DMITRIEV, A. I., TARASOV, S. Y. Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peak less tool turning: experiment and modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 246, p. 224–234, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030>

HONGYU, K., SANDANIELO, V. L. M., OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise por Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83–90, 2016. <https://doi.org/10.18607/ES201653398>

JOSHI, k., PATIL, B. Prediction of surface roughness by machine vision using principal components-based regression analysis. **Procedia Computer Science**, v. 167, p. 382–391, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.242>

- KATIYAR, S., JAISWAL, M., NARAIN, R. P., SINGH, S., SHRIVASTAVA, Y.A short review on investigation and suppression of tool charter in turning operation. **Materials Today: Proceedings**, v. 51, p. 1206–1210, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.208>
- KUMAR, J., VERMA, R. K. A novel methodology of combined compromise solution and principal component analysis (CoCoSo-PCA) for machinability investigation of graphene nanocomposites. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 33, p. 143–157, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.007>
- KÜMMEL, J., BRAUN, D., GIBMEIER, J., SCHNEIDER, J., GREINER, C., SCHULZE, V., WANNER, A. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 215, p. 62–70, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.032>
- LAGHARI, R. A., MEKID, S. Comprehensive approach toward IIoT based condition monitoring of machining processes. **Measurement**, v. 217, p. 113004, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113004>
- LIU, X., VAN ESPEN, P., ADAMS, F., YAN, S. H., VANBELLE, M. Classification of Chinese tea samples according to origin and quality by principal component techniques. **Analytica Chimica Acta**, v. 200, p. 421–430, 1987. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)83788-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)83788-5)
- MACHADO, A. M. **Aplicação da transformada wavelet no monitoramento de sinais de vibração em rolamentos.** 2014. Dissertação de mestrado, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Metais.** Editora Edgard Blücher: São Paulo, 2009.
- MARTINS, M. L., MAGALHÃES JÚNIOR, P. A. A., SILVA, G. C., ALMEIDA, V. C., MARTINS, N., MACIEL, D. C., CAMPOS, T. R. Estudo da aplicação da FFT (Fast Fourier Transform) em análise da condição de máquinas rotativas. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 2, n. 23, p. 125–144, 2017.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada.** 1. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 295 p.

MORAES, Francisco José Vicente de. **Teoria wavelet aplicada à análise de vibrações**. 1996. 109 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.

MORENO, D. A. N., Dispositivos de interrupción súbita (DIS) para el análisis de raíces de viruta. **Investigación e Innovación en Ingenierías**, v. 2, p. 15–23, 2014. <https://doi.org/10.17081/invinno.2.2.2046>

OZTURK, S., ALTAN, E. Design of a computer aided quick-stop device for study of dead metal zone formation. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, p. 501–505, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000400011>

PALMAI, Z., CSERNÁK, G. Effects of built-up edge-induced oscillations on chip formation during turning. **Journal of Sound and Vibration**, v. 332, p. 2057–2069, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.08.015>

PAPANDREA, P. J., FRIGIERI, E. P., MAIA, P. R., OLIVEIRA, L. G., PAIVA, A. P. Surface roughness diagnosis in hard turning using acoustic signals and support vector machine: A PCA-based approach. **Applied Acoustics**, v. 159, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107102>

PARIS, D., PIVOTTO, L. B., VENTURA, C. E. H., ANTONIALLI, A. I. S. Influence of built-up edge on the surface topography of Ti-15Mo. **Procedia CIRP**, v. 87, p. 137–141, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.098>

PEREIRA, R. B. D. **Influência do quebra-cavaco na dinâmica do torneamento do aço ABNT 1045**. 2011. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei.

PLAZA, E. G., LÓPEZ, P. J. N. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 98, p. 902–919, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.028>

POLIKAR, R. The Wavelet Tutorial. Rowan University, 2006. Disponível em: <<https://users.rowan.edu/~polikar/WTtutorial.html>>. Acesso em: 10 jan. 2025.

