

**Universidade Federal de Minas Gerais**

Escola de Música

Programa de Pós Graduação em Música

Augusto Cesar Pereira Armondes

**A dinâmica da palhetada no violão: estudo quantitativo de  
quatro técnicas fundamentais**

Belo Horizonte

2025

Augusto Cesar Pereira Armondes

**A dinâmica da palhetada no violão: estudo quantitativo de quatro técnicas  
fundamentais**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Música da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Música, na linha de pesquisa Sonologia.

Orientador: Prof. Sérgio Freire

Belo Horizonte

2025

Armondes, Augusto Cesar Pereira.

A733d

A dinâmica da palhetada no violão [recurso eletrônico] : estudo quantitativo de quatro técnicas fundamentais / Augusto Cesar Pereira Armondes. - 2025.

1 recurso online (287 f.: il. color.) : pdf.

Orientador: Sérgio Freire Garcia.

Linha de pesquisa: Sonologia.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Música.

Bibliografia: f. 284-287.

1. Música - Teses. 2. Violão - Instrução e ensino. 3. Improvisação (Música). 4. Performance musical. I. Freire, Sérgio. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Música. III. Título.

CDD 787.607



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Tese defendida pelo aluno **Augusto César Pereira Armondes**, em 17 de dezembro de 2025, e aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

---

Prof. Dr. Sérgio Freire Garcia  
Universidade Federal de Minas Gerais  
(orientador)

---

Prof. Dr. Guilherme Augusto Soares de Castro  
Universidade do Estado de Minas Gerais

---

Prof. Dr. Gustavo Frederico Bracher e Silva  
Instituto Federal de Minas Gerais

---

Prof. Dr. Tairone Nunes Magalhães  
Instituto Kunumi

---

Prof. Dr. Hani Camille Yehia  
Universidade Federal de Minas Gerais



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Freire Garcia, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Augusto Soares de Castro, Usuário Externo**, em 21/12/2025, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tairone Nunes Magalhaes, Usuário Externo**, em 24/12/2025, às 12:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hani Camille Yehia, Professor do Magistério Superior**, em 13/01/2026, às 09:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Frederico Bracher e Silva, Usuário Externo**, em 15/01/2026, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4767978** e o código CRC **2B3BA4E2**.

---

## AGRADECIMENTO

O desenvolvimento deste trabalho só foi possível graças ao apoio de pessoas que reconhecem a relevância da educação e da pesquisa como elementos fundamentais para o crescimento humano e para a transformação da sociedade.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Orlando e Nádia, pelo lar acolhedor, pelo amor e pelo incentivo aos estudos. Obrigado por me permitir ser dono das minhas próprias escolhas, amparado pelos seus conselhos e apoio incondicional.

À minha esposa Camila e meu filho Bruno, meu porto seguro, por me propiciar os mais belos momentos que a vida pode oferecer. Vocês são a luz que ilumina nosso futuro.

Aos meus irmãos Vítor, Otávio e Larissa, pelas influências, descobertas e renovação.

À Dora, Nélio e Rodrigo, pelo acolhimento, cuidados e apoio.

Ao Professor Sérgio Freire, pela orientação, conhecimentos e por acreditar neste trabalho, colaborando com toda atenção e cuidado.

Aos professores da UFMG, amigos do curso de Música e Popular e do LaPIS, com os quais aprendi muito além das paredes das salas. Em especial ao Marcus Vinícius, Thiago, Lucas, João Gabriel, Paulo e Renato, pela contribuição fundamental nesta pesquisa.

Aos amigos de Ibiá, BH, Ouro Preto e República Aquarius, pelas conversas, incentivos e preocupações.

À CAPES, pelo investimento e por fomentar a pesquisa no Brasil, tão importante para o avanço do país.

Finalmente, à UFMG e à Escola de Música, pelo ensino gratuito e de qualidade.

*"O improviso é uma questão de beleza e paciência:  
se der certo, beleza;  
se não, paciência"*

Arismar do Espírito Santo

## RESUMO

A palhetada no violão e na guitarra é amplamente utilizada em diferentes contextos, sendo o fundamento técnico básico de mão direita em diversos estilos musicais. Estudos sistemáticos sobre seu ensino e utilização são escassos na literatura e, na maioria dos casos, seu aprendizado se dá de maneira informal. A pesquisa realizada na tese estudou quatro técnicas fundamentais de palhetada com uma abordagem multimodal, combinando informações sonoras, gestuais e de força, com suporte de imagens. Foi realizado um estudo quantitativo exploratório que buscou identificar características comuns e específicas tanto entre as condições de estudo selecionadas quanto entre os participantes. Um primeiro experimento focou nas seguintes técnicas: strumming, palhetada alternada e sweep picking, em dois andamentos distintos. O segundo experimento se concentrou no tremolo, em quatro condições de execução. Cada estudo contou com cinco participantes, sendo quatro comuns aos dois experimentos. Utilizou-se um setup portátil constituído por um violão com captação hexafônica desenvolvido em nosso laboratório, um sensor de medida inercial sem fio posicionado no dorso da mão, dois resistores sensíveis à força aplicada em cada lado da palheta, uma câmera de vídeo acoplada ao instrumento. A análise dos dados evidencia a utilização de estratégias gestuais distintas na realização das diferentes técnicas, além de indicar características individuais dos participantes. Esta análise, combinada com os dados de áudio — amplitude, espaçamento entre ataques, centroide espectral —, demonstrou uma grande variedade de modos de realização, influenciadas pela formação e experiência individual dos participantes. Esses resultados podem contribuir para uma revisão crítica de certos conceitos e práticas de estudo, ao destacar elementos comuns e particularidades encontradas em um contexto de performance controlada.

Palavras-chave: Strumming, Palhetada Alternada, Sweep Picking, Tremolo, Multimodalidade.

## ABSTRACT

Picking on the guitar is widely used in different musical contexts, constituting the basic right-hand technical foundation in a variety of styles. Systematic studies on the teaching and use are scarce in the literature, and in most cases, the learning occurs informally. The research conducted in this doctoral thesis investigated four fundamental picking techniques through a multimodal approach that combined sonic, gestural and force information, supported by video recordings. An exploratory quantitative study was carried out to identify both common and specific characteristics among the selected experimental conditions and participants. The first experiment focused on the techniques of strumming, alternate picking and sweep picking, performed at two different speeds. The second experiment concentrated on the tremolo technique, under four performance conditions. Each study involved five participants, four of whom were common to both experiments. A portable setup was used, consisting of a guitar with a hexaphonic pickup system developed in our laboratory, a wireless inertial measurement sensor placed on the dorsum of the hand, two force-sensitive resistors mounted on each side of the pick, and a video camera attached to the instrument. Data analysis revealed the use of distinct gestural strategies in the execution of the different techniques, as well as individual characteristics among the participants. This analysis, combined with audio data — amplitude, inter-attack spacing, and spectral centroid — demonstrated a wide variety of performance modes, influenced by each participant's training and individual experience. These results may contribute to a critical reassessment of certain pedagogical concepts and practice methods, by highlighting both common elements and individual particularities observed in a controlled performance context.

Keywords: Strumming, Alternate Picking, Sweep Picking, Tremolo, Multimodality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sensor de movimento MetaMotionR, da empresa MBientLab. ....	51
Figura 2	As direções positivas da aceleração linear e velocidade angular em cada eixo com a posição no IMU.....	52
Figura 3	Esfera com zonas positivas e negativas para os eixos principais (x, y e z), as regiões de influência de cada eixo e categorias. ....	53
Figura 4	Posição do sensor na mão com o instrumento. Cada figura indica a orientação sentido positivo de cada eixo. ....	54
Figura 5	Diferentes tipos de resistores sensíveis a força (FSR). ....	55
Figura 7	Setup utilizado na coleta de dados do experimento .....	59
Figura 8	Estrutura dos dados coletados e processados no ambiente Matlab. ....	61
Figura 9	Visualização do áudio em seis canais registrado pela captação hexafônica. ....	61
Figura 10	Visualização do áudio com os seis canais mixados de um take de palhetada alternada, duas notas por corda em 100 bpm. ....	62
Figura 11	Curvas geradas pelos FSR no polegar e indicador, com exemplos das três técnicas do estudo. ....	62
Figura 12	Acelerações lineares, velocidades angulares e ângulos de Euler correspondentes ao primeiro compasso de um trecho de palhetada alternada, com três notas por corda a 60 bpm. ....	63
Figura 13	Variação dos ângulos de Euler de todos os músicos, em um take de cada condição de estudo .....	64
Figura 14	Médias dos valores positivos e negativos das acelerações lineares (M1) e velocidades angulares (M3), em um take de cada técnica. ....	65
Figura 15	Contribuições individuais de cada eixo (peso) e os fatores de explicação (%) dos dois primeiros componentes principais das acelerações lineares, contendo todos os takes de um participante do experimento 1.....	66
Figura 16	Contribuições individuais de cada eixo (peso) e os fatores de explicação (%) dos dois primeiros componentes principais das velocidades angulares, contendo todos os takes de um participante do experimento 1....	67

Figura 17	IOIs calculados na técnica de palhetada alternada 1 nota por corda, em 60 bpm, realizado pelos cinco performes.....	67
Figura 18	Módulos de aceleração linear e velocidade angular obtidos por um take de strumming, a 60 bpm.....	68
Figura 19	Picos, amplitude e direção obtidos por um take de sweep picking com 6 cordas, a 100 bpm.....	69
Figura 20	Configuração padrão de gráficos integrando as informações obtidas pelas diferentes fontes de dados do estudo. ....	70
Figura 21	Variação de apresentação dos dados integrados no gráfico padrão.....	71
Figura 22	Gráfico do tipo boxplot, no qual identificamos: a mediana em vermelho; a variabilidade dos dados na caixa em azul; valores máximo e mínimos pelas hastes; valores atípicos (+). ....	72
Figura 23	Partitura do ritmo proposto no estudo da técnica de <i>strumming</i> .....	74
Figura 24	Partituras de palhetadas alternadas utilizando 1, 2, 3 e 4 notas por corda .....	75
Figura 25	Partitura para a técnica de <i>sweep picking</i> utilizando 5 e 6 cordas .....	76
Figura 26	Pegada da palheta do Músico 1 .....	76
Figura 27	Pegada da palheta do Músico 2 .....	77
Figura 28	Pegada da palheta do Músico 3 .....	78
Figura 29	Pegada da palheta do Músico 4 .....	78
Figura 30	Pegada da palheta do Músico 5 .....	79
Figura 31	Valor de variação dos ângulos de Euler por eixo, de todos os músicos em todas as técnicas. ....	80
Figura 32	Média valores positivos e negativos de aceleração linear de todas amostras, de todos os músicos. ....	81
Figura 33	Média valores positivos e negativos de velocidade angular de todas amostras, de todos os músicos.....	82
Figura 34	PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das acelerações lineares em todos os trechos, por todos os músicos.....	83
Figura 35	PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das velocidades angulares em todos os trechos, por todos os músicos.....	84

Figura 36	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1. ....	87
Figura 37	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1. ....	87
Figura 38	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1. ....	88
Figura 39	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2. ....	88
Figura 40	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2. ....	89
Figura 41	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2. ....	89
Figura 42	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3. ....	90
Figura 43	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3. ....	90
Figura 44	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3. ....	91
Figura 45	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3. ....	91

Figura 46	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4. ....	92
Figura 47	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4. ....	92
Figura 48	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4. ....	93
Figura 49	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4. ....	93
Figura 50	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5. ....	94
Figura 51	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5. ....	94
Figura 52	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5. ....	95
Figura 53	Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda. ....	95
Figura 54	Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda. ....	96
Figura 55	Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda. ....	97
Figura 56	Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda. ....	97

Figura 57	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.....	99
Figura 58	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.....	99
Figura 59	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.....	100
Figura 60	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.....	100
Figura 61	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.....	101
Figura 62	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.....	101
Figura 63	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.....	102
Figura 64	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.....	102
Figura 65	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.....	103
Figura 66	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.....	104

Figura 67	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.....	104
Figura 68	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.....	105
Figura 69	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.....	105
Figura 70	Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda. ....	106
Figura 71	Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda. ....	107
Figura 72	Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda. ....	107
Figura 73	Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda.....	108
Figura 74	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.....	110
Figura 75	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.....	110
Figura 76	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.....	111
Figura 77	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.....	111

Figura 78	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3. ....	112
Figura 79	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3. ....	113
Figura 80	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4. ....	113
Figura 81	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4. ....	114
Figura 82	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5. ....	115
Figura 83	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5. ....	115
Figura 84	Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda. ....	116
Figura 85	Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda. ....	116
Figura 86	Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda. ....	117
Figura 87	Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda. ....	117
Figura 88	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1. ....	119

Figura 89	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.....	120
Figura 90	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2. ....	120
Figura 91	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2. ....	121
Figura 92	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.....	121
Figura 93	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3. ....	122
Figura 94	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.....	123
Figura 95	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4. ....	123
Figura 96	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4. ....	124
Figura 97	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.....	124
Figura 98	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.....	125

Figura 99	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5. ....	126
Figura 100	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5. ....	126
Figura 101	Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda. ....	127
Figura 102	Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda. ....	127
Figura 103	Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda. ....	128
Figura 104	Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda. ....	128
Figura 105	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1. ....	131
Figura 106	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1. ....	132
Figura 107	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2. ....	132
Figura 108	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2. ....	133
Figura 109	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3. ....	134

Figura 110	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3. ....	134
Figura 111	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3. ....	135
Figura 112	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3. ....	135
Figura 113	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4. ....	136
Figura 114	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4. ....	137
Figura 115	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5. ....	138
Figura 116	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5. ....	138
Figura 117	Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com cinco cordas. ....	139
Figura 118	Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com cinco cordas. ....	139
Figura 119	Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com cinco cordas. ....	140
Figura 120	Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com cinco cordas. ....	140

Figura 121	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1. ....	143
Figura 122	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1. ....	143
Figura 123	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2. ....	144
Figura 124	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2. ....	144
Figura 125	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3. ....	145
Figura 126	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3. ....	146
Figura 127	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3. ....	146
Figura 128	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4. ....	147
Figura 129	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4. ....	147
Figura 130	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4. ....	148

Figura 131	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5. ....	149
Figura 132	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5. ....	149
Figura 133	Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com seis cordas. ....	150
Figura 134	Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com seis cordas. ....	150
Figura 135	Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com seis cordas. ....	151
Figura 136	Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de <i>sweep picking</i> com seis cordas. ....	152
Figura 137	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 1 por M1. ....	155
Figura 138	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 1 por M1. ....	155
Figura 139	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 2 por M2. ....	156
Figura 140	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 2 por M2. ....	156
Figura 141	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 1 por M3. ....	157

Figura 142	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 1 por M3. ....	157
Figura 143	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 2 por M4. ....	158
Figura 144	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 1 por M4. ....	158
Figura 145	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 1 por M5. ....	159
Figura 146	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 1 por M5. ....	159
Figura 147	Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de <i>strumming</i> . ....	160
Figura 148	Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de <i>strumming</i> . ....	161
Figura 149	Pegada da palheta do Músico 6. ....	167
Figura 150	Valor de variação dos ângulos de Euler por eixo, de todos os músicos na técnica de tremolo. ....	169
Figura 151	Média dos valores positivos e negativos de aceleração linear de todos os músicos na técnica de tremolo. ....	169
Figura 152	Média valores positivos e negativos de velocidade angular de todos os músicos na técnica de tremolo. ....	170
Figura 153	PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das acelerações lineares da técnica de tremolo, por todos os músicos. ....	171
Figura 154	PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das velocidades angulares da técnica de tremolo, por todos os músicos. ....	171
Figura 155	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M1. ....	173

Figura 156	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M1.....	174
Figura 157	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M2.....	175
Figura 158	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M2.....	175
Figura 159	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M3.....	176
Figura 160	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M3.....	177
Figura 161	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M4.....	177
Figura 162	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M4.....	178
Figura 163	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M6.....	178
Figura 164	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M6.....	179
Figura 165	Boxplot com os IOIs de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1.....	180
Figura 166	Boxplot com as amplitudes de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1. ....	180
Figura 167	Boxplot do centroide espectral de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1. ....	181
Figura 168	Boxplot das intensidades de aceleração linear de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1. ....	181
Figura 169	Boxplot das intensidades dos picos de velocidade angular de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1. ....	182
Figura 170	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M1.....	183
Figura 171	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M1.....	183

Figura 172	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M2.....	184
Figura 173	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M2.....	185
Figura 174	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M3.....	185
Figura 175	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M3.....	186
Figura 176	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M4.....	187
Figura 177	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M4.....	187
Figura 178	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M6.....	188
Figura 179	Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M6.....	188
Figura 180	Boxplot do centroide espectral de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4. ....	189
Figura 181	Boxplot da aceleração linear de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4. ....	189
Figura 182	Boxplot da velocidade angular de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4. ....	190
Figura 183	Boxplot das amplitudes de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4.....	190
Figura 184	Boxplot dos valores de IOI de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4. ....	191
Figura 185	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M1.....	193
Figura 186	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M1.....	194
Figura 187	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M2.....	195

Figura 188	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M2.....	195
Figura 189	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M3.....	196
Figura 190	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M3.....	196
Figura 191	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M4.....	197
Figura 192	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M4.....	197
Figura 193	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M6.....	198
Figura 194	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M6.....	199
Figura 195	Boxplot das amplitudes sonoras de todos os músicos no tremolo progressivo corda 1.....	199
Figura 196	Boxplot do centroide espectral de todos os músicos no tremolo progressivo corda 1.....	200
Figura 197	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M1.....	201
Figura 198	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M1.....	202
Figura 199	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M2.....	202
Figura 200	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M2.....	203
Figura 201	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M3.....	204
Figura 202	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M3.....	204
Figura 203	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M4.....	205

Figura 204	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M4.....	205
Figura 205	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M6.....	206
Figura 206	Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M6.....	206
Figura 207	Boxplot da amplitude sonora de todos os músicos no tremolo progressivo corda 4. ....	207
Figura 208	Boxplot do centroide de todos os músicos no tremolo progressivo corda 4. ....	207
Figura 209	Ângulos de Euler de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo. ....	212
Figura 210	Máximos e mínimos da aceleração linear de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.	213
Figura 211	Máximos e mínimos da velocidade angular de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.	213
Figura 212	PCA da aceleração linear de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo. ....	214
Figura 213	PCA da velocidade angular de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo. ....	214
Figura 214	Amplitudes de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo. ....	215
Figura 215	Iois de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo. ....	215
Figura 217	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.....	227
Figura 218	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.....	228

Figura 219	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.....	228
Figura 220	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.....	229
Figura 221	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.....	229
Figura 222	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.....	230
Figura 223	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.....	230
Figura 224	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.....	231
Figura 225	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.....	231
Figura 226	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.....	232
Figura 227	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.....	232
Figura 228	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.....	233