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

RAGAI, I., ABDALLA, A. S., ABDELTWAB, H., QIAN, F., MA, J. Toward smart manufacturing: analysis and classification of cutting parameters and energy consumption patterns in turning processes. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 626–635, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.016>

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 318 p.

SANTOS, J. V. L. de Oliveira. **Previsão de falhas em rolamentos utilizando aprendizado de máquina**. 2021. 87 f. Dissertação de mestrado, Instituto Federal de Minas Gerais, Betim.

SEGRETO, T., SIMEONE, A., TETI, R. Principal component analysis for feature extraction and NN pattern recognition in sensor monitoring of chip form during turning. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 7, p. 202–209, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.04.005>

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. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>

SILVA, A. C. T. Estudo de aplicações da transformada wavelet para eliminação de ruídos em processamento de som. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 37., 2017, Joinville. **Anais** [...]. Joinville: ENEGEP, 2017.

[https://doi.org/10.14488/ENEGET2017\\_TN\\_STO\\_238\\_381\\_30943](https://doi.org/10.14488/ENEGET2017_TN_STO_238_381_30943)

SONG, X., TAKAHASHI, Y., HE, W., IHARA, T. Study on the protective effect of built-up layer in dry cutting of stainless steel SUS304. **Precision Engineering**, v. 65, p. 138–148, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.05.010>

SUN, Z., SHUANG, F., MA, W. Investigations of vibration cutting mechanisms of Ti6Al4V alloy. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 148, p. 510–530, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.006>

SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. 2<sup>a</sup> ed. San Diego: California Technical Publishing, 1999. 628 p.

SWAIN, S., CHATTARJEE, S., PANIGRAHI, I., SAHOO, A. K. Cutting tool vibration analysis for better surface finish during dry turning of mild steel. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 24605–24611, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.258>

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 464 p. <https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

ZHANG, D., ZHANG, X., NIE, G., YANG, Z., DING, H. In situ imaging based thermo-mechanical analysis of built-up edge in cutting process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 71, p. 450–460, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.040>

## APÊNDICE I

Este apêndice apresenta os espectros do Ensaio 2 na direção do eixo Y, apresentados na Fig. 121. Conforme discutido na Seção 4.4.1, os “silêncios” observados no eixo Z também influenciam os sinais na direção Y. Quando o fragmento de APC coincide com um silêncio no sinal temporal, espera-se que o pico espectral próximo a 1840 Hz tenha menor amplitude em comparação às regiões adjacentes. Essa condição foi confirmada para as APCs 3 e 5, e parcialmente para a APC 1, cujo fragmento estava muito próximo ao silêncio. A APC 2, embora coincidente com um silêncio no tempo, não apresentou essa correlação no espectro de Y, mas sim no de Z, evidenciando o papel da orientação do sensor na direção de corte em Z. Já a APC 4, mesmo presente no cavaco, não apresentou silêncio e teve espectro semelhante ao das regiões A e B (sem fragmentos), com pico da região central mais elevado. Na direção Y, o critério do silêncio foi atendido em 60% dos fragmentos identificados no ensaio 2.

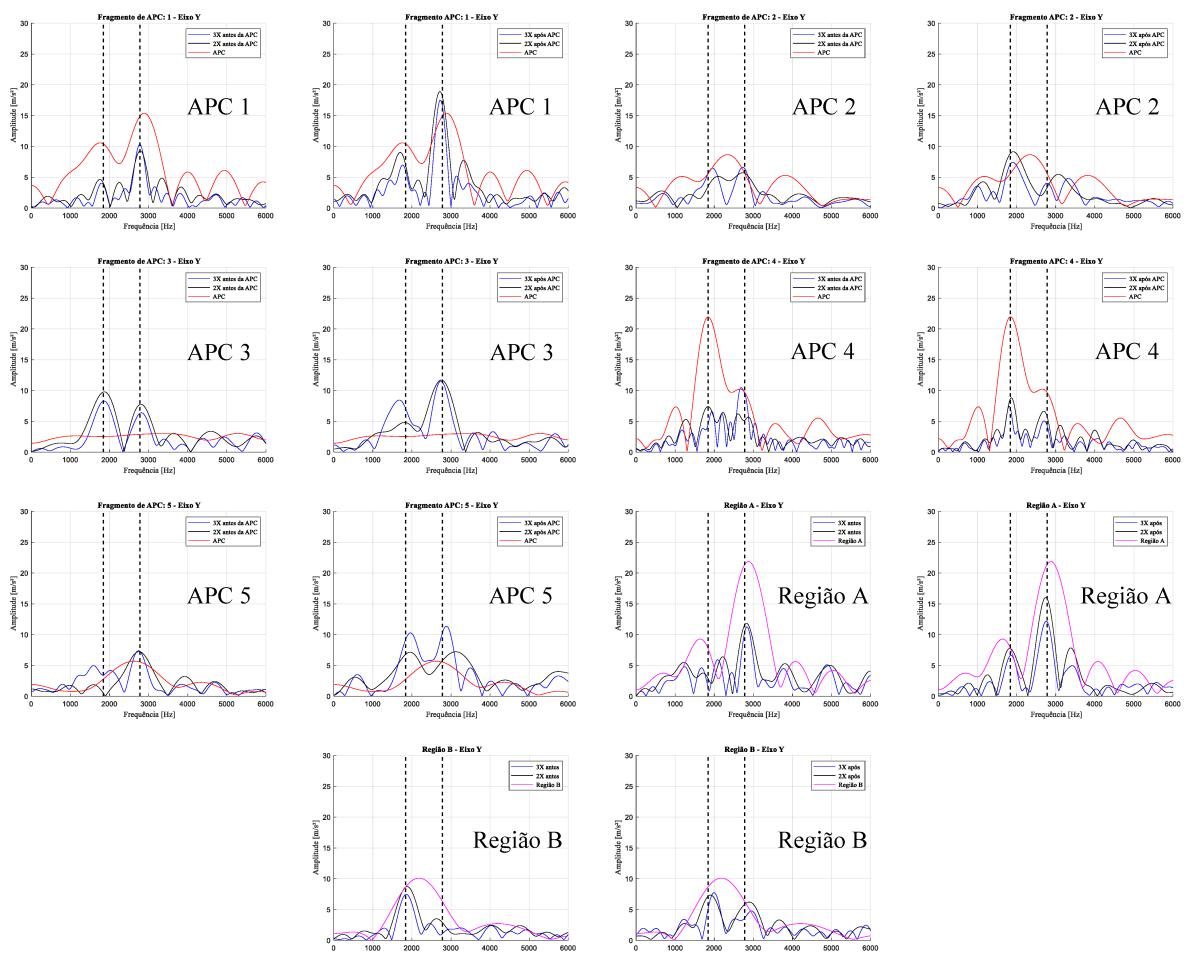


Figura 120 – Espectros (eixo Y) ao redor de fragmentos de APC e regiões sem APC – Ensaio 2. Zero padding – Resolução: 1 Hz.

## APÊNDICE II

A análise na direção Y para o Ensaio 11, cujos “silêncios” na direção Z foram discutidos na Seção 4.4.1, é apresentada no Apêndice II por meio dos espectros da Fig. 122. As APCs 2, 3 e 4 atenderam aos critérios de identificação, com picos espectrais inferiores aos das regiões adjacentes. As APCs 6 e 7 mostraram espectros compatíveis com fragmentos próximos aos trechos silenciosos, enquanto as APCs 1 e 5 não apresentaram características que indicassem silêncio em suas posições. As correlações com os fragmentos estão discutidas na Seção 4.4.1.

A taxa de correspondência para este ensaio foi de 71,4%, com base na análise espectral.