Figura 229	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.....	233
Figura 230	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.....	234
Figura 231	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.....	234
Figura 232	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.....	235
Figura 233	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.....	235
Figura 234	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.....	236
Figura 235	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.....	236
Figura 236	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.....	237
Figura 237	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.....	237
Figura 238	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.....	238

Figura 239	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.....	238
Figura 240	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.....	239
Figura 241	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.....	239
Figura 242	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.....	240
Figura 243	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.....	240
Figura 244	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.....	241
Figura 245	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.....	241
Figura 246	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.....	242
Figura 247	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.....	242
Figura 248	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.....	243

Figura 249	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.....	243
Figura 250	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.....	244
Figura 251	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.....	244
Figura 252	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.....	245
Figura 253	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.....	245
Figura 254	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.....	246
Figura 255	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.....	246
Figura 256	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.....	247
Figura 257	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.....	247
Figura 258	Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>sweep picking</i> com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.....	248

Figura 259	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 2 por M1. ....	248
Figura 260	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 2 por M1. ....	249
Figura 261	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 1 por M2. ....	249
Figura 262	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 1 por M2. ....	250
Figura 263	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 2 por M3. ....	250
Figura 264	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 100 bpm, no take 2 por M3. ....	251
Figura 265	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 1 por M4. ....	251
Figura 266	Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de <i>strumming</i> , realizado a 60 bpm, no take 2 por M5. ....	252

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Relação entre a direção nos eixos e o número da categoria .....	52
----------	---	----

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	34
1.1	Motivação .....	35
1.2	Objetivos .....	37
1.3	Estrutura Da Tese .....	37
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	39
2.1	Técnica Instrumental .....	39
2.2	Ritmo e Microtempo .....	41
2.3	Análise Quantitativa da Performance .....	43
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	45
3.1	Design dos Experimentos .....	45
3.2	Ferramentas .....	48
3.2.1	Violão GuiaRT .....	48
3.2.1.1	Extração de onsets, amplitudes e centroide espectral .....	48
3.2.2	Unidade de medição inercial (IMU) .....	50
3.2.3	Resistor sensível à força (FSR) .....	55
3.2.4	Captação de vídeo .....	56
3.3	Coleta de Dados .....	58
3.3.1	Visualização dos dados .....	60
3.3.1.1	Dados originais .....	60
3.3.1.2	Dados processados .....	63
3.3.1.3	Integração dos dados .....	69
4	<b>PRIMEIRO EXPERIMENTO</b> .....	74
4.1	Resultados .....	79
4.1.1	Análise gestual global .....	79
4.1.2	Análise por técnica .....	85
4.1.2.1	Palhetada alternada .....	85
	4 notas por corda .....	86
	3 notas por corda .....	98

	2 notas por corda.....	109
	1 nota por corda.....	118
	4.1.2.2 <i>Sweep picking</i> .....	130
	5 cordas .....	130
	6 cordas .....	142
	4.1.2.3 <i>Strumming</i> .....	153
	4.2 Discussão.....	162
5	<b>SEGUNDO EXPERIMENTO</b> .....	166
5.1	Resultados .....	168
5.1.1	Análise Gestual Global .....	168
5.1.2	Análise Por Corda .....	172
5.1.2.1	Tremolo Direto.....	172
	Tremolo Direto Corda 1 .....	173
	Tremolo Direto Corda 4 .....	182
5.1.2.2	Tremolo Progressivo .....	192
	Tremolo Progressivo na Corda 1 .....	193
	Tremolo Progressivo na Corda 4 .....	201
5.2	Discussão.....	209
6	<b>DISCUSSÃO GERAL</b> .....	211
7	<b>CONCLUSÕES</b> .....	217
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	219
	Apêndices .....	221
A	<b>IMU</b> .....	221
B	<b>FSR</b> .....	225
C	<b>FIGURAS</b> .....	227
D	<b>GUIART</b> .....	253

## 1 INTRODUÇÃO

No estudo instrumental, o desenvolvimento de técnicas que possibilitam ao músico ampliar seu vocabulário sonoro — e, por consequência, suas possibilidades interpretativas — ocorre, em geral, de maneira gradual e ao longo de diferentes estágios de aprendizagem. O primeiro desses estágios corresponde ao contato inicial com determinada técnica, momento em que os aspectos gestuais e sonoros ainda não estão plenamente internalizados pelo performer. Nessa fase, o estudo concentra-se predominantemente na repetição sistemática, visando à consolidação daquilo que Shearer (1990) denomina memória muscular. Trata-se do processo de automatização dos gestos finos essenciais à execução, permitindo que tais ações se tornem progressivamente naturalizadas.

Em um estágio subsequente, após a assimilação inicial dos elementos que compõem a técnica, ocorre o que Ericsson (1993) define como prática deliberada. Nesse contexto, o músico adota um regime de treino intencional e planejado, direcionado especificamente à identificação e ao aprimoramento de pontos fracos. Esse processo implica, com frequência, a reavaliação minuciosa de gestos que possam comprometer a eficiência da execução, exigindo, por vezes, a modificação de padrões motores previamente consolidados. Em determinadas situações, isso pode significar um retorno a etapas básicas do aprendizado, a fim de reconstruir a técnica sobre bases mais sólidas.

Superada essa fase de ajustes e refinamentos, é comum emergir uma sensação de estagnação no progresso. Tal percepção decorre, em parte, da expectativa equivocada de que o desenvolvimento técnico seja sempre progressivo e linear. A literatura sobre aprendizagem motora demonstra, entretanto, que após um período inicial de ganhos rápidos, o aprendiz tende a entrar em platôs de desenvolvimento, nos quais cada nova melhoria demanda um esforço substancialmente maior. Modelos clássicos de aprendizagem, como os propostos por Fitts e Posner (1967) e aprofundados por Schmidt e Lee (2014), indicam que tal desaceleração é característica de níveis avançados de expertise e frequentemente acompanhada por frustração, uma vez que o músico se depara com limites que exigem estratégias mais refinadas de estudo e tempo para serem superados.

Dentro desse contexto de busca por aprimoramento técnico, a abordagem multimodal torna-se particularmente relevante, pois permite elucidar componentes das técnicas instrumentais que são complementares ao resultado sonoro. Para além dos parâmetros

tradicionalmente analisados — como ritmo e timbre —, a evolução tecnológica e o acesso a ferramentas capazes de quantificar gestos, forças, fluxos de ar e outras variáveis corporais e acústicas possibilitam uma compreensão mais ampla e integrada do processo de execução. Esse olhar expandido fornece ao músico um tipo de feedback antes inacessível, contribuindo de forma substancial para a prática deliberada ao oferecer informações precisas sobre aspectos motores e dinâmicos que influenciam a técnica.

Nesse sentido, o presente estudo se insere justamente nessa perspectiva: contribuir para o entendimento e o desenvolvimento de técnicas instrumentais a partir do prisma da multimodalidade. Ao integrar dados sonoros, gestuais e de força, busca-se oferecer uma análise mais abrangente dos processos envolvidos na execução, evidenciando aspectos que, embora fundamentais para a performance, frequentemente permanecem invisíveis ao método tradicional de estudo. Assim, esta pesquisa pretende não apenas descrever padrões técnicos, mas também ampliar as possibilidades de reflexão e intervenção no processo de formação musical.

## 1.1 Motivação

O desenvolvimento técnico do uso da palheta em instrumentos como o violão e a guitarra implica desafios relevantes, tanto para estudantes quanto para músicos experientes. Na própria experiência de estudo, as dificuldades encontradas no aprimoramento das técnicas de palhetada suscitaram questionamentos acerca da eficácia dos métodos tradicionais de ensino e das abordagens presentes em materiais didáticos. De modo geral, observa-se que a ênfase costuma recair predominantemente sobre o resultado sonoro, com menor atenção dedicada ao detalhamento dos movimentos gestuais, das forças aplicadas na palheta e de sua interação com o instrumento. Frequentemente, as instruções são orientadas por perspectivas idiossincráticas do professor, o que deixa lacunas importantes no entendimento de como a palhetada pode ser adaptada, otimizada e compreendida em diferentes contextos performáticos.

Esses questionamentos acerca das metodologias de ensino e estudo da palhetada ganharam profundidade durante a participação em um projeto de iniciação científica na graduação em Música Popular pela UFMG, voltado à pesquisa em tecnologia musical. Entre os temas desenvolvidos pelo grupo, destacou-se o projeto de um violão com captação hexafônica capaz de extrair, em tempo real, informações detalhadas de cada corda indi-

vidualmente. Esse instrumento — posteriormente denominado GuiaRT (abreviação de real-time guitar) — rapidamente se tornou o eixo central do projeto e vem sendo aprimorado continuamente desde então. Na configuração atual, o GuiaRT apresenta estabilidade e robustez suficientes para sua aplicação em diferentes contextos de investigação musical. Em trabalho recente publicado em inglês (FREIRE; ARMONDES; SILVA, 2021), descrevemos detalhadamente o sistema e suas possibilidades, cuja tradução é incluída como apêndice desta tese, ampliando o acesso ao conteúdo.

Embora originalmente concebido para sistemas musicais interativos, o GuiaRT revelou, ao longo do processo de pesquisa, um potencial significativo para análises quantitativas de técnicas de palhetada. Em particular, seus dados de onset, amplitude e centroide espectral oferecem uma base objetiva para examinar os gestos técnicos envolvidos, se somando a estudos anteriores sobre plaqué e tremolo no violão (FREIRE; NÉZIO, 2013; FREIRE; NÉZIO; PIMENTA, 2012). A integração dessas informações com outras fontes de dados permitiu conceber um modelo mais abrangente de análise, alinhado com a abordagem multimodal proposta.

Outro ponto de referência importante foi o projeto *Cracking the Code*, idealizado por Grady (2006). A série propõe uma leitura detalhada das técnicas de palhetada a partir de gravações em alta taxa de quadros e análises minuciosas dos movimentos, evidenciando como ajustes sutis na gestualidade podem transformar a eficiência e a fluidez da execução. Embora voltada principalmente para a guitarra elétrica, essa proposta demonstra a relevância de integrar análise visual e gestual ao estudo técnico, aproximando-se dos princípios que norteiam esta pesquisa.

Por fim, uma motivação central para o desenvolvimento deste trabalho reside na possibilidade de quantificar aspectos gestuais, forças aplicadas na palheta e características rítmicas associados às técnicas de palhetada. Ao usar sensores de força (FSR), sensores de movimento (IMU) e o GuiaRT, torna-se viável estabelecer correlações entre gestos físicos e atributos musicais, como precisão rítmica, articulação e dinâmica. Essa abordagem não apenas amplia as ferramentas disponíveis para o ensino e a prática instrumental, como também favorece o desenvolvimento de uma linguagem técnica mais objetiva, capaz de apoiar processos pedagógicos e de aperfeiçoamento performático de maneira fundamentada e sistemática.

## 1.2 Objetivos

Objetivo geral: estudar a dinâmica da palhetada ao violão em diferentes técnicas

Objetivos específicos:

- estudar a dinâmica (movimentos e forças) das técnicas de palhetada mais usuais no violão/guitarra: alternada, strumming, sweep picking, tremolo;
- estudar as influências dos diferentes modos de execução na precisão rítmica;
- estudar as variações de execução das técnicas em diferentes velocidades, e em acelerandos;
- identificar características comuns e específicas de diferentes músicos;
- contribuir para a sistematização e renovação dos estudos de técnica de palheta a partir dos dados analisados.

## 1.3 Estrutura Da Tese

A seção inicial deste trabalho apresenta o referencial teórico que fundamenta a pesquisa, explorando as técnicas instrumentais de forma abrangente e contextualizando-as histórica e conceitualmente. Em seguida, o foco recai sobre uma análise das formas como os ritmos e os micro-tempos são percebidos e interpretados, concluindo em uma abordagem que integra análises quantitativas da performance.

Na sequência, a metodologia é apresentada com ênfase no delineamento dos experimentos realizados, incluindo a descrição das ferramentas desenvolvidas para a abordagem multimodal das técnicas de palheta e o processo de coleta de dados. São oferecidos exemplos detalhados de análise, tanto de dados brutos quanto de dados processados, para ilustrar a aplicação prática dos métodos adotados.

Os capítulos subsequentes detalham os dois experimentos que compõem este estudo. O primeiro experimento concentra-se no estudo das técnicas de palheta alternada, *sweep picking* e *strumming*. Nesta etapa, são descritos os trechos musicais selecionados, os músicos participantes e os resultados obtidos. Inicialmente, apresenta-se uma análise geral dos dados coletados, seguida por análises específicas para cada técnica, com a discussão dos resultados ao final dessa etapa.

O segundo experimento adota uma estrutura similar e aborda a técnica de tremolo em dois contextos distintos: o primeiro analisando a execução do tremolo diretamente em sua forma estabilizada, e o segundo investigando a progressão de um crescendo até alcançar um ponto de estabilidade. Os resultados obtidos e as respectivas discussões são apresentados na sequência.

Por fim, o trabalho é concluído com um capítulo dedicado à discussão geral dos resultados dos dois experimentos, integrando os achados e destacando suas implicações, e um capítulo que apresenta as conclusões, oferecendo uma síntese das contribuições do estudo e indicando possíveis caminhos para investigações futuras.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir as bases teóricas que sustentam esta pesquisa, organizando-se em três seções principais. Na primeira seção, apresentemos um breve panorama da técnica instrumental, considerando aspectos históricos, conceituais e práticos.

A segunda seção é dedicada à análise de conceitos e estudos relacionados à percepção de ritmos e micro-tempos. Nesta parte, discutiremos como essas dimensões temporais são entendidas e exploradas na prática musical e na pesquisa acadêmica, destacando trabalhos que oferecem subsídios relevantes para a compreensão das relações rítmicas e interpretativas.

Por fim, a terceira seção apresentará um panorama das pesquisas sobre análise quantitativa da performance musical, com ênfase na abordagem multimodal. Aqui, examinamos os métodos e ferramentas que integram diferentes modalidades de dados — como áudio, gestos e forças — para investigar aspectos complexos da execução musical, estabelecendo as bases para a aplicação dessas metodologias no contexto desta pesquisa.

### 2.1 Técnica Instrumental

A compreensão do desenvolvimento técnico instrumental passa, necessariamente, por uma discussão sobre a aquisição de habilidades do ponto de vista psicológico. Em *Psychology for Musicians: Understanding and Acquiring the Skills*, Lehmann (2007) destaca que o aprendizado musical é um processo complexo, envolvendo fatores cognitivos, motores e sociais. Embora a obra trate extensivamente de competências como composição e improvisação, o autor apresenta princípios gerais aplicáveis ao desenvolvimento técnico, entre eles a noção de que o aperfeiçoamento pleno de habilidades musicais demanda tempo e continuidade — frequentemente estimado em aproximadamente dez anos de prática deliberada.

Lehmann também enfatiza a importância dos contextos informais de aprendizagem, especialmente em gêneros como jazz, rock e música popular, nos quais músicos ensinam uns aos outros durante ensaios e sessões de improvisação. Nesses ambientes, processos como modelagem, experimentação e feedback entre pares substituem, parcialmente, a instrução formal individualizada.

Na introdução do livro, o autor apresenta questões fundamentais para o estudo da técnica instrumental, tais como: “Quanto e que tipo de prática são necessárias para alcançar fluência técnica em um instrumento?” e “Por que algumas performances apresentam resultados melhores do que outras?” Ao final, Lehmann argumenta que o ensino instrumental possui longa tradição na transmissão de habilidades altamente especializadas, apoiada em regras práticas e princípios derivados da experiência de professores experientes, que ajustam suas orientações às necessidades individuais de cada estudante.

Antes do surgimento da guitarra elétrica e da palhetada como técnica amplamente sistematizada, métodos dedicados ao violão já buscavam organizar princípios técnicos relacionados à postura, articulação e produção sonora. Oliveira (2020), em sua tese *A técnica violonística em expansão*, apresenta uma revisão histórica detalhada desses métodos, evidenciando a transformação contínua das abordagens pedagógicas ao longo dos séculos.

Entre os tratados fundamentais, destaca-se o Nuevo Método para Guitarra de Aguado et al. (1843), considerado um marco na sistematização da técnica violonística do século XIX. Complementarmente, Carlevaro, em sua *Escuela de la Guitarra* (1979), propõe uma abordagem mais analítica, centrada nos gestos e na economia de movimentos. Embora voltados ao toque com os dedos, esses tratados constituem bases essenciais para compreender como princípios técnicos passaram a ser organizados, descritos e transmitidos historicamente.

Com a consolidação da guitarra elétrica no século XX, surgem métodos dedicados explicitamente ao estudo da palhetada. Shearer, em *Classic Guitar Technique* (1985), apresenta princípios de controle gestual e coordenação que dialogam com aspectos da palhetada, especialmente no que concerne à automatização motora. Métodos voltados diretamente à palhetada surgem com obras como *Speed Picking* de Gambale (1994), que descreve conceitos como “economy picking”, e *Rock Discipline* de Petrucci (2003), que sistematiza rotinas de precisão, resistência e coordenação. Esses materiais mesclam uma abordagem tradicional mais generalista com uma visão mais pragmática, centrada em demandas performáticas do repertório contemporâneo.

Cabe aqui salientar uma diferenciação entre os contextos de formação denominados normalmente por erudito e popular. Se na formação dos músicos da tradição conservatorial a aquisição de expertise aponta para um afinamento e maior uniformidade de habilidades especializadas, no campo popular a busca por identidades sonoro-musicais

individualizadas é o mais desejado.

Com a popularização da internet e das plataformas de vídeo, o aprendizado técnico se deslocou significativamente dos métodos impressos para formatos digitais. Atualmente, grande parte do estudo da palhetada ocorre por meio de vídeos, tutoriais, transmissões ao vivo e análises gestuais disponibilizadas em plataformas de streaming.

Um dos principais exemplos desse novo cenário é o projeto *Cracking the Code*, idealizado por Troy Grady (2006). Por meio de gravações em alta taxa de quadros e análises gestuais detalhadas, Grady discute fenômenos como *pickslanting*, *escape motions* e padrões de movimento específicos da palhetada, oferecendo uma abordagem visual e analítica de grande impacto para o estudo contemporâneo da guitarra. Essa migração para o ambiente digital amplia o acesso ao conhecimento técnico, ao mesmo tempo em que ressignifica o papel dos métodos tradicionais, deslocando o foco para formatos multimodais de aprendizagem que combinam demonstração, análise visual e prática guiada.

Em síntese, esta breve revisão apresentada evidencia que o estudo da técnica instrumental evoluiu de tratados historicamente estruturados, centrados na sistematização gestual e sonora, para abordagens contemporâneas que incorporam análises gestuais, princípios psicológicos da aquisição de habilidades e, mais recentemente, recursos audiovisuais e tecnológicos. Embora esses diferentes modelos contribuam de maneiras distintas para a compreensão da técnica de palhetada, permanece evidente que a maior parte das descrições tradicionais não contempla integralmente a complexidade dos gestos envolvidos.