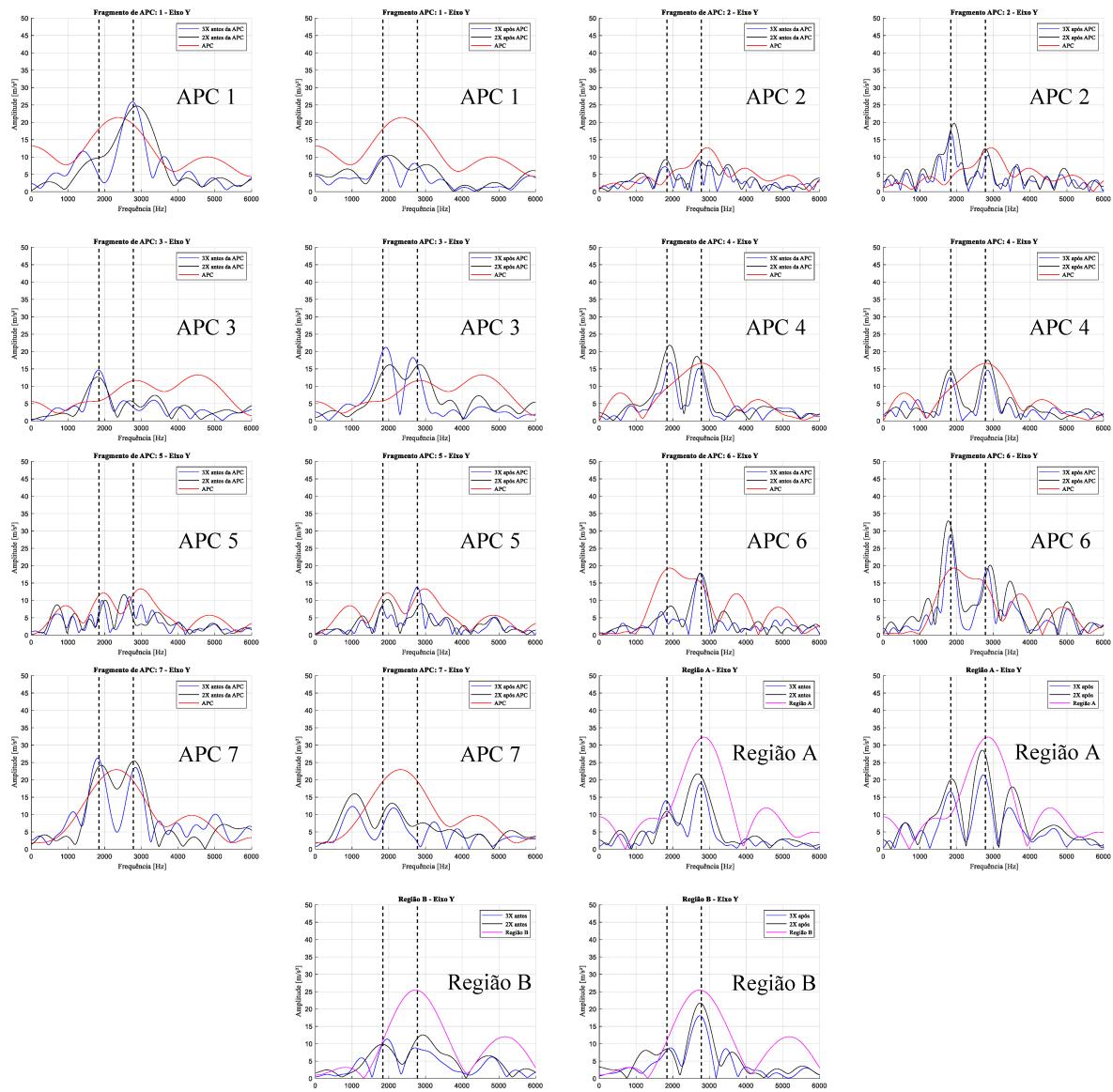


Figura 121 - Espectros (eixo Y) ao redor de fragmentos de APC e regiões sem APC – Ensaio 11. Zero padding – Resolução: 1 Hz.

### APÊNDICE III

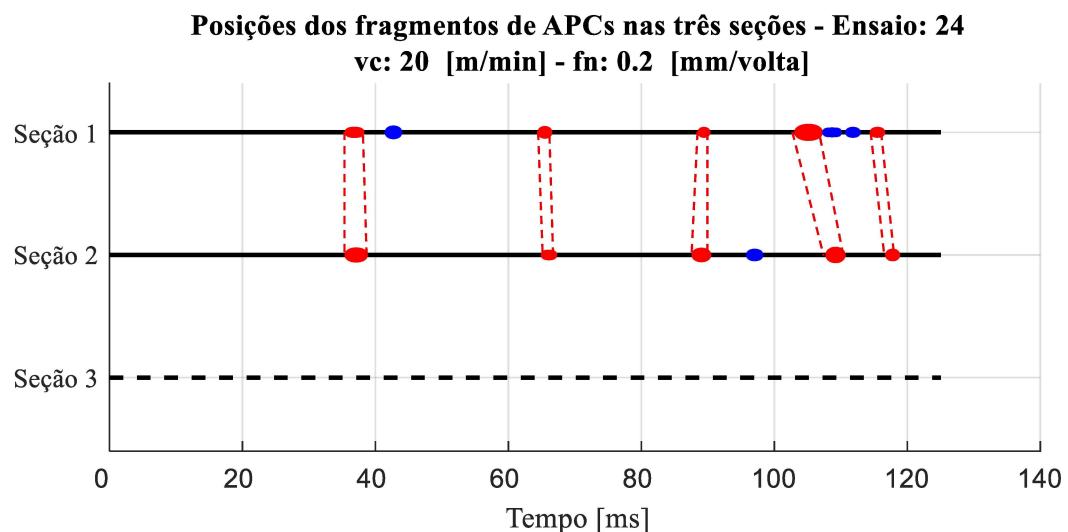


Figura 122 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 24 ( $v_c$ : 20 [m/min] e  $f_n$ : 0,2 [mm/volta]).

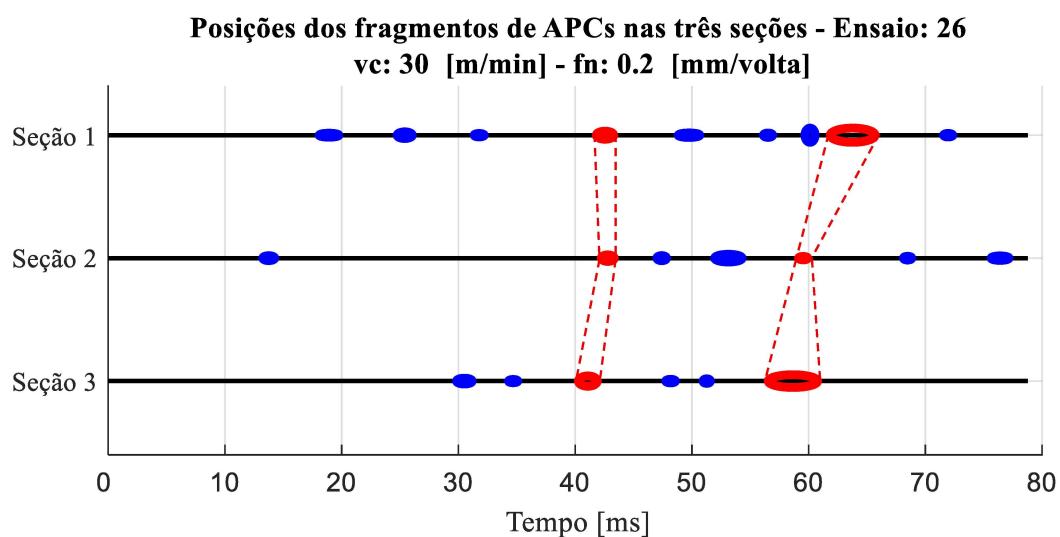


Figura 123 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 26 ( $v_c$ : 30 [m/min] e  $f_n$ : 0,2 [mm/volta]).