## 2.2 Ritmo e Microtempo

Os primeiros trabalhos de análise de performance que realizamos com o GuiaRT suscitaram questões diversas ligadas ao conceito de microtempo, que continuaram a ser exploradas em estudos subsequentes. Dentre elas encontram-se variações em torno a valores rítmicos prescritos pelas partituras (Freire e Nézio (2013)), separação de planos musicais (Freire, Nézio e Reis (2014)) e intervalos típicos entre notas de acordes tocados ao violão (seja de modo "simultâneo", como *strumming* ou como arpejo) e sua relação com o pulso musical (Freire et al. (2018)). Serviram de referência para esses trabalhos as pesquisas de Clarke (1999), Honing (2013) e Repp (1992).

Clarke entende o microtempo como um componente fundamental da organização temporal da música, argumentando que pequenas variações nos intervalos entre eventos

sonoros não representam desvios aleatórios, mas elementos funcionais que influenciam a percepção, a expressividade e a construção rítmica. Em sua perspectiva, essas flutuações resultam da interação entre mecanismos motores e expectativas perceptivas, configurando um sistema dinâmico em que o performer atua dentro de limites flexíveis de tempo, moldados tanto pela fisiologia quanto pela cognição musical.

Honing aborda o microtempo a partir de uma perspectiva cognitiva e computacional, enfatizando que a percepção rítmica envolve processos inferenciais que organizam o fluxo temporal em níveis hierárquicos. As pequenas irregularidades temporais — o *expressive timing* — fazem parte dessa estrutura perceptiva, funcionando como ajustes locais que emergem da interação entre a métrica subjacente e as decisões motoras do intérprete. Para Honing, os microtempos não são meramente “ruídos” no desempenho, mas reflexos da forma como o músico internaliza e projeta a estrutura rítmica no gesto.

Repp, ao analisar a microestrutura temporal em performances expressivas, demonstra que o microtempo combina regularidades sistemáticas com variações individuais. Suas investigações mostram que, embora cada performer apresente um perfil próprio de *timing*, certos padrões de aceleração, desaceleração e distribuição temporal tendem a emergir de maneira consistente em diferentes interpretações. Assim, o microtempo é entendido como um fenômeno ao mesmo tempo pessoal e compartilhado, influenciado tanto por escolhas expressivas quanto por propriedades biomecânicas inerentes à execução instrumental.

Um outro aspecto de microtempo musical é abordado por Magalhaes (2015), em uma pesquisa realizada na Escola de Música da UFMG. Em sua investigação sobre bending e vibrato na guitarra elétrica, o autor utiliza descritores de expressividade da ferramenta Expan para quantificar parâmetros como variação de frequência, intensidade e dinâmica temporal. O estudo exemplifica como métricas quantitativas podem revelar aspectos sutis da técnica guitarrística, fornecendo subsídios para discussões pedagógicas e performáticas.

A dissertação de mestrado (2020) do autor desta tese se debruçou sobre diferentes aspectos da técnica de *strumming*, incluindo análises de microtempos e os primeiros passos para uma abordagem multimodal.

Embora não seja o foco principal do presente trabalho, esse pequeno levantamento sobre micro-tempo cria uma base teórica que permite interpretar as variações temporais observadas em técnicas instrumentais — como a palhetada — não apenas como flutuações motoras, mas como manifestações estruturadas de organização rítmica, de ajustes cog-

nitivos e de características fisiológicas do gesto. Essas ideias, portanto, fundamentam as interpretações que poderão ser feitas posteriormente sobre regularidade, variação e adaptação temporal nas execuções analisadas.

### 2.3 Análise Quantitativa da Performance

O estudo da performance musical sob a perspectiva multimodal tem ganhado destaque nas últimas décadas, especialmente a partir da consolidação de abordagens que consideram o som, o gesto e outros parâmetros físicos como dimensões interdependentes da prática instrumental. Dois marcos fundamentais nesse campo são os trabalhos de Jensenius e Wanderley, e de Godoy e Leman, que estabeleceram bases conceituais e metodológicas para a análise dos gestos musicais e para a compreensão das relações entre movimento e som.

Em *Musical Gestures: Concepts and Methods*, Jensenius e Wanderley (2010) propõe uma estrutura abrangente para o estudo dos gestos musicais, compreendendo-os como ações corporais que contribuem para a produção ou percepção do som. O autor categoriza os gestos em três grandes grupos — gestos produtores de som, gestos auxiliares e gestos comunicativos — oferecendo ferramentas conceituais para analisar como diferentes tipos de movimento se articulam no ato performático. A partir dessa estrutura, ele argumenta que a performance musical deve ser entendida como um fenômeno essencialmente multimodal, no qual os gestos não apenas moldam o resultado sonoro, mas também carregam informações expressivas, estruturais e comunicativas.

De forma complementar, Godøy e Leman (2010) aprofundam a relação entre som, movimento e significado, articulando teorias da corporeidade, da cognição e da semiótica para mostrar que os gestos instrumentais não são apenas mecanismos biomecânicos destinados à produção sonora, mas também veículos de expressão musical e de organização temporal. O enfoque de Godoy valoriza a dimensionalidade complexa dos gestos, evidenciando como padrões de movimento podem ser correlacionados com características perceptivas — como articulação, acentuação e fraseado — e como esses padrões influenciam tanto o intérprete quanto o ouvinte. Para o estudo de técnicas de palhetada, essa perspectiva é particularmente relevante, pois permite observar o gesto não apenas como meio de ataque de cordas, mas como estrutura rítmica, expressiva e cognitiva.

No campo metodológico e analítico, *Empirical Musicology: Aims, Methods, Pros-*

*pects*, de Clarke (1999), oferece uma discussão fundamental sobre os caminhos e desafios da musicologia empírica. O autor enfatiza a importância de métodos sistemáticos e replicáveis, defendendo o uso de medições objetivas, observação controlada e análise quantitativa como estratégias para investigar fenômenos musicais de maneira mais rigorosa. A obra destaca o modo como a coleta de dados multimodais — incluindo áudio, vídeo, movimento e medidas fisiológicas — pode expandir a compreensão de processos performáticos. A perspectiva de Clarke reforça a necessidade de protocolos claros e de triangulação de dados, aspectos essenciais para pesquisas que lidam simultaneamente com som, gesto e parâmetros biomecânicos.

Em conjunto, esses trabalhos evidenciam que a análise multimodal da performance musical exige uma articulação equilibrada entre fundamentação teórica, clareza metodológica e ferramentas adequadas de captura e interpretação de dados. Para a pesquisa aqui apresentada, os conceitos de gesto musical desenvolvidos por Jensenius, Godoy e colegas fornecem o enquadramento conceitual necessário para compreender a palhetada como fenômeno articulado entre movimento, som e expressão. As orientações metodológicas de Clarke oferecem suporte para a estruturação das análises quantitativas da presente pesquisa, reforçando a importância de integrar dados provenientes de diferentes fontes.

Diante desse panorama, torna-se evidente que a análise multimodal da performance musical exige não apenas uma base conceitual sólida, mas também uma metodologia capaz de articular, de forma coerente, diferentes fontes de informação. Os trabalhos comentados acima demonstram que a combinação entre descrições gestuais, medições sonoras e parâmetros biomecânicos constitui um caminho eficaz para aprofundar o entendimento dos processos performáticos. Nesse sentido, a metodologia adotada nesta pesquisa — que integra dados de áudio provenientes da captação hexafônica do GuiaRT, medições de força por sensores FSR e informações gestuais obtidas por IMU — alinha-se diretamente às abordagens discutidas, permitindo uma investigação detalhada das técnicas de palhetada em seus múltiplos níveis. Assim, o referencial teórico aqui revisado fornece não apenas o suporte conceitual para a análise, mas também orienta as escolhas metodológicas que estruturam o estudo, garantindo que os dados coletados possam ser interpretados de maneira consistente com os princípios contemporâneos da análise multimodal da performance.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada na pesquisa, estruturando-se em três seções principais, cada uma dedicada a um aspecto essencial para o desenvolvimento do estudo.

Na primeira seção, detalhamos o design dos experimentos, descrevendo as duas situações de estudo da pesquisa. Essa etapa inclui a definição dos contextos experimentais e das técnicas de palheta investigadas, bem como as variáveis de cada estudo e as modalidades de coleta de dados.

A segunda seção é dedicada às ferramentas desenvolvidas para a pesquisa. Abordamos os recursos tecnológicos e analíticos projetados para este estudo, como processamento de áudio, sistema de captura de movimento, sensor de força, registro em vídeo e análise quantitativa, destacando suas funcionalidades e integração no contexto experimental.

Por fim, na terceira seção, discutimos o processo de coleta de dados, desde os procedimentos práticos para o registro das execuções musicais até sua organização, processamento e visualização, processos indispensáveis para uma análise posterior.

#### 3.1 Design dos Experimentos

A tese propõe um estudo de diferentes técnicas de palhetada ao violão, buscando entender e analisar suas principais características. Após alguns pilotos realizados em nosso laboratório<sup>1</sup>, dividimos a pesquisa em dois experimentos principais: (1) estudo de três técnicas específicas – palhetada alternada, sweep picking, strumming –, em dois andamentos distintos, e diversas condições de estudo; (2) estudo de uma técnica específica – tremolo – em duas condições distintas (com entrada direta em velocidade máxima, e em aceleração progressiva até o máximo).

Trata-se de um estudo de caráter exploratório, cujo objetivo principal é compreender de forma ampla os parâmetros envolvidos na técnica de palhetada. A pesquisa lida com um grande volume de dados multimodais, provenientes de diferentes fontes — gestuais, sonoras e de força — e contempla um número elevado de variáveis que se correlacionam. Diante dessa complexidade, buscou-se estabelecer uma visão geral e integrada dos principais fatores que influenciam a execução da técnica, identificando tendências,

---

<sup>1</sup>Laboratório de Performance com Sistemas Interativos: ([www.musica.ufmg.br/lapis](http://www.musica.ufmg.br/lapis))

padrões e relações que possam orientar futuras discussões sobre o tema.

A definição do modelo de palheta a ser utilizado nesta pesquisa — condição essencial para garantir a padronização experimental — demandou a realização de testes preliminares com diferentes formatos, materiais e espessuras. Esses parâmetros, frequentemente subestimados no contexto da prática musical, exercem influência direta tanto na tocabilidade quanto no timbre do instrumento, afetando a resposta dinâmica, o espectro sonoro produzido e o comportamento físico da palheta no contato com a corda.

Observou-se que palhetas muito leves (espessuras inferiores a 0,70 mm), amplamente utilizadas em contextos de *strumming*, tendem a atenuar as amplitudes e a filtrar frequências mais baixas, além de produzirem um timbre característico decorrente da deformação e recuperação do material — aspecto explorado como recurso expressivo nesse tipo de técnica. Entretanto, tais palhetas se mostraram inadequadas para técnicas que exigem maior precisão e estabilidade gestual, como palhetada alternada, *sweep picking* ou tremolo, nas quais um corpo mais rígido reduz a necessidade de microajustes constantes da mão.

Por outro lado, palhetas mais espessas (a partir de 1,0 mm) favorecem essas técnicas precisas ao oferecer maior controle e previsibilidade no ataque, mas se revelam pouco adequadas ao *strumming*: a intensidade sonora tende a ser demasiadamente elevada, e o rebote gerado pelo contato com as cordas produz um comportamento físico desfavorável à fluidez do gesto. Além da espessura, o formato da palheta mostrou-se igualmente relevante. Ponta mais aguda promove maior brilho e ataque acentuado, enquanto pontas mais arredondadas suavizam a intensidade e facilitam o deslizamento pela corda. A área efetivamente utilizada no contato também influencia a projeção sonora, alterando de forma significativa a amplitude resultante.

Dentro do nosso setup de extração dos dados, no qual o som é capturado por piezos, a sonoridade de cada palheta se torna um fator ainda mais influente, pois o timbre influencia diretamente na estratégia de extração de descritores de áudio.

Considerando esses fatores, optou-se pelo uso de uma palheta de formato padrão, com ponta intermediária — nem excessivamente aguda, nem demasiadamente arredondada — e espessura média de 0,87 mm. Essa configuração mostrou-se suficientemente versátil para a execução das quatro técnicas investigadas, equilibrando controle gestual, conforto, estabilidade sonora e registro através dos captadores. Nenhum dos partici-

pantes relatou desconforto ou dificuldade no uso do modelo selecionado, reforçando sua adequação ao contexto experimental.

No primeiro experimento exploramos diversas variáveis: 5 músicos, 7 técnicas<sup>2</sup>, 2 andamentos, com poucas amostras específicas (2 de cada condição estudada). Temos ainda um subconjunto de variáveis: qual corda está sendo tocada, repetição da corda, frequência da mudança de corda, direção da palhetada, dificuldade rítmica. Buscamos assim uma avaliação do impacto desses diferentes fatores na realização técnico-musical de cada condição de estudo, e detecção de possíveis similaridades e diferenças entre músicos, técnicas e andamentos.

O segundo experimento baseia-se em uma técnica específica, o tremolo, com foco nas estratégias gestuais e resultados rítmicos obtidos em duas situações: o início direto de sua realização em velocidade máxima, e sua preparação a partir de ataques lentos progressivamente acelerados. Essas situações foram estudadas nas cordas 1 e 4.

Os dados desta pesquisa foram capturados, processados e registrados integralmente no ambiente Max, versão 8. O Max é uma plataforma de programação visual amplamente utilizada em música e tecnologia do som, que permite integrar, em tempo real, múltiplas fontes de sinal. No presente estudo, o *patch* desenvolvido no Max foi responsável por receber simultaneamente todas as fontes de dados, aplicar os primeiros procedimentos de processamento e registrar de forma estruturada tanto os dados brutos quanto os dados já parcialmente processados, garantindo sincronização precisa entre todos os fluxos capturados.

Após essa etapa de aquisição no Max, os arquivos resultantes foram importados para o Matlab, ambiente amplamente utilizado em pesquisa científica para análise numérica e visualização. No Matlab, os dados são formatados, organizados em estruturas adequadas e submetidos a rotinas adicionais de processamento, como segmentação dos trechos de interesse, cálculo de métricas específicas e produção dos gráficos analíticos. Assim, o Max cumpre o papel de plataforma de captura e pré-processamento em tempo real, enquanto o Matlab atua como ambiente analítico, responsável pela preparação final dos dados e pela geração das visualizações utilizadas nas análises desta pesquisa.

A coleta de dados se vale de diferentes modalidades, contando com um violão com captação hexafônica, um sensor de movimento, sensores de força, e uma câmera de vídeo

---

<sup>2</sup>A palhetada alternada é tratada em quatro condições distintas, com 4, 3, 2 e 1 notas por corda. O *sweep picking* abrange as condições de 5 e 6 notas.

com alto FPS. A próxima sessão descreve cada uma dessas modalidades.

## 3.2 Ferramentas

Nesta seção apresentamos as ferramentas utilizadas no estudo proposto sobre as quatro técnicas de palhetada. O violão GuiaRT, desenvolvido em nosso laboratório, é usado para a extração de onsets, amplitudes, e valores de centroide espectral<sup>3</sup>. O sensor de movimento utilizado, do tipo IMU (*inertial measurement unit*) necessitou de programação específica para sua utilização em tempo real. Sensores de força, do tipo FSR (*force sensing resistor*) foram acoplados a ambos os lados da palheta. Adicionalmente foram realizados registros em vídeo para observar aspectos não captados pelas demais ferramentas, contribuindo assim para a análise e interpretação dos dados.

### 3.2.1 Violão GuiaRT

O violão GuiaRT é um setup musical interativo baseado em um violão de nylon equipado com captadores piezo hexafônicos desenvolvido em nosso laboratório na última década. Ele consiste em um conjunto modular de ferramentas em tempo real para a extração de descritores de áudio de baixo nível e para a variação e acionamento de segmentos selecionados durante uma performance; os dados simbólicos são produzidos por algoritmos especialmente escritos ou adaptados para a identificação e caracterização dos sons mais típicos produzidos pelo violão. Pode-se caracterizá-lo como uma interface acústico-digital construída sobre um violão de cordas de nylon, sem modificar suas características fundamentais de execução, e oferecendo uma representação simbólica da maioria das características de sua produção sonora.

Para a presente pesquisa, é importante destacar as características básicas dos sinais de áudio em jogo, e os procedimentos de detecção de onsets e amplitudes.

#### 3.2.1.1 Extração de onsets, amplitudes e centroide espectral

O GuiaRT trata cada som produzido no violão como um evento musical individual, composto por informações básicas como início, duração, intensidade (amplitude),

---

<sup>3</sup>Uma descrição detalhada de todo o sistema pode ser encontrada em Freire, Armondes e Silva (2021). Decidimos incluir como apêndice da tese uma tradução integral deste artigo, já que praticamente toda a bibliografia sobre este violão está em inglês.

altura (frequência fundamental) e timbre (representado pelo centroide espectral). Antes de iniciar a análise detalhada, o som de cada corda passa por um pré-processamento, que inclui o cálculo de picos e médias, além de filtros específicos. Esses procedimentos servem para realçar as partes mais importantes do sinal — especialmente os ataques — e reduzir interferências, permitindo uma leitura mais precisa de como cada corda foi tocada.

O onset corresponde ao instante exato em que uma nova nota começa. Para identificá-lo, o GuiaRT utiliza filtros específicos para cada corda, focando tanto nas frequências fundamentais das notas quanto nas regiões de transientes (parte aguda do espectro). Como o violão apresenta ataques bem curtos e ressonâncias longas, o sistema precisa distinguir o início real de um som de outros picos de energia que ocorrem naturalmente por interferência das demais cordas. Para isso, o sistema compara continuamente a intensidade do som filtrado de cada corda com um limiar adaptativo, que se ajusta automaticamente conforme sua própria intensidade e a atividade nas demais cordas. Esse método — baseado em um Schmitt Trigger<sup>4</sup> — ajuda a evitar falsos reconhecimentos e permite lidar com diferentes estilos de toque.

Outros parâmetros complementam o processo, como o limiar de reataque, que define o intervalo mínimo entre dois ataques consecutivos na mesma corda, e o limiar mínimo de amplitude, que determina se um som é forte o bastante para ser considerado um novo evento. Assim, o sistema consegue diferenciar ataques reais de pequenos contatos ou ruídos. O período entre o início detectado e o momento de reataque é chamado de intervalo de ataque, englobando toda a fase inicial da nota, desde o toque até o início do decaimento.

Após detectar o início da nota, o GuiaRT calcula sua amplitude, que indica a força aplicada pelo músico naquele toque. Para isso, o sistema monitora continuamente a energia do sinal de cada corda, identificando o ponto de maior intensidade dentro do intervalo de ataque. Essa medida não busca representar exatamente a intensidade sonora percebida, mas sim fornecer um parâmetro comparativo de esforço físico entre diferentes toques e execuções.

O centroide espectral é um parâmetro acústico que descreve o “centro de gravidade” do espectro de frequências de um som, seu ponto de equilíbrio. Em termos simples, uma

---

<sup>4</sup>Esse trigger utiliza dois limites de comparação: um superior, que deve ser superado para validação de um ataque, e um inferior, que deve ser ultrapassado no sentido oposto antes que um novo ataque possa ser detectado.

frequência mais alta indica uma maior presença de componentes agudas, e vice-versa. No caso do violão, este valor diminui constantemente após o momento de ataque, já que a ressonância se dá com os componentes mais graves. Extraímos seu valor de pico durante o intervalo de ataque, e o expressamos como um centroide espectral ajustado para  $f_0$ , após sua divisão pela frequência fundamental. Assim o valor 2 indica que o centroide tem a mesma frequência do segundo harmônico da nota, um valor de 3,5 indica que ele se localiza entre o terceiro e quarto harmônicos.

No caso desta pesquisa, surgiram alguns desafios específicos. Não havia em nosso laboratório muita experiência com sons produzidos por palhetadas. Já eram conhecidas algumas perturbações ocorridas antes do onset (por contato de parte do dedo ou da unha), ao lado dos transientes de finalização de nota (abafamentos com ruído), além de raras situações onde podia-se inferir um novo ataque sem que a vibração da corda fosse interrompida. O volume considerável de dados coletados nos dois experimentos trouxe algumas situações não previstas: (1) o contato de um dedo com a corda, antes do contato da palheta, causando duas perturbações antes do ataque; (2) diferentes intensidades e durações do contato da palheta com a corda antes do ataque; (3) diferentes modos de atrito da palheta com a corda, devido à sua inclinação, antes do ataque; (4) modos distintos de ataque (de uso preferencial, mas não exclusivo, dos músicos): um ataque com contato mais profundo com a corda, gerando uma interrupção da vibração, e outro que é simplesmente uma raspada da palheta na corda, sem interromper a vibração. No caso da corda 4, que possui um revestimento metálico, o desafio foi ainda maior, pois essa diferença entre modos de ataque altera tanto o timbre quanto a estratégia de se segmentar o fluxo sonoro. Foi necessário refazer a regulagem da filtragem para cada músico.

### 3.2.2 Unidade de medição inercial (IMU)

Dentre os vários modelos disponíveis no mercado utilizamos o MetaMotionR, desenvolvido pela MBientLab (Figura 1). É um sensor portátil no formato de relógio que utiliza o protocolo Bluetooth Low Energy (BLE) para transmitir dados de aceleração linear, velocidade angular e magnetômetro nos três eixos, bem como informações sobre temperatura, luminosidade ambiente e pressão barométrica. O protocolo BLE permite que os dispositivos operem com maior eficiência em largura de banda limitada, ao alternarem para um modo de baixa energia ou inatividade após a conclusão da transmissão/recepção

de eventos. O MetaMotionR oferece várias configurações de uso: no modo de registro em memória interna, acessível pelo aplicativo Metabase App (compatível com Windows, iOS e Android), a taxa de amostragem atinge até 800 Hz; no modo de transmissão wireless, a taxa é de 100 Hz para acelerômetro e giroscópio, e de 25 Hz para o magnetômetro. O sensor possui ainda um algoritmo de fusão desenvolvido pela Bosch, que permite estimar a aceleração linear sem a influência da gravidade e com orientação espacial precisa.

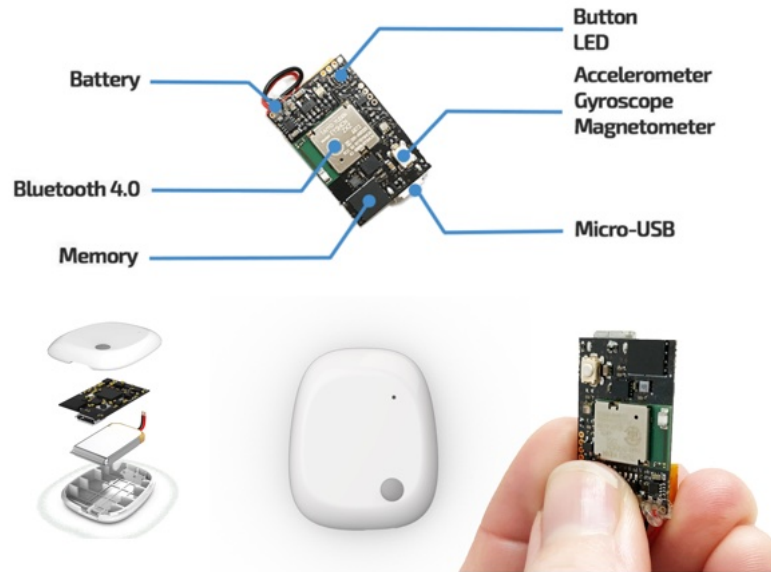


Figura 1: Sensor de movimento MetaMotionR, da empresa MBientLab.

A origem dos eixos cartesianos desse sensor fica próximo ao botão circular presente em uma extremidade de sua face superior. As direções positivas da aceleração linear e velocidade angular em cada eixo podem ser vistas na Figura 2.

Com o objetivo de identificar e avaliar as limitações deste IMU, realizamos um estudo comparativo com o sistema de captura óptica de movimento Qualisys (FREIRE et al., 2020). Esse estudo demonstrou uma significativa viabilidade do uso do MetaMotionR fora de ambientes controlados, apresentando uma precisão compatível com as aplicações musicais pretendidas.

A programação e o processamento dos dados podem ser vistos no Apêndice A. Trataremos aqui a descrição das direções dos picos de aceleração linear e velocidade angular e sua correspondência no espaço tridimensional.

A categorização das direções foi baseada na divisão da esfera em zonas específicas. Para cada eixo principal ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ), foram definidas duas zonas, uma positiva e outra

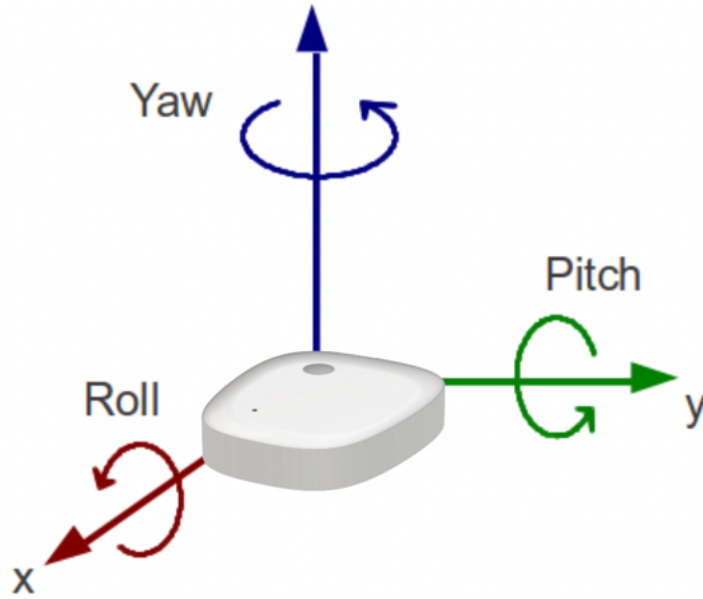


Figura 2: As direções positivas da aceleração linear e velocidade angular em cada eixo com a posição no IMU.

negativa, delimitadas por ângulos de azimute e elevação de  $\pm 30^\circ$  (ver Figura 3). Assim, os picos detectados cujos ângulos se encontram dentro dessas zonas foram caracterizados como gestos realizados preferencialmente nas direções  $x^+$ ,  $x^-$ ,  $y^+$ ,  $y^-$ ,  $z^+$  e  $z^-$ .

Além dessas seis regiões principais, foram definidas mais 20 zonas, com áreas menores: 4 entre as regiões x e y, 4 entre x e z, 4 entre y e z, além de 8 que estão fora dos  $\pm 30$  graus de qualquer um dos eixos (ver Tabela 1). Essas categorias estão organizadas de forma diametralmente oposta: por exemplo, a categoria 1 se opõe à 2, a 3 à 4, a 5 à 6, e assim por diante (ver Tabela 1 e Figura 3). Essa estrutura permite uma caracterização detalhada dos gestos com base na direção espacial associada a cada pico detectado.

Tabela 1: Relação entre a direção nos eixos e o número da categoria

Direção	$x^+$	$x^-$	$y^+$	$y^-$	$z^+$	$z^-$	$x/y$	$x/y/z$	$x/z$	$y/z$
							7.1	8.1	9.1	10.1
							7.2	.	9.2	10.2
<b>Categoria</b>	1	2	3	4	5	6	7.3	.	9.3	10.3
							7.4	8.8	9.4	01.4

No procedimento de identificação dos picos de aceleração linear e de velocidade angular, o algoritmo de detecção prioriza os eixos principais do sistema de coordenadas

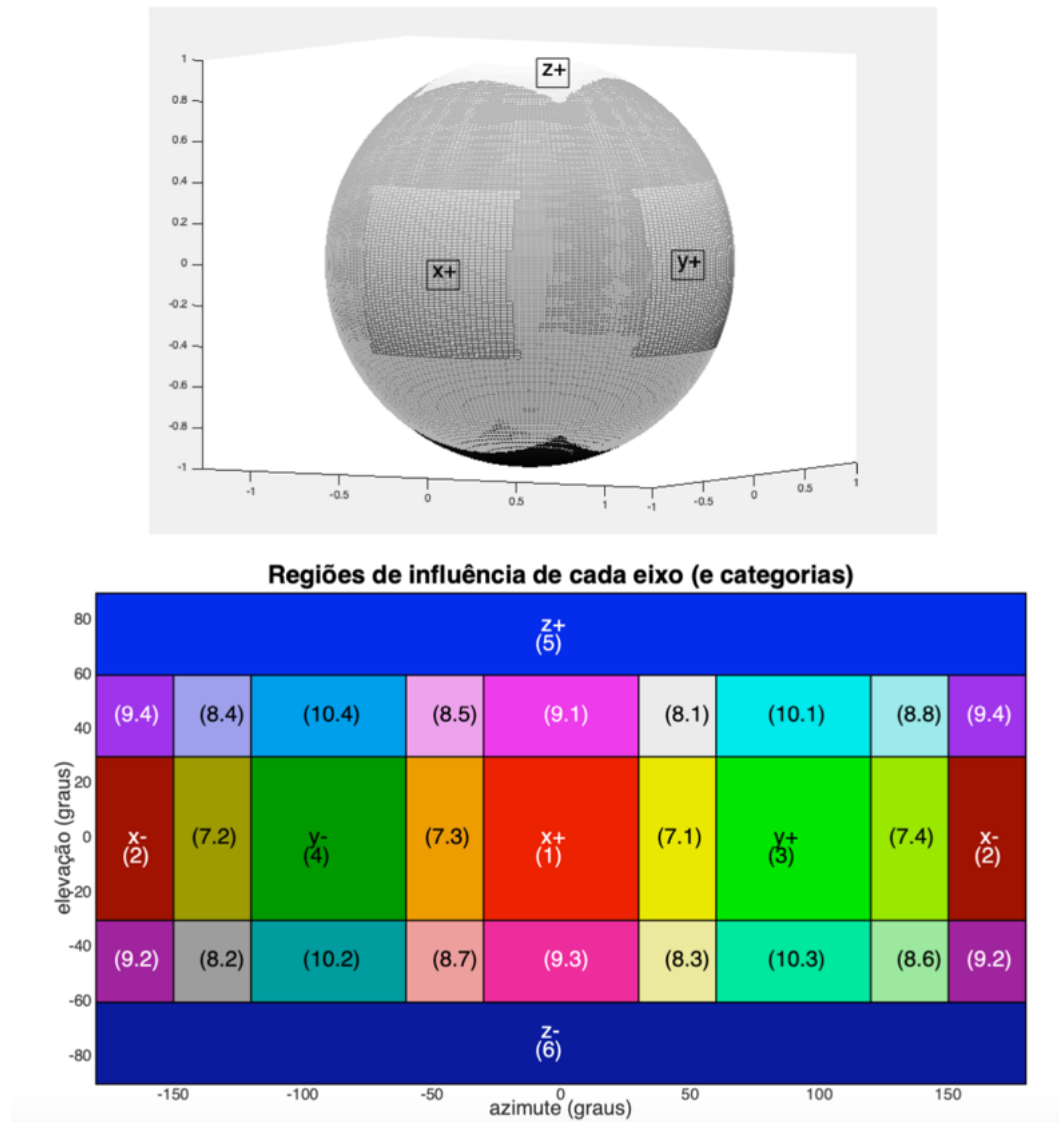


Figura 3: Esfera com zonas positivas e negativas para os eixos principais (x, y e z), as regiões de influência de cada eixo e categorias.

tridimensional (x, y e z), com o objetivo de reduzir a complexidade de interpretação dos dados gestuais. Eventos predominantemente uniaxiais apresentam correspondência mais direta com gestos técnicos específicos, favorecendo a consistência analítica e a comparação entre execuções e participantes. Picos resultantes da combinação simultânea de múltiplos eixos, quando identificados, tendem a refletir padrões de movimento mais complexos e, por essa razão, assumem relevância analítica ampliada, sendo tratados como indicadores complementares de maior complexidade gestual no estudo das técnicas de palhetada.

A Figura 4 mostra a posição do sensor na mão do performer com o violão e ilustra, em cada quadro, os sentidos positivos dos eixos utilizados na análise gestual, bem como os números relacionados aos picos de translação e rotação apresentados acima. No

quadro A, identifica-se o eixo  $x$  da aceleração linear, representado pela seta que indica o sentido positivo ( $x+$ ) desse movimento lateral da mão. No quadro B, observa-se o eixo  $y$  da aceleração linear, cuja seta aponta para o sentido positivo ( $y+$ ), associado ao deslocamento vertical da mão em direção às cordas. Já no quadro C, é mostrado o eixo  $z$  da aceleração linear, com a seta indicando o sentido positivo ( $z+$ ), correspondente ao movimento perpendicular ao tampo do instrumento.

As três imagens inferiores ilustram os sentidos positivos das rotações em torno de cada eixo. No quadro D, apresenta-se a rotação em torno do eixo  $z$ , com a seta curva indicando o sentido positivo desse movimento. O quadro E mostra o sentido positivo da rotação em torno do eixo  $x$ , enquanto o quadro F exhibe o sentido positivo da rotação em torno do eixo  $y$ . Esses referenciais permitem interpretar os dados captados pelo IMU, relacionando translações e rotações aos gestos realizados durante as técnicas de palhetada.

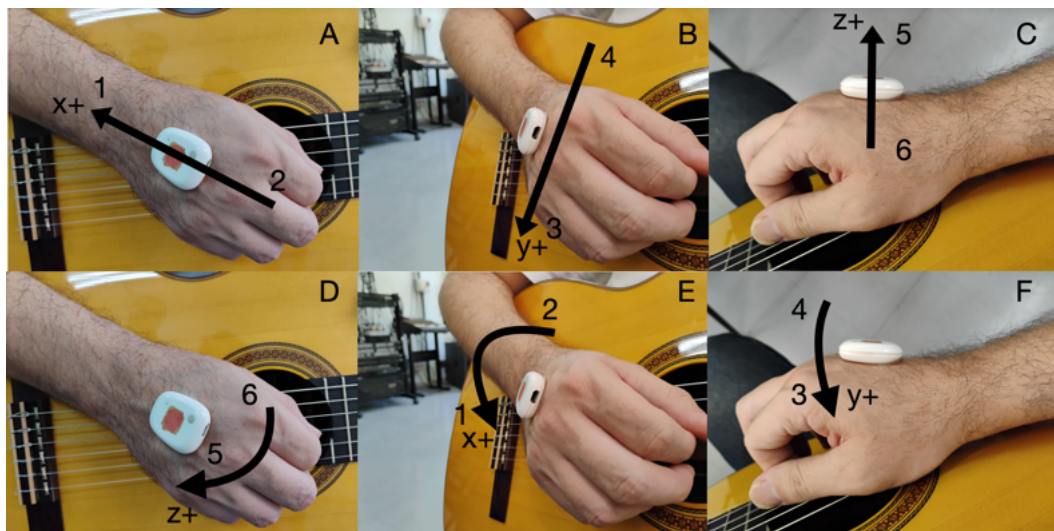


Figura 4: Posição do sensor na mão com o instrumento. Cada figura indica a orientação sentido positivo de cada eixo.

Buscando uma maneira de reduzir a quantidade de variáveis (dimensões) do conjunto de dados enquanto se retém o máximo de informação possível, e também como uma ferramenta de interpretação desses dados, utilizamos a Análise em Componentes Principais (PCA, do inglês). A partir do cálculo da covariância entre as variáveis analisadas, esse procedimento determina eixos ortogonais nos quais ocorrem variações conjuntas máximas, representando assim uma rotação das variáveis para um novo sistema de coordenadas, com dimensões menores (ou no máximo iguais) aos da distribuição original. Cada componente principal é calculado como uma combinação linear das variáveis observadas,

à qual pode ser atribuído um peso de sua contribuição para a variação total. Com a PCA, esperamos identificar os principais fatores que explicam a maior parte da variância dos gestos e assim viabilizar uma comparação mais efetiva entre diferentes performances de diferentes músicos.

Em resumo: o IMU fornece dados brutos de aceleração linear, velocidade angular e atitude (posição espacial), a uma taxa de amostragem média de 100 Hz. Em seu processamento, fixamos a taxa de amostragem (aliada a uma filtragem), detectamos picos de translação e rotação, e buscamos uma redução de dados através da PCA. A seção 3.3 traz exemplos ilustrados para cada um desses dados e processamentos.

### 3.2.3 Resistor sensível à força (FSR)

Um resistor sensível a força (Force Sensing Resistor - FSR) é um tipo de sensor que altera sua resistência elétrica em resposta a uma força ou pressão aplicada (Figura 5). Estudos acadêmicos detalharam algumas propriedades e aplicações dos FSRs. Yaniger (1991) faz uma revisão sobre sensores resistivos, enquanto Hollinger e Wanderley (2006) exploram as propriedades de três sensores de força, disponíveis no mercado, para medir a variabilidade da resposta do dispositivo em si em longos períodos de tempo, especificamente a deriva da resistência e a histerese sob diferentes forças.



Figura 5: Diferentes tipos de resistores sensíveis a força (FSR).

Fonte: Site FSRTEK - <https://www.fsrtek.com>

FSRs são populares em pesquisas sobre música e em novas tecnologias musicais

devido à sua capacidade de traduzir pressão em informações digitais, permitindo o controle dinâmico de diversos parâmetros musicais. Em instrumentos digitais, esses sensores são integrados a superfícies de controle para detectar variações de força na execução, tornando possível a aplicação de técnicas expressivas semelhantes às de instrumentos acústicos tradicionais, como explorado por Wanderley e Depalle (2004) no contexto da interação homem-máquina em música. Em pads de percussão eletrônicos, por exemplo, os FSRs permitem que o músico regule a intensidade e o timbre ao variar a pressão de suas batidas, ampliando a expressão musical e a sensibilidade do instrumento.

Montamos em uma palheta sensores FSR genéricos, de tamanho reduzido, em ambos os lados da palheta (ver Figura 6). Os detalhes de circuito podem ser vistos no B. É necessário considerar, neste ponto, a dependência de dois fatores na interpretação das forças registradas pelos sensores. Conforme se observa na Figura 6, os resistores sensíveis à força estão localizados apenas na região central da palheta, o que implica que as medições correspondem exclusivamente às forças aplicadas nessa área específica, sem cobrir toda a superfície do objeto. Assim, cada valor de força registrado reflete simultaneamente a intensidade da força exercida e a posição do dedo em relação à zona sensível.

Dessa forma, pode-se inferir que uma força efetiva e regular indica o posicionamento do dedo sobre a região central da palheta, enquanto valores baixos ou nulos podem sugerir que o dedo se encontra fora da área de contato dos sensores. Em virtude dessa dupla natureza interpretativa, as análises e inferências relativas às forças aplicadas sobre a palheta serão apresentadas de modo relativizado, considerando as limitações inerentes à configuração do setup utilizado, embora todos os participantes tenham indicado que os dedos estavam sobre os sensores no momento das gravações.

#### 3.2.4 Captação de vídeo

O uso de registros em vídeo com alta taxa de frames por segundo (alta FPS) tem se consolidado como uma ferramenta essencial na análise de técnicas musicais, especialmente no contexto da palhetada, onde a observação direta das ações envolvidas é limitada pela velocidade dos movimentos. Essa tecnologia permite capturar movimentos em detalhes que são invisíveis ao olho humano (em condições normais de observação), oferecendo um recurso valioso para a compreensão das nuances técnicas relacionadas ao uso da palheta.

Os aspectos aqui analisados que não são diretamente obtidos pelos sensores, como

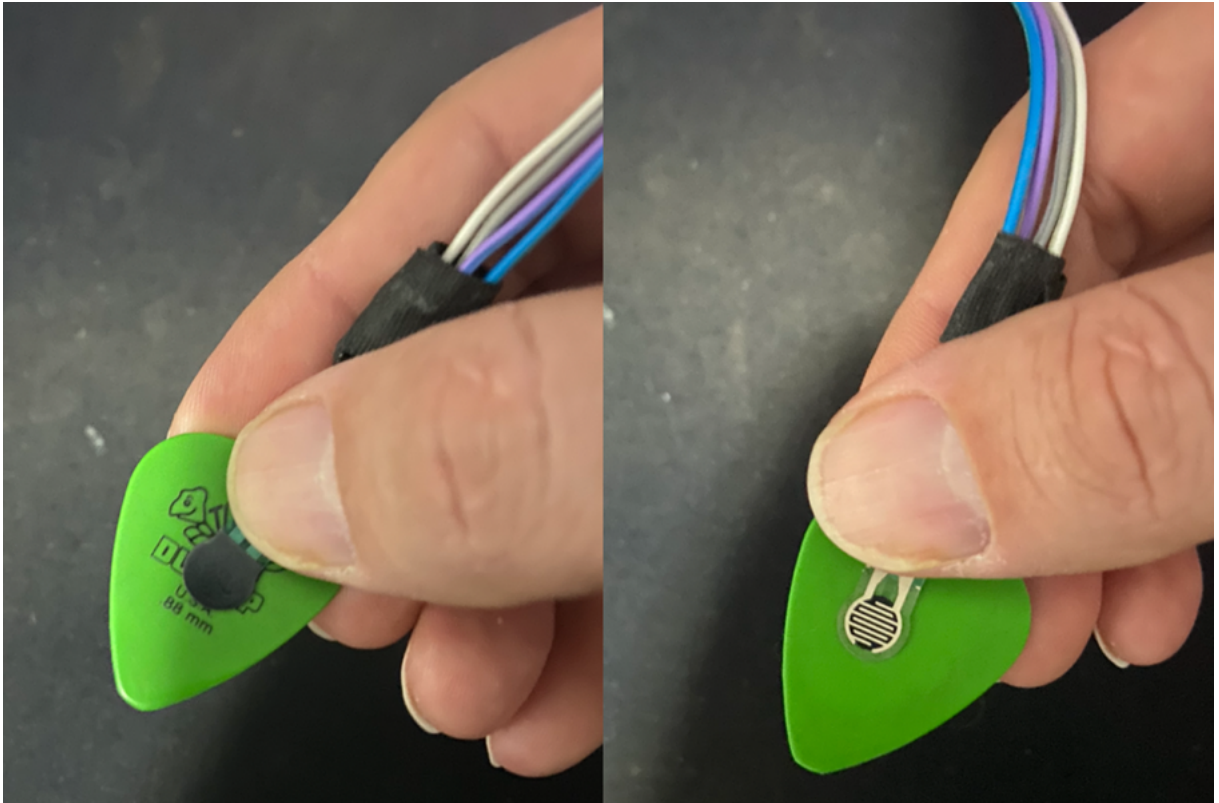


Figura 6: Dois FSR (Force-Sensor Resistor) posicionados na palheta, a fim de capturar as forças aplicadas pelos dedos polegar e indicador. O lado dos sensores posicionados na palheta estão invertidos.

o ângulo de ataque, o tipo de pegada da mão (grip) e o quanto a palheta atravessa o plano das cordas são fatores que desempenham um papel crucial na definição do timbre, da articulação e da clareza musical, sendo particularmente relevantes em gêneros que demandam alta velocidade e precisão, como o jazz, o rock e o metal.

Com base nesses requisitos, buscamos equipamentos que oferecessem uma taxa de quadros por segundo capaz de capturar IOIs com os menores valores observados no estudo (aproximadamente 10 ms no strumming a 100 bpm) e que fossem facilmente acopláveis ao instrumento. Entre as opções disponíveis, utilizamos a câmera GoPro HERO 10 Black, configurada para gravação em resolução Full HD (1920x1080 px) a 240 FPS.<sup>5</sup> Essa taxa de captura permitiu analisar as técnicas com uma precisão temporal de 4,16 ms, atendendo adequadamente às demandas do experimento.

<sup>5</sup><https://gopro.com/pt/br/shop/cameras>.

### 3.3 Coleta de Dados

Nesta seção, são apresentados os tipos de dados coletados a partir das três fontes utilizadas (GuiarT, IMU e FSR), tanto em sua forma original, consistindo nos dados fornecidos pelas ferramentas, quanto em sua forma processada. Embora as análises subsequentes não se apoiem diretamente em todas as visualizações aqui expostas, consideramos fundamental oferecer uma visão geral desse conjunto de informações para contextualização e destaque da abrangência dos dados obtidos. Essa abordagem busca ilustrar de forma clara e acessível as informações extraídas, sem aprofundar em todas as formas de análise visual possíveis, mantendo o foco nas questões centrais do estudo.

A Figura 7 apresenta o setup experimental aplicado a um músico, detalhando a configuração dos dispositivos utilizados. A câmera foi fixada ao tampo do violão, focando a região de contato entre a palheta e as cordas, enquanto o sensor IMU foi fixado no dorso da mão, mantendo a mesma posição e orientação para todos os participantes. A palheta, padronizada para todos os músicos, estava equipada com dois sensores FSR, um de cada lado, e o instrumento utilizado foi o violão GuiarT. O início da gravação foi acionado por meio de um pedal, que acionava um compasso vazio de quatro tempos marcado pelo metrônomo antes do início dos trechos musicais. Com exceção das imagens de vídeo, todos os dados foram gravados de forma síncrona utilizando a linguagem Max.

Cada conjunto de dados (amostra ou take) é composto pelos seguintes elementos:

- metadados da gravação (músico, excerto, versão, pulso)
- gravação de áudio em seis canais (um canal por corda)
- dados das notas extraídas do trecho executado
- curvas provenientes dos FSR
- curvas do IMU
- vídeo capturado a 240 fps

Para armazenamento, formatação, processamento e análise desses dados, utilizamos o software MATLAB, empregando gráficos e cálculos como principais ferramentas analíticas. Os resultados gerados a partir do processamento incluem:



Figura 7: Setup utilizado na coleta de dados do experimento

- os IOIs<sup>6</sup> e o perfil geral de amplitudes
- expressão em coordenadas polares da aceleração linear e velocidade angular, com módulos e ângulos de orientação (azimute e elevação)
- picos de aceleração linear e velocidade angular, com suas direções
- médias dos valores positivos e negativos de aceleração linear e velocidade angular
- a PCA das acelerações e velocidades, considerando a contribuição individual de cada eixo e o fator de explicação dos primeiros componente principais.

Em busca de facilitar a identificação das técnicas e dos takes, adotamos um sistema de abreviações padronizado. Nesse sistema, as letras indicam tanto a técnica utilizada quanto o momento do take. A letra **A** representa o primeiro take, enquanto **B** refere-se ao segundo. As técnicas são identificadas pelas seguintes abreviações:

- S: Strumming

---

<sup>6</sup>IOI: inter onset interval. Intervalo temporal entre dois eventos.

- A: Palhetada alternada, acompanhada de um número que indica a quantidade de notas por corda
- W: Sweep picking, seguida de um número que representa o número de cordas envolvidas
- D: Tremolo direto, acompanhado pelo número da corda em que foi realizado
- P: Tremolo progressivo, acompanhado pelo número da corda em que foi realizado

Por exemplo, a sigla **A3B** refere-se à técnica de palhetada alternada com três notas por corda no segundo take, enquanto a sigla **P4A** indica a técnica de tremolo progressivo realizada na corda 4 na primeira amostra. Este padrão será utilizado ao longo do texto para descrever e analisar os resultados de forma clara e concisa.

### 3.3.1 Visualização dos dados

Iniciaremos apresentando o método de visualização dos dados, estruturado no ambiente MATLAB. Para isso, desenvolvemos uma organização baseada em uma matriz de 36 linhas, cada uma correspondente aos takes de cada condição do estudo. Cada linha dessa matriz inclui as seguintes informações: o valor do pulso; matrizes contendo os dados do IMU, GuiaRT e FSR; o nome da técnica associada, juntamente com o número do take e o andamento; a estrutura com as matrizes resultantes da PCA; áudio em seis canais, 48.000Hz. Essa estrutura permite uma visualização sistemática e integrada dos dados, como pode ser observado na Figura 8, facilitando a análise e o processamento das informações coletadas nos experimentos.

Para organizar a apresentação, dividiremos em dois grupos: dados originais e dados processado.

#### 3.3.1.1 Dados originais

O registro de áudio em seis canais, capturado por meio de uma captação hexafônica, permite a verificação precisa dos onsets extraídos pelo GuiaRT, cuja extração ocorre em tempo real e não diretamente a partir do registro de áudio. Essa abordagem possibilita a visualização do ataque em cada corda individualmente, além de evidenciar a energia gerada nas outras cordas, causada pelo acoplamento acústico. A Figura 9, gerada no

Fields	pulso	imu	guiart	palheta	title	pca
1	60	1046x10 ...	59x13 table	1046x3 table	'Strum 60 Bpm Take 1'	1x1 struct
2	60	910x10 t...	61x13 table	910x3 table	'Strum 60 Bpm Take 2'	1x1 struct
3	100	622x10 t...	58x13 table	622x3 table	'Strum 100 Bpm Take 1'	1x1 struct
4	100	598x10 t...	59x13 table	598x3 table	'Strum 100 Bpm Take 2'	1x1 struct
5	60	780x10 t...	11x13 table	780x3 table	'Alt 1 Nota 60 Bpm Take 1'	1x1 struct
6	60	763x10 t...	11x13 table	763x3 table	'Alt 1 Nota 60 Bpm Take 2'	1x1 struct
7	100	517x10 t...	11x13 table	517x3 table	'Alt 1 Nota 100 Bpm Take 1'	1x1 struct
8	100	548x10 t...	11x13 table	548x3 table	'Alt 1 Nota 100 Bpm Take 2'	1x1 struct
9	60	1002x10 ...	22x13 table	1002x3 table	'Alt 2 Notas 60 Bpm Take 1'	1x1 struct
10	60	977x10 t...	22x13 table	977x3 table	'Alt 2 Notas 60 Bpm Take 2'	1x1 struct
11	100	619x10 t...	22x13 table	619x3 table	'Alt 2 Notas 100 Bpm Take 1'	1x1 struct
12	100	612x10 t...	22x13 table	612x3 table	'Alt 2 Notas 100 Bpm Take 2'	1x1 struct
13	60	1443x10 ...	30x13 table	1443x3 table	'Alt 3 Notas 60 Bpm Take 1'	1x1 struct
14	60	1353x10 ...	32x13 table	1353x3 table	'Alt 3 Notas 60 Bpm Take 2'	1x1 struct
15	100	829x10 t...	29x13 table	829x3 table	'Alt 3 Notas 100 Bpm Take 1'	1x1 struct
16	100	831x10 t...	30x13 table	831x3 table	'Alt 3 Notas 100 Bpm Take 2'	1x1 struct
17	60	1783x10 ...	44x13 table	1783x3 table	'Alt 4 Notas 60 Bpm Take 1'	1x1 struct
18	60	1602x10 ...	44x13 table	1602x3 table	'Alt 4 Notas 60 Bpm Take 2'	1x1 struct
19	100	936x10 t...	43x13 table	936x3 table	'Alt 4 Notas 100 Bpm Take 1'	1x1 struct
20	100	925x10 t...	44x13 table	925x3 table	'Alt 4 Notas 100 Bpm Take 2'	1x1 struct
21	60	710x10 t...	9x13 table	710x3 table	'Sweep 5 Cordas 60 Bpm Take 1'	1x1 struct
22	60	700x10 t...	9x13 table	700x3 table	'Sweep 5 Cordas 60 Bpm Take 2'	1x1 struct

Figura 8: Estrutura dos dados coletados e processados no ambiente Matlab.

software Praat, ilustra a gravação de um take da técnica de palhetada alternada, executada com duas notas por corda a um andamento de 100 bpm. Esse registro também pode ser utilizado para análise visual da precisão da execução e diferenças de dinâmica em cada nota.

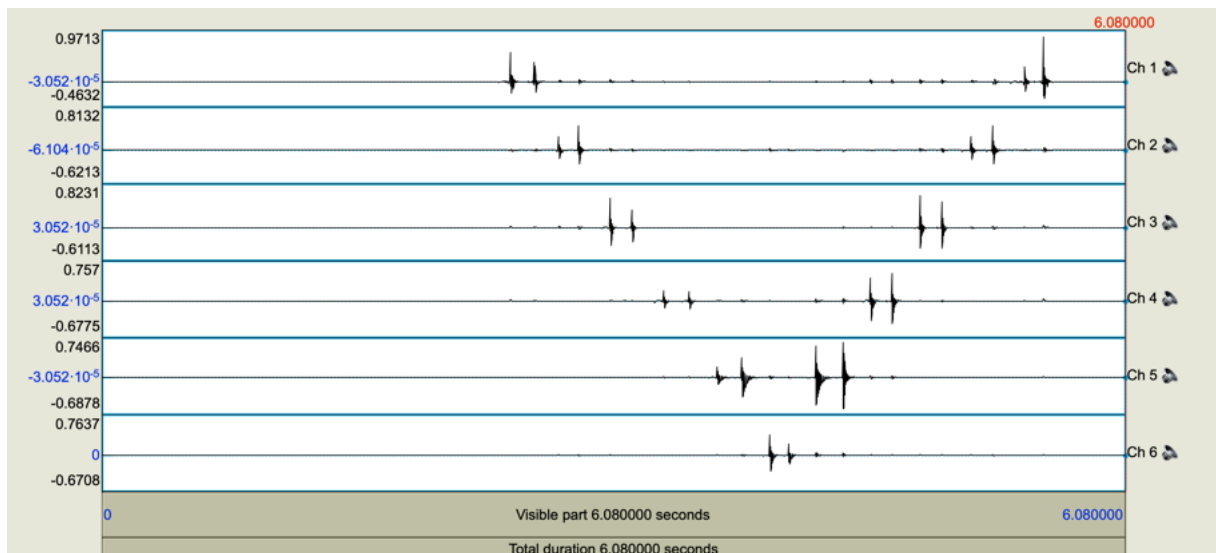


Figura 9: Visualização do áudio em seis canais registrado pela captação hexafônica.

Embora essa visualização em seis canais separados seja importante em análises mais precisas, para a integração com os gráficos das outras fontes de dados do estudo optamos

por uma representação mixada do áudio, representada na Figura 10. Utilizaremos as duas representações de acordo com a conveniência da análise.

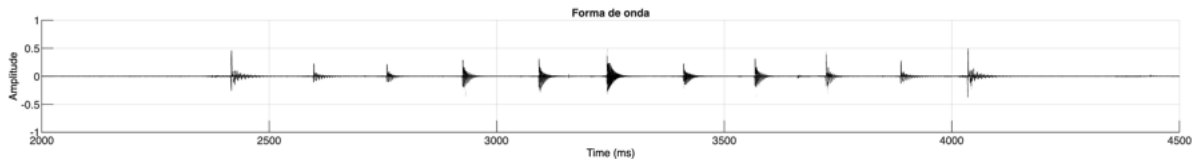


Figura 10: Visualização do áudio com os seis canais mixados de um take de palhetada alternada, duas notas por corda em 100 bpm.

As curvas geradas pelos FSR estão apresentadas na Figura 11, exemplificando três das técnicas investigadas neste estudo. A análise dessas curvas revela que cada técnica apresenta características específicas, distinguindo-se claramente das demais. Ao correlacionar esses dados com os onsets extraídos e dados do IMU, é possível estimar as direções das palhetadas, fornecendo uma visão mais detalhada da interação entre os movimentos executados e as forças aplicadas pelos dedos durante a execução dos trechos estudados.

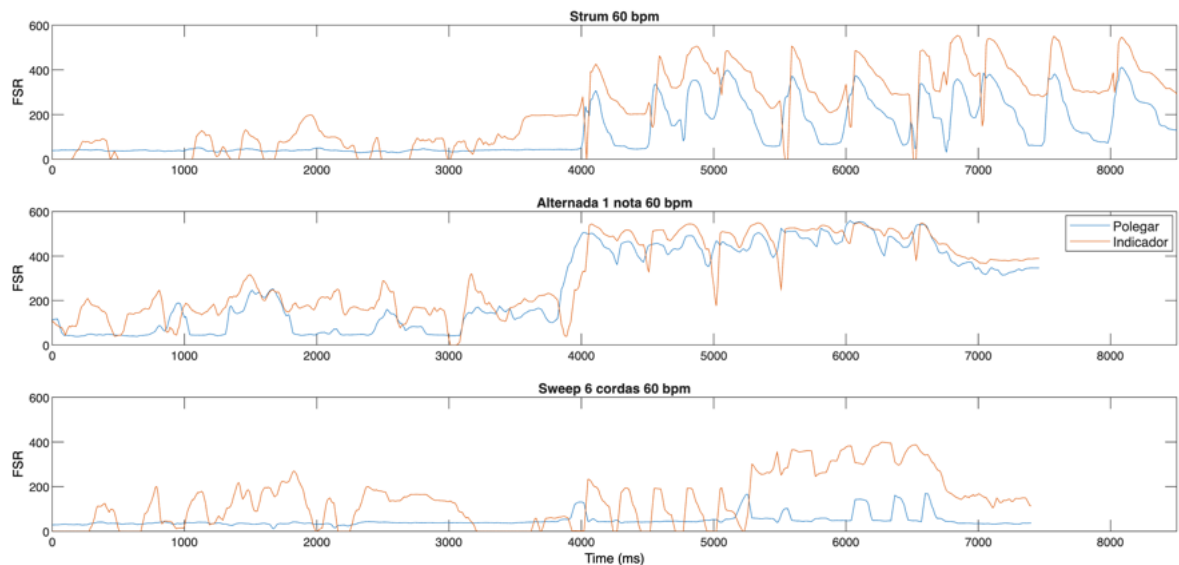


Figura 11: Curvas geradas pelos FSR no polegar e indicador, com exemplos das três técnicas do estudo.

Os dados provenientes do sensor de movimento, que incluem acelerações lineares<sup>7</sup>, velocidades angulares e ângulos de Euler, estão representados na Figura 12. Para uma melhor visualização, os dados foram segmentados no intervalo ao redor de 4000 e 5000 ms, correspondente ao primeiro compasso de um trecho de palhetada alternada, com

<sup>7</sup>Para aceleração linear, leia-se  $m/s^2 = 9,8 m/s^2 (g)$

três notas por corda a 60 bpm. Um ponto que chama atenção imediatamente é o sinal invertido entre a velocidade angular e a atitude, provavelmente originado do firmware da IMU. Em cada eixo, um deslocamento angular positivo corresponde a uma velocidade negativa e vice-versa. Esse conjunto de dados apresenta um desafio considerável para sua interpretação direta e para qualquer suposição sobre as técnicas de palhetada. Essa condição reforça a necessidade de um processamento mais sofisticado, com o objetivo de reduzir a complexidade dos dados. Métodos de simplificação, como a análise dos ângulos de orientação, a detecção de picos e a análise de componentes principais serão apresentados nos exemplos seguintes, com o intuito de oferecer uma compreensão mais clara e eficaz dessas informações.

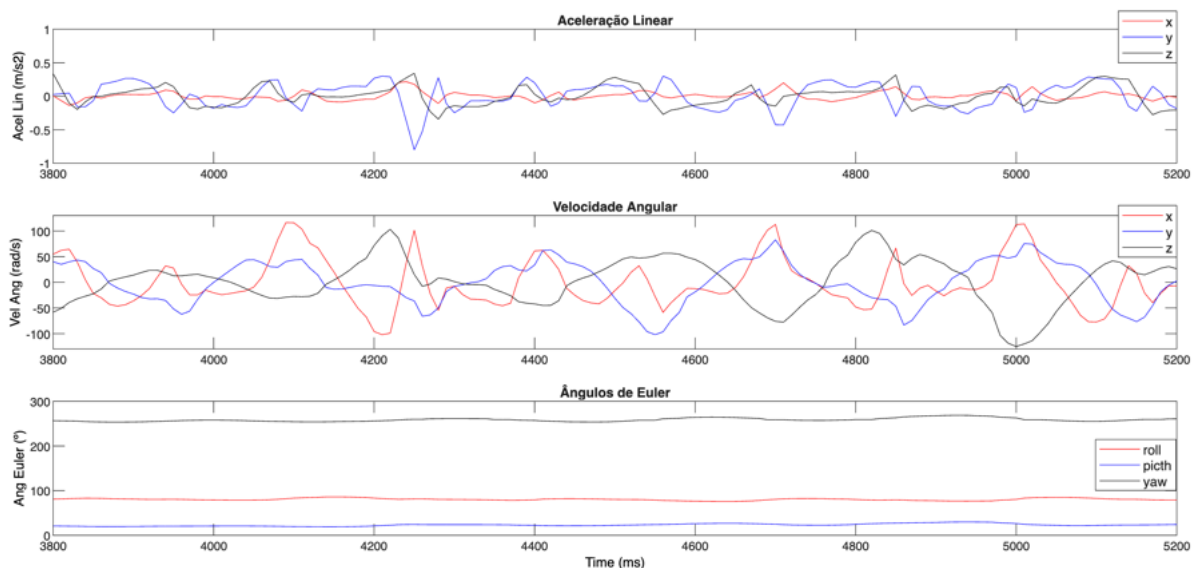


Figura 12: Acelerações lineares, velocidades angulares e ângulos de Euler correspondentes ao primeiro compasso de um trecho de palhetada alternada, com três notas por corda a 60 bpm.

Para finalizar, o conjunto de dados não processados inclui os vídeos capturados a 240 fps, os quais serão disponibilizados para visualização através de link que contém todos os takes de todos os músicos.<sup>8</sup>

### 3.3.1.2 Dados processados

Os dados coletados podem ser processados de diferentes maneiras, segundo os objetivos da análise pretendida. Podemos aplicar processamentos estatísticos, a fim de

<sup>8</sup><https://www.youtube.com/watch?v=l8q7pIJsUw8&t=12s>

observar aspectos específicos de uma amostra grande, extrair novas variáveis, rotacionar os eixos, dentre outros. Embora não esteja listado aqui, os dados coletados durante a gravação de áudio com o GuiaRT são também dados processados, representando uma transcrição simbólica do trecho executado<sup>9</sup>. Esta transcrição pode ser aprimorada, caso necessário, ao se tocar novamente o arquivo pelo sistema.

A Figura 13 mostra a variação dos ângulos de Euler, que são uma forma de descrever a orientação de um corpo no espaço tridimensional. Em vez de representar diretamente a posição de cada ponto, eles indicam como o corpo está girado em torno de três eixos de referência – geralmente chamados de *pitch*, *roll* e *yaw*. Ao analisar o comportamento desses ângulos ao longo do tempo, é possível compreender como a orientação da mão varia durante a execução de um movimento. A variação angular – calculada pela diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de cada eixo – revela a amplitude total explorada naquele eixo específico em determinada amostra. Assim, quanto maior for essa variação, maior é o alcance do movimento rotacional realizado; variações menores, por sua vez, indicam gestos mais contidos ou estabilizados. Em termos práticos, a observação conjunta dos ângulos de Euler permite interpretar quais direções de rotação são mais exploradas durante uma ação e como o músico controla a orientação da mão ao longo da execução.

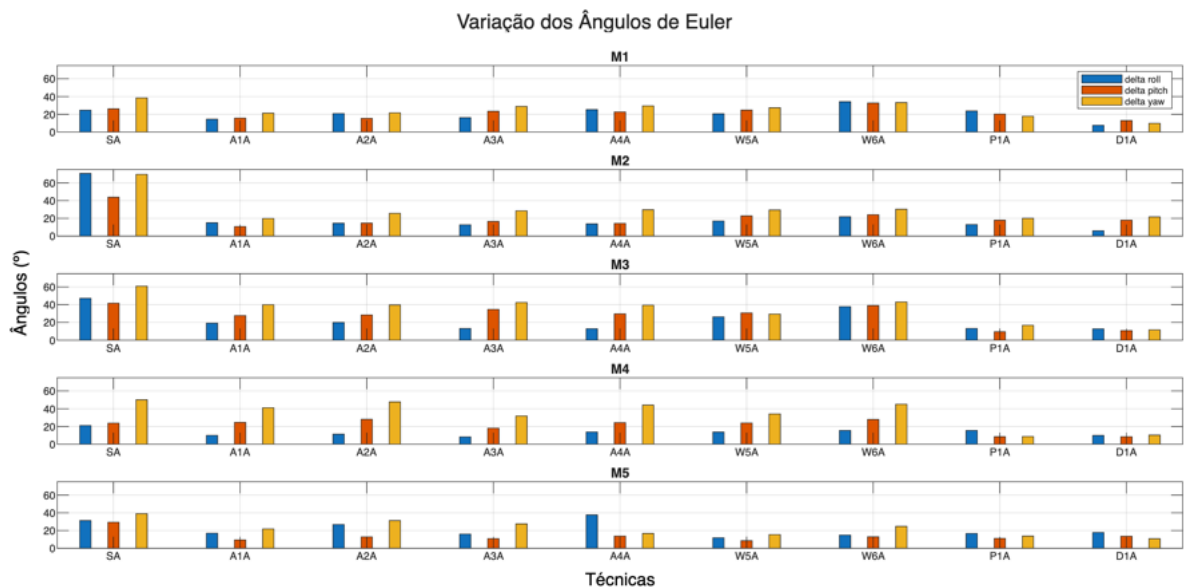


Figura 13: Variação dos ângulos de Euler de todos os músicos, em um take de cada condição de estudo

A análise das médias dos valores positivos e negativos das acelerações lineares e

<sup>9</sup>Pode ser observada no Apêndice D.

velocidades angulares de cada eixo permite identificar o intervalo de variação associado a cada técnica, bem como o equilíbrio entre os valores positivos e negativos. Essas informações nos permite caracterizar as diferenças nos gestos realizados e compreender como as técnicas se distribuem em termos de intensidade e direção dos movimentos. A Figura 14 apresenta as médias dos valores positivos e negativos das acelerações lineares do músico 1 e velocidades angulares do músico 3, em um take de cada técnica.

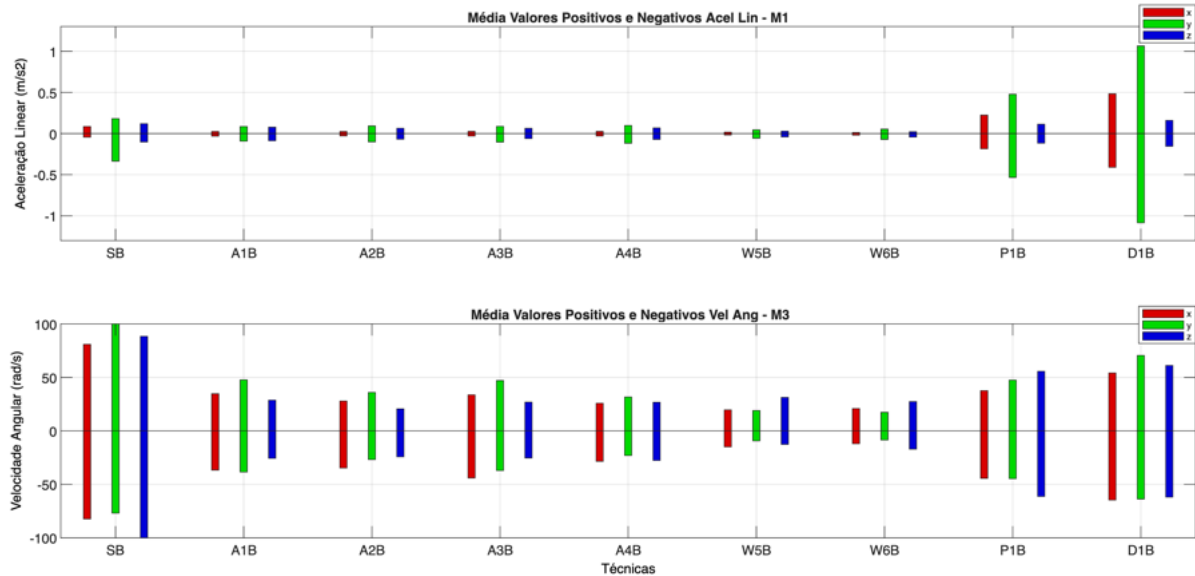


Figura 14: Médias dos valores positivos e negativos das acelerações lineares (M1) e velocidades angulares (M3), em um take de cada técnica.

Seguindo com a apresentação dos dados processados, será exibida a análise de componentes principais (PCA) das acelerações lineares e velocidades angulares, considerando as contribuições individuais de cada eixo e os fatores de explicação dos dois primeiros componentes principais. Para proporcionar uma perspectiva abrangente das acelerações lineares e velocidades angulares, apresentaremos um gráfico consolidado de um dos participantes, contendo todos os takes de todas as técnicas analisadas no experimento 1. A Figura 15 apresenta as análises das acelerações lineares e a Figura 16 as velocidades angulares<sup>10</sup>.

A Figura 17 exhibe os IOIs calculados na técnica de palhetada alternada utilizando 1 nota por corda, em 60 bpm, realizado pelos cinco performes. De modo geral, os valores de IOI apresentam uma unidade a menos que o número total de onsets, uma vez que

<sup>10</sup> Aceleração linear é a variação da velocidade de um corpo em linha reta ao longo do tempo; indica quão rápido ele acelera ou desacelera em cada direção. Velocidade angular é a taxa de rotação de um corpo em torno de um eixo, descrevendo quão rapidamente ele gira ou muda sua orientação.

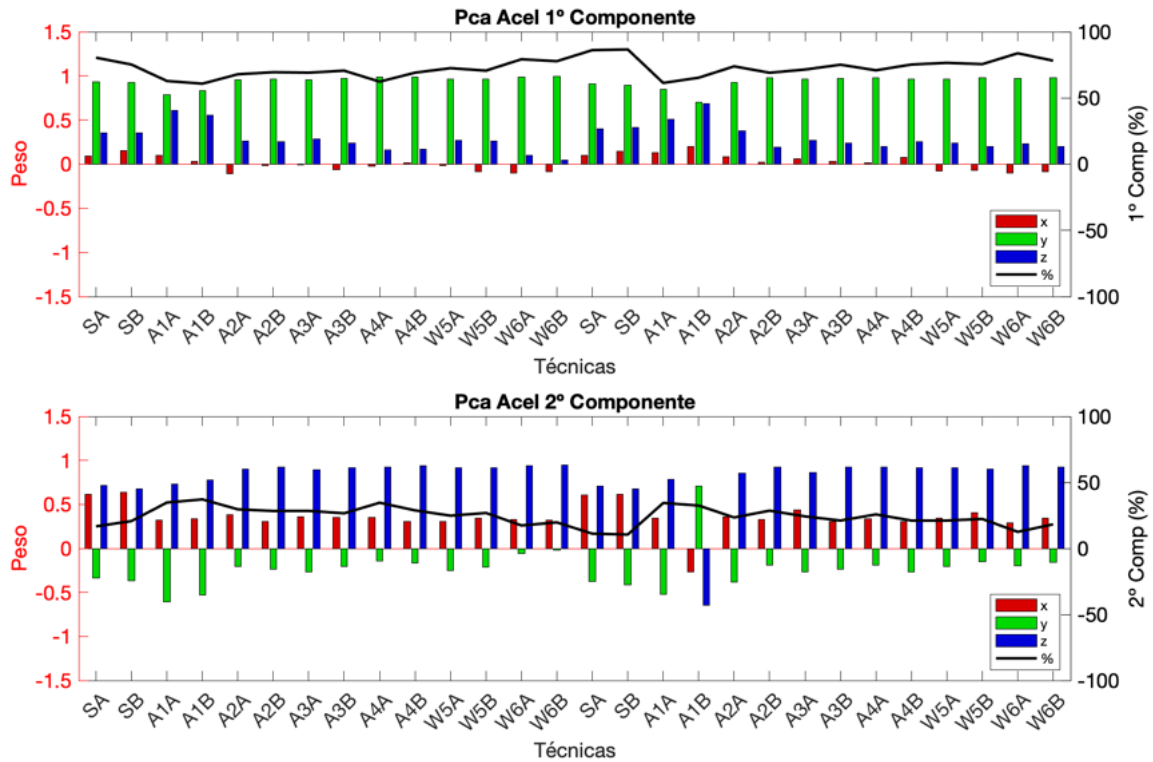


Figura 15: Contribuições individuais de cada eixo (peso) e os fatores de explicação (%) dos dois primeiros componentes principais das acelerações lineares, contendo todos os takes de um participante do experimento 1.

cada intervalo corresponde à diferença temporal entre dois ataques sucessivos. Nesta análise, contudo, o primeiro IOI foi definido como o intervalo entre o início da gravação e o primeiro onset, após a aplicação de um processo de normalização, de modo a preservar a correspondência posicional entre os valores de IOI e os respectivos onsets. Para fins de referência temporal, considerou-se que, no andamento de 60 bpm, o IOI canônico é de 250 ms, enquanto em 100 bpm o valor padrão é de 150 ms. Essas medidas são representadas nos gráficos por retas de referência, cuja função é indicar atrasos e antecipações dos ataques em relação ao metrônomo: valores acima da linha de referência correspondem a atrasos, enquanto valores abaixo indicam antecipações.

Os módulos de aceleração linear e velocidade angular apresentados na Figura 18 foram obtidos por um take de strumming, a 60 bpm. As fórmulas para o cálculo dessas métricas já estão implementadas no Matlab; portanto, focamos aqui em sua interpretação. O módulo de aceleração linear fornece uma medida da intensidade do movimento de translação, útil para detectar eventos como impactos ou mudanças bruscas de direção. No contexto deste estudo, ele permite inferir o impacto da palheta com as cordas do violão,

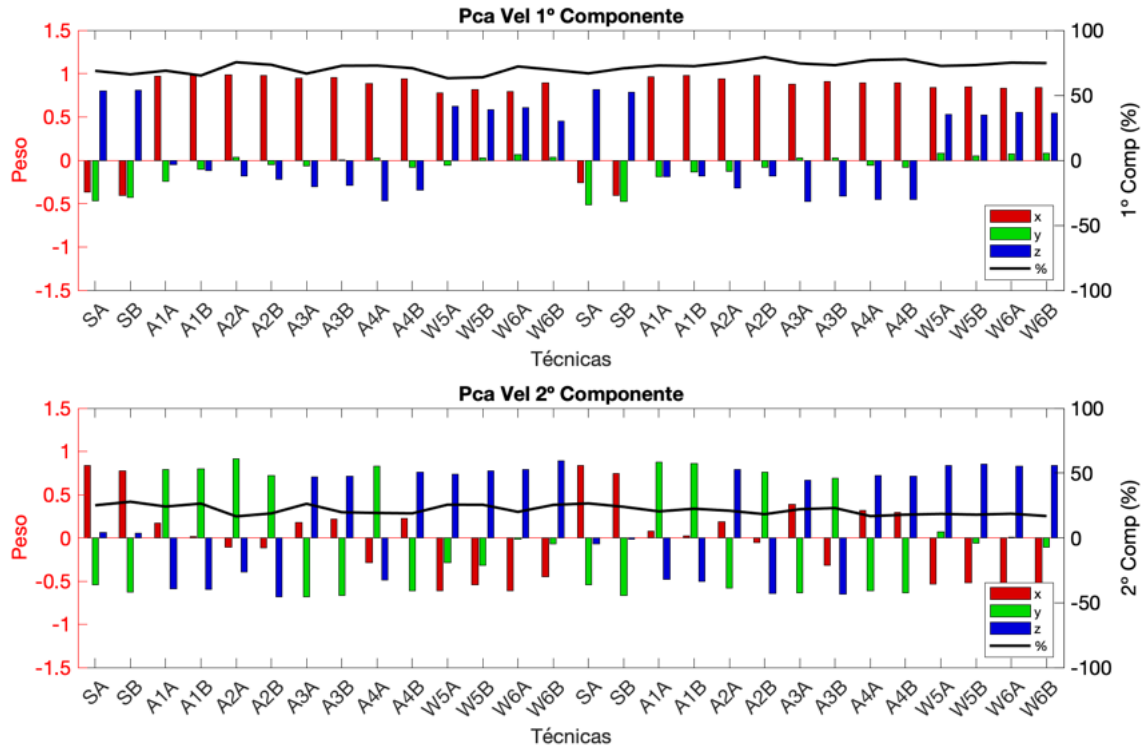


Figura 16: Contribuições individuais de cada eixo (peso) e os fatores de explicação (%) dos dois primeiros componentes principais das velocidades angulares, contendo todos os takes de um participante do experimento 1.

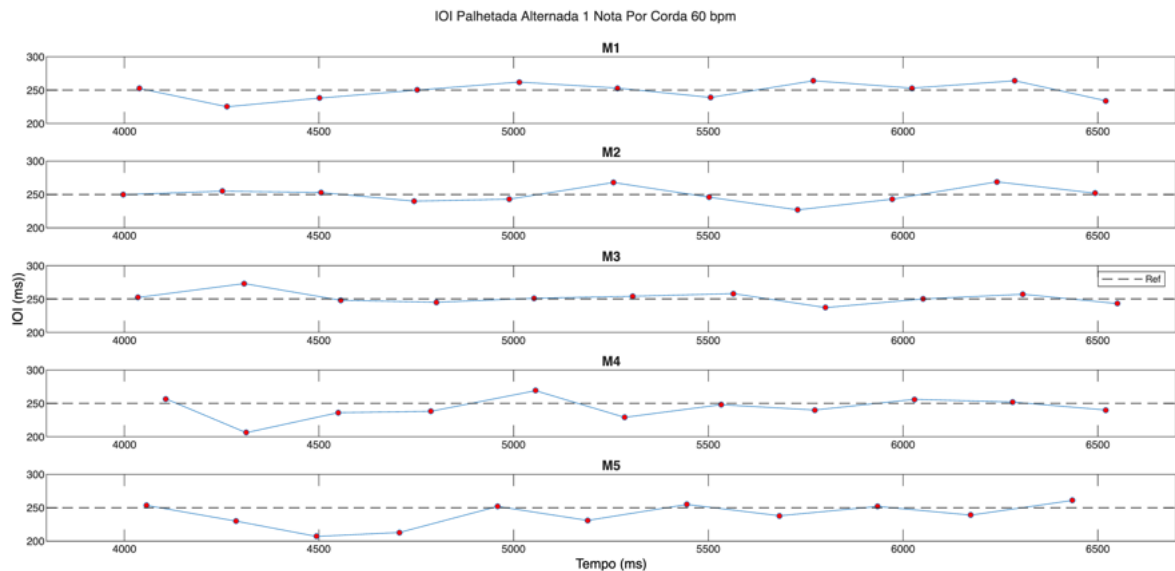


Figura 17: IOIs calculados na técnica de palhetada alternada 1 nota por corda, em 60 bpm, realizado pelos cinco performs.

bem como as alterações na direção dos gestos e, nos casos específicos do strumming e do tremolo, identificar ocorrências de movimentos da mão sem ataques nas cordas. De forma semelhante, o módulo de velocidade angular indica a rapidez com que o dispositivo

está girando em qualquer direção. Essa métrica permite analisar se as técnicas empregadas pelos músicos fazem uso significativo de rotações ou movimentos lineares durante a execução.

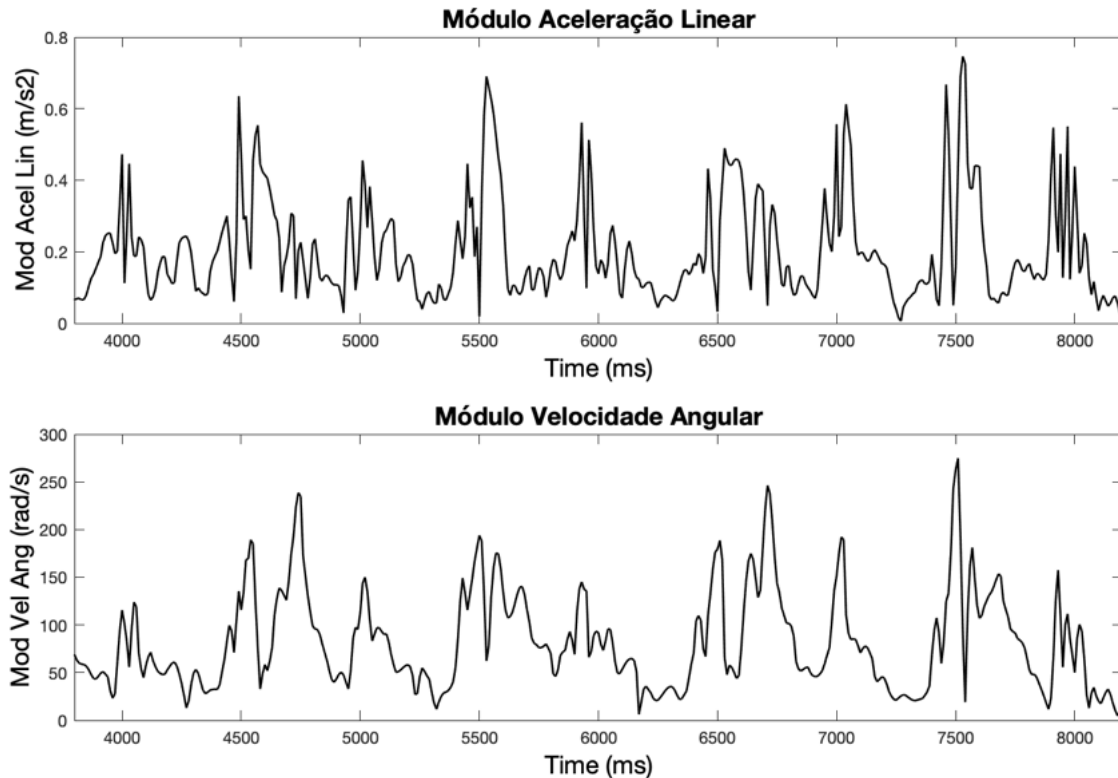


Figura 18: Módulos de aceleração linear e velocidade angular obtidos por um take de strumming, a 60 bpm.

Os ângulos de orientação não são apresentados diretamente por gráficos neste estudo, contudo desempenham um papel essencial no cálculo das direções dos picos. Utilizando os ângulos de orientação (azimute e elevação) em conjunto com os valores dos picos de aceleração e velocidade, é possível determinar com precisão a direção de cada pico detectado. Essa análise das direções é crucial para compreender a dinâmica e a complexidade dos movimentos executados durante as técnicas de palhetada, fornecendo informações detalhadas sobre os gestos realizados, sem a necessidade de uma representação gráfica direta desses dados. A Figura 19 mostra os picos, com amplitude e direção (ver Tabela 1 e Figura 3), da técnica de sweep picking com 6 cordas, a 100 Bpm.

### Pequeno excursão sobre os picos de aceleração e velocidade

Um movimento de translação linear da mão de um ponto a outro gera dois picos de aceleração, um positivo e outro negativo. Em movimentos mais rápidos de vai e vem,

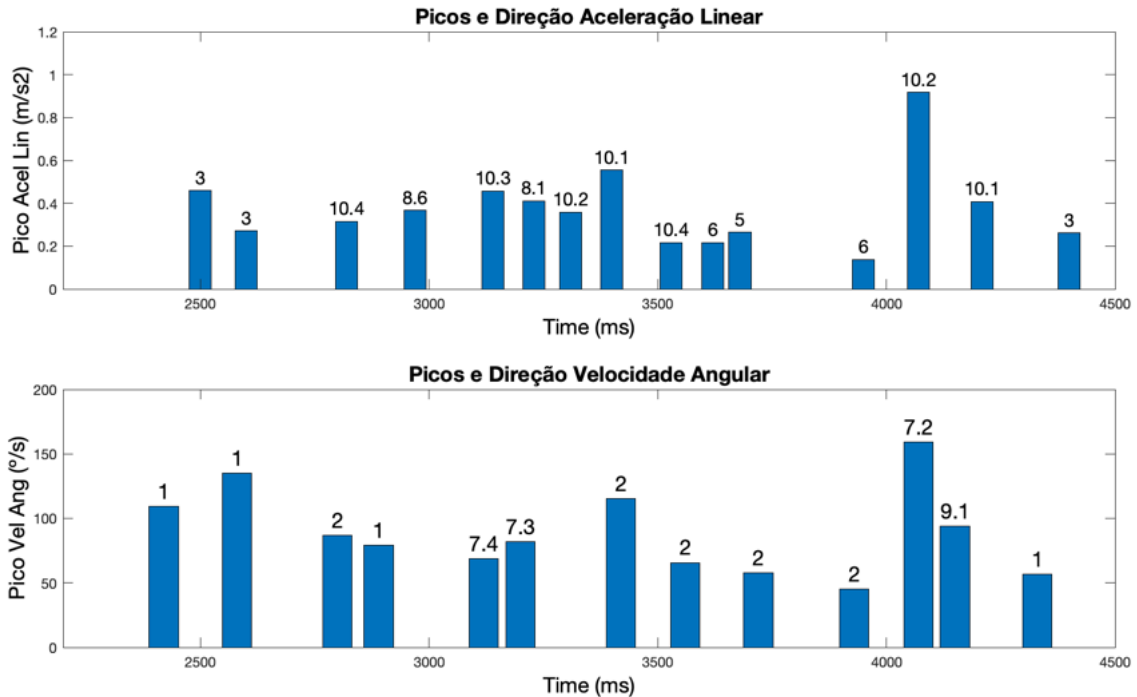


Figura 19: Picos, amplitude e direção obtidos por um take de sweep picking com 6 cordas, a 100 bpm.

o segundo pico do movimento em um sentido se confunde com o primeiro pico do sentido contrário. Já no movimento de rotação do pulso de um ponto a outro pode-se observar um valor de velocidade maior na direção da rotação, e também uma pequeno rebote no sentido contrário. Em movimentos cíclicos este rebote já se transforma na velocidade no sentido oposto. A interação da palheta com a corda (tanto no contato quanto na liberação) e o grau de rigidez da ligação entre a palheta e os dedos (que vai se refletir no dorso da mão, local de medida dessas variáveis pelo IMU) tornam este comportamento – e sua análise – bem mais complexas.

Nosso setup experimental não tem condições de desvendar todos esses detalhes, devido principalmente à falta de confiabilidade dos dados das forças sobre a palheta. De todo modo é possível apontar as principais tendências das amplitudes e direções dos gestos durante as amostras.

### 3.3.1.3 Integração dos dados

Após a apresentação individual de cada variável, com o intuito de demonstrar a natureza e a complexidade dos dados coletados, passamos agora à etapa de integração multimodal. Aqui, os diferentes parâmetros – sonoros, gestuais e de força – são represen-

tados de forma conjunta, permitindo observar as relações temporais e dinâmicas entre eles ao longo da execução. Essa visualização integrada busca evidenciar como as dimensões acústica e gestual interagem de maneira coordenada durante a técnica de palhetada, possibilitando uma leitura mais abrangente dos comportamentos individuais e de controle dos movimentos empregados.

O gráfico apresentado a seguir (Figura 20) constitui o modelo padrão de visualização integrado dos dados para tratar amostras individuais adotado nesta pesquisa. Em casos específicos pode-se substituir ou eliminar alguma variável, de acordo com a conveniência da análise, como mostra a Figura 21. Neles, são reunidas em um único painel as principais variáveis analisadas: a forma de onda (que expressa a dinâmica sonora e os momentos de ataque), o IOI (associado à expressão rítmica, contando com referências temporais), a força aplicada na palheta, e os parâmetros gestuais derivados dos sensores inerciais, representados pelos picos e/ou curvas nos três eixos de aceleração linear e de velocidade angular. Optou-se, neste trabalho, por representar os pulsos na subdivisão em semi-colcheias, uma vez que essa é a figura rítmica adotada em todos os experimentos realizados, com exceção do estudo sobre o tremolo, técnica na qual não há referência explícita às batidas no registro gráfico.

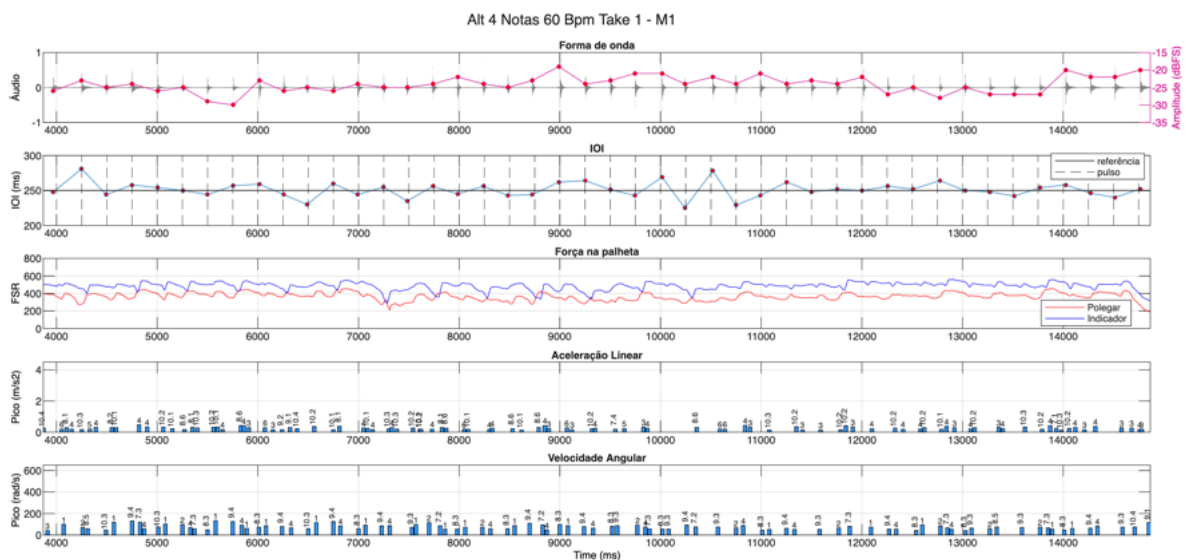


Figura 20: Configuração padrão de gráficos integrando as informações obtidas pelas diferentes fontes de dados do estudo.

A disposição dessas camadas permite observar correspondências entre gestos e som, como, no segundo exemplo, o aumento progressivo da frequência de ataques em relação à

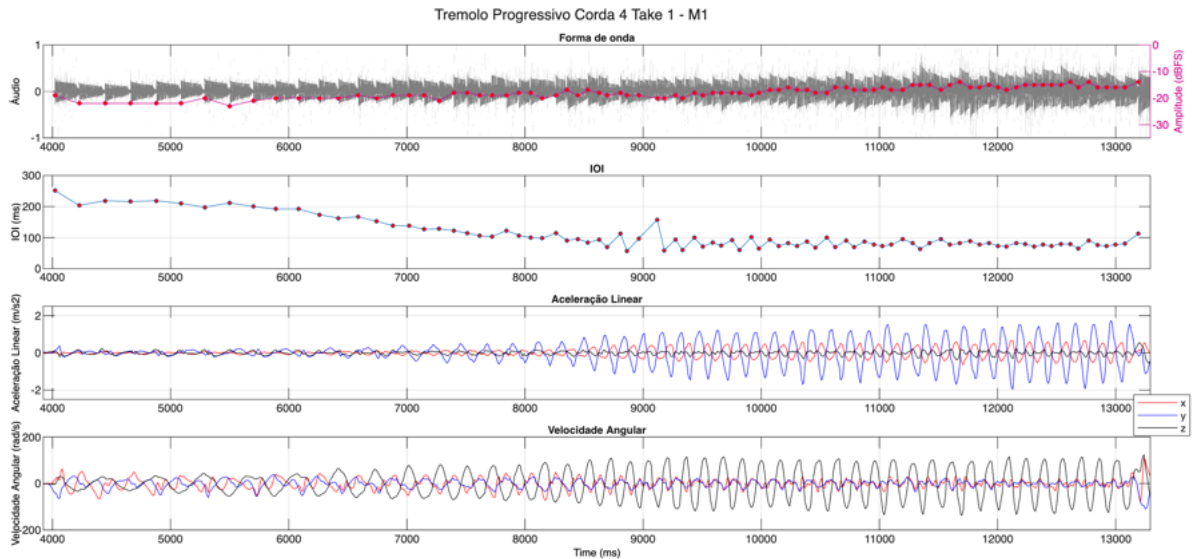


Figura 21: Variação de apresentação dos dados integrados no gráfico padrão.

diminuição dos valores de IOI, a intensificação gradual da aceleração linear e velocidade angular no decorrer do tremolo, e o modo como esses fatores convergem na estabilização do gesto. Dessa forma, os gráficos não apenas sintetizam as informações de diferentes fontes, mas pela padronização também servem como base comparativa entre as condições de execução.

Para uma abordagem comparativa entre músicos, mostraremos gráficos do tipo boxplot (Figura 22), que apresentam uma forma condensada de visualizar a distribuição estatística de um conjunto de dados numéricos, permitindo comparar, de modo simultâneo, tendências centrais, dispersões e presença de valores atípicos (outliers). Cada caixa representa o comportamento de uma variável contínua — neste caso, a amplitude média dos ataques, expressa em dBFS, obtida para cada músico e para cada take do estudo de tremolo.

A linha central de cada caixa corresponde à mediana do conjunto de dados, isto é, o valor que separa as metades superior e inferior da amostra, representando a tendência central menos sensível a valores extremos do que a média aritmética. A extensão vertical da caixa delimita o chamado intervalo interquartil (IQR), compreendido entre o primeiro quartil (Q1, 25%) e o terceiro quartil (Q3, 75%), que contém 50% das observações mais centrais. Assim, quanto maior a altura da caixa, maior é a variabilidade dos valores de amplitude entre os ataques daquele músico/take; quanto menor a caixa, mais homogênea é a execução. As hastes (ou whiskers) se estendem a partir dos limites da caixa até

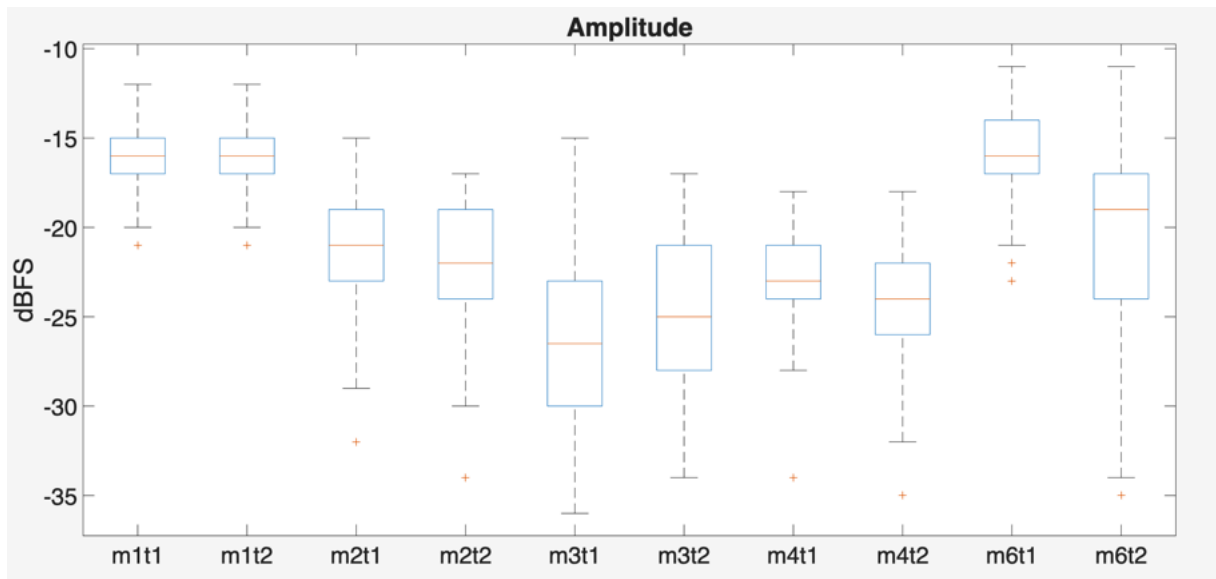


Figura 22: Gráfico do tipo boxplot, no qual identificamos: a mediana em vermelho; a variabilidade dos dados na caixa em azul; valores máximo e mínimos pelas hastes; valores atípicos (+).

os valores máximos e mínimos que ainda são considerados “normais”, isto é, que não ultrapassam  $1,5 \times \text{IQR}$  acima de Q3 ou abaixo de Q1. Pontos individuais representados por cruces (+) indicam outliers, valores considerados atípicos, neste exemplo associados a variações acentuadas na intensidade de ataque (ataques mais fracos ou mais fortes isolados). No eixo vertical estão as amplitudes em dBFS: valores mais negativos indicam menor intensidade sonora. Observa-se, por exemplo, que o músico M1 apresenta uma distribuição com medianas próximas de  $-15$  dBFS e caixas relativamente compactas. Já M2 e M3 exibem medianas mais baixas (cerca de  $-20$  a  $-25$  dBFS) e caixas mais altas, indicando maior variabilidade dinâmica.

A partir das análises com PCA fizemos uma triagem das amostras a serem discutidas individualmente; esta escolha se deu por semelhanças e diferenças entre e intra-músicos. Ao final de cada situação de estudo apresentamos uma abordagem conjunta de todas elas. O conjunto de todas as amostras se encontra nos apêndices.

Concluimos, assim, a apresentação das ferramentas de análise dos dados coletados, abrangendo tanto as informações brutas quanto as processadas, provenientes das três fontes principais deste estudo. Essa etapa permitiu contextualizar a diversidade e a complexidade dos dados utilizados, fornecendo uma base sólida para as análises subsequentes. Na próxima seção, detalharemos os experimentos realizados, explorando como esses dados foram utilizados para investigar as técnicas de palhetada estudadas. Serão descritos

os métodos aplicados, as métricas analisadas e os resultados obtidos, aprofundando a compreensão sobre os aspectos específicos da performance de cada participante.

## 4 PRIMEIRO EXPERIMENTO

Este primeiro experimento é dedicado a três das quatro técnicas selecionadas, a saber: palhetada alternada, *sweep picking* e *strumming*. Aqui decidimos concentrar a atenção apenas nos gestos da mão que segura a palheta (a mão direita para todos os participantes do experimento), enquanto a mão esquerda é responsável por abafar as cordas no braço do instrumento. Os trechos exploram situações técnicas variadas em todas as 6 cordas do instrumento, com exceção de um sweep que cobre 5 cordas.

No caso do *strumming*, o ritmo proposto serve como sugestão de acompanhamento para a música *Mrs. Robinson*, de Simon and Garfunkel (Figura 23). A partitura apresentada não contém mais informações além do ritmo e da direção da palhetada, deixando ao músico a liberdade de interpretação. Embora todas as cordas estejam indicadas para se tocar o “acorde”, na prática, o músico pode optar por tocar um número menor de cordas ou escolher realizar uma divisão própria entre as regiões grave e aguda.

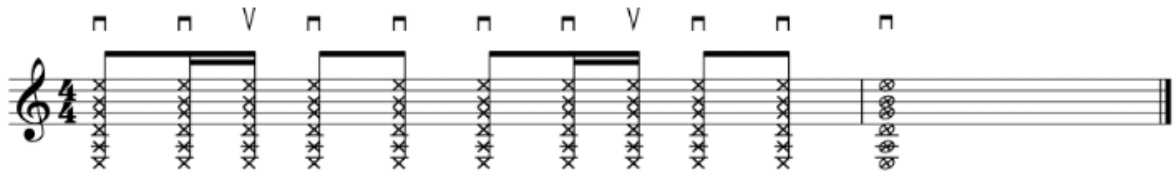


Figura 23: Partitura do ritmo proposto no estudo da técnica de *strumming*

Para a palhetada alternada, trabalhamos com 1, 2, 3 e 4 notas por corda, como ilustrado nas partituras da Figura 24. É comum o uso dessa técnica também com mais notas por cordas, porém nos limitamos a esses 4 exemplos. Apesar do abafamento das cordas não ser o modo mais comum de uso desta técnica em performance, ele é indicado para desenvolvimento e estudo.<sup>11</sup>

A Figura 25 apresenta o trecho utilizado no estudo da técnica de *sweep picking*, executado utilizando 5 e 6 cordas.

Para o estudo de *strumming*, *sweep picking* e palhetada alternada contamos com a participação de cinco músicos, colaboradores dessa pesquisa, todos experientes em performance musical porém com backgrounds distintos. Identificaremos os performers por M1, M2, M3, M4 e M5, que iremos caracterizar a seguir sobre suas experiências profissionais e modo de pegada da palheta.

<sup>11</sup><https://youtu.be/LnilP2wwxPo?t=531>, acesso em 11/11/2025



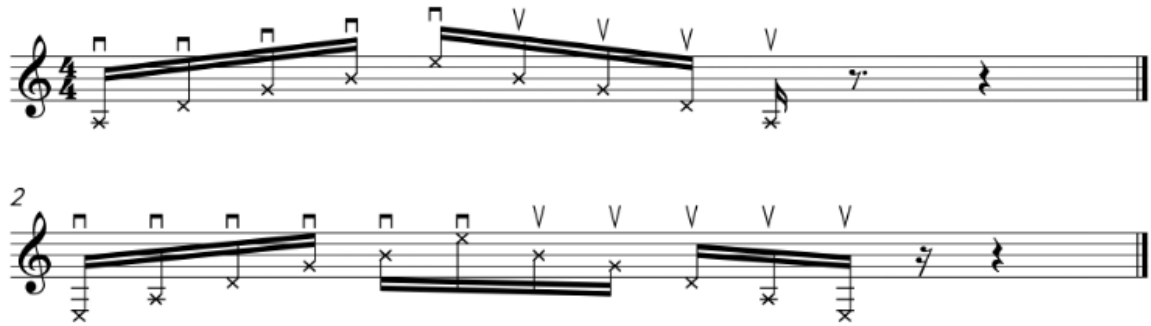


Figura 25: Partitura para a técnica de *sweep picking* utilizando 5 e 6 cordas

O músico M1 toca violão (principalmente com cordas de aço) e guitarra, alternando entre os dois instrumentos constantemente. É experiente em gravação de estúdio, contando portando com muita prática com uso de metrônomo, além de também utilizar andamentos fixos em shows. É formado em Música Popular e mestre em Música, ambos pela UFMG, atuando principalmente como músico e produtor musical do segmento sertanejo. A Figura 26 nos mostra o modo como esse músico segura a palheta, destacando-se: os dedos que não seguram a palheta estão abertos, e não há apoio do dedo mínimo no corpo do instrumento; o ângulo de inclinação lateral da palheta<sup>12</sup> em relação às cordas é praticamente reto, com uso de uma pequena porção da ponta no contato com a corda; os ataques ocorrem no centro da boca do instrumento.



Figura 26: Pegada da palheta do Músico 1

<sup>12</sup>Neste trabalho, o termo inclinação lateral da palheta refere-se ao ângulo formado entre o plano da palheta e o plano das cordas no eixo esquerda-direita, também conhecido na literatura como *pick slanting angle*.

M2 é guitarrista, com experiência em música gospel e jazz fusion. Segundo seu próprio relato, usa metrônomo apenas para estudo e eventualmente em gravações. É formado em Música Popular pela UFMG e atualmente acompanha uma banda de baile. Em relação a pegada da palheta, utiliza o dedo mínimo como apoio (com os dedos que não seguram a palheta abertos), apresenta o ângulo de inclinação lateral e a porção de palheta em contato com as cordas similar ao M1, e os ataques ocorrem próximo ao final da boca do instrumento, conforme mostra a Figura 27.



Figura 27: Pegada da palheta do Músico 2

M3 é guitarrista, formado em Música Popular pela UFMG, atuando como músico instrumental de jazz. Utiliza o metrônomo eventualmente em gravações e estudo, mas se diz não acostumado com esse tipo de prática/estudo. Diferente dos músicos anteriores, os dedos que não seguram a palheta ficam fechados na mão e há apoio do pulso sobre o cavalete do violão. Segundo a Figura 28 percebemos uma leve inclinação da palheta em relação ao plano vertical, mas sem ângulo de inclinação lateral, e também utiliza pequena porção da palheta. Os ataques ocorrem no final da boca do violão.

M4 é violonista (cordas de aço) e guitarrista, autodidata, atuando em vários segmentos (baile, axé e sertanejo). Utiliza metrônomo em shows e em estudo. Na Figura 29 percebemos dedos abertos, com apoio do mínimo no corpo do violão e pequeno ângulo de inclinação lateral da palheta. Dentre os participantes é o que apresenta menor porção de contato da palheta, com ataques mais próximos ao cavalete do instrumento.

Já o músico M5 é violonista tradicional, com pouca prática atual com palheta, apesar de ter estudado suas técnicas em um período anterior. Não relatou prática recente com



Figura 28: Pegada da palheta do Músico 3

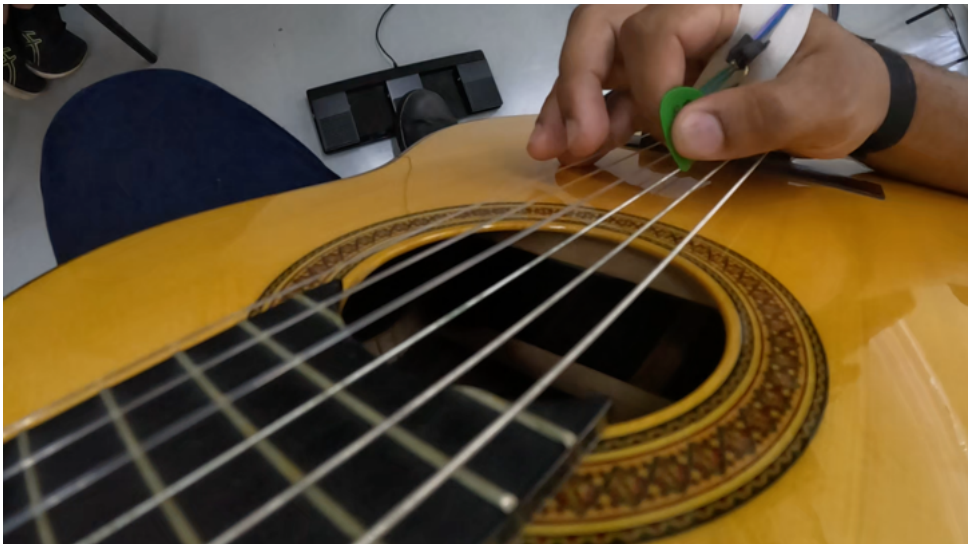


Figura 29: Pegada da palheta do Músico 4

metrônomo. É bacharel em violão pela UFU e mestre em Música pela mesma instituição. Como podemos observar na Figura 30, há apoio com o dedo mínimo e dedos abertos, com a palheta com certo ângulo de inclinação lateral. Os ataques ocorrem próximos à ponte do violão, com pouca porção da palheta no contato com as cordas.

Com as gravações realizadas por esses 5 músicos obtivemos 4 exemplos de palhetada alternada, 2 de sweep e 1 de *strumming*, em dois takes cada, em dois andamentos (60 e 100 bpm), totalizando 140 conjuntos de dados.<sup>13</sup> Na próxima seção faremos uma análise desses dados, buscando pontuar diferenças e semelhanças observadas entre os músicos,

<sup>13</sup>Todos os takes, com marcação nos comentários, podem ser observados em <https://www.youtube.com/watch?v=l8q7pIJsUw8>



Figura 30: Pegada da palheta do Músico 5

além de observar a consistência de um mesmo performer.

#### 4.1 Resultados

Como se trata de uma análise de dados oriundos de modalidades distintas, iremos discuti-las separadamente, para em seguida buscar possíveis correlações. Inicialmente, apresentaremos uma análise panorâmica dos dados gestuais coletados, considerando todos os takes realizados por todos os músicos participantes do experimento de forma integrada. Essa abordagem permitirá identificar padrões gerais, bem como semelhanças e diferenças entre as execuções, fornecendo uma visão ampla do comportamento gestual. Posteriormente, procederemos a análises específicas para cada técnica instrumental investigada. Nessa etapa, exploraremos detalhadamente os aspectos mais relevantes identificados na observação geral, aprofundando-nos em características particulares que emergem em relação a cada técnica estudada.

##### 4.1.1 Análise gestual global

Inciaremos esta sessão com a análise dos ângulos de Euler. A Figura 31 apresenta o valor de variação por eixo dos ângulos de Euler, em todos os takes das três técnicas. A diferença entre os valores máximos e mínimos dos ângulos de Euler é uma métrica para avaliar o grau de mudança na orientação de um objeto em um espaço tridimensional e pode ser relacionada ao posicionamento da mão: variações grandes indicam que o músico

realizou uma significativa mudança de orientação; se forem pequenas a orientação da mão se manteve relativamente constante em torno do eixo analisado. O intervalo de interesse ficou restrito ao trecho de produção sonora, já que preparações e finalizações de frases podem causar mudanças significativas.

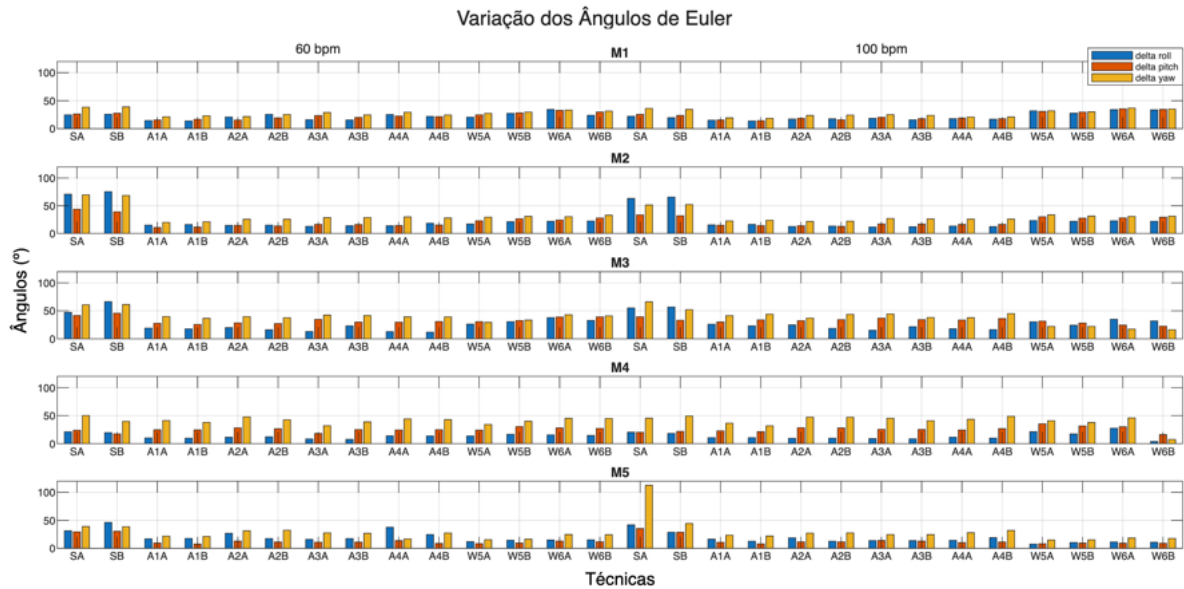


Figura 31: Valor de variação dos ângulos de Euler por eixo, de todos os músicos em todas as técnicas.

Observamos diferenças entre os músicos e entre as técnicas, para um mesmo músico. Destacamos maior regularidade em M1 e M4, que mostram variações semelhantes para as técnicas independente dos andamentos, com M1 apresentando equilíbrio entre os eixos e M4 com maiores valores de yaw em comparação com os outros dois eixos. M2, M3 e M5 demonstram uma estratégia gestual bem distinta para o posicionamento da mão na técnica de *strumming*.

A Figura 32 apresenta a média dos valores positivos e negativos das acelerações lineares dentro do trecho considerado (entre o primeiro e último ataques, desprezando as fases anteriores e posteriores). Essas informações fornecem observações importantes sobre a intensidade e o controle das técnicas, destacando