## APÊNDICE IV

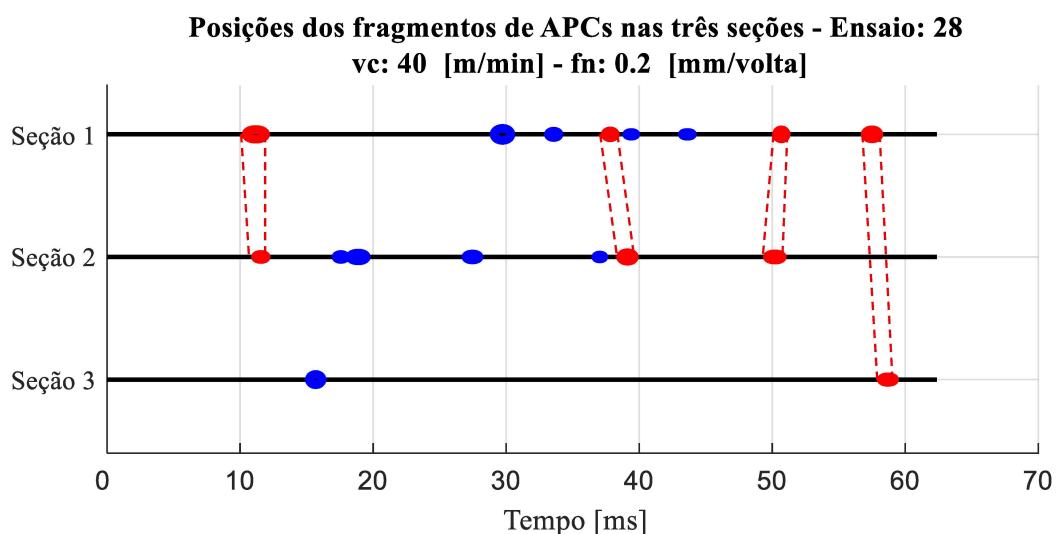


Figura 124 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 28 ( $v_c$ : 40 [m/min] e  $f_n$ : 0,2 [mm/volta]).

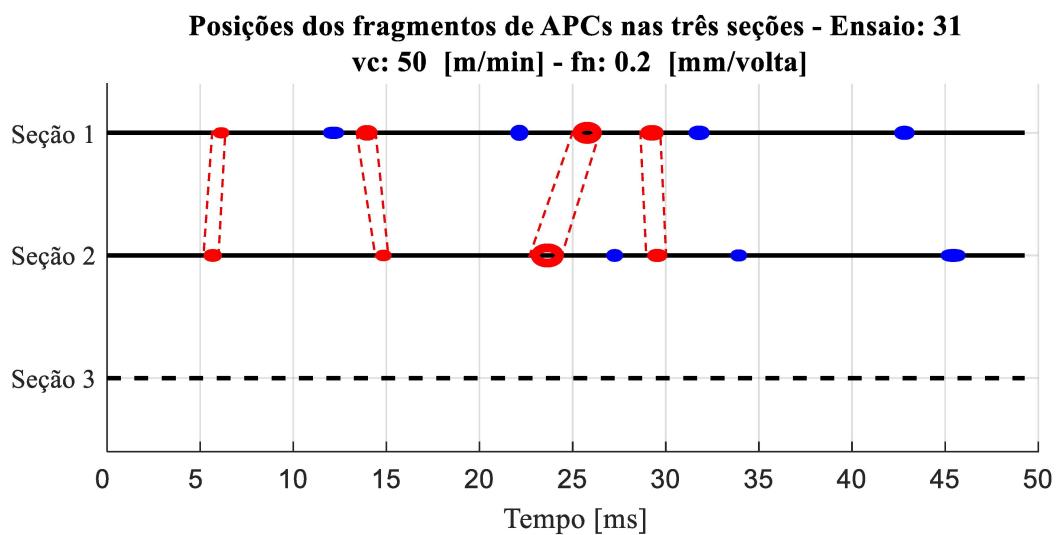


Figura 125 - Posições dos fragmentos de APCs nas três seções do cavaco obtido no ensaio 31 ( $v_c$ : 50 [m/min] e  $f_n$ : 0,2 [mm/volta]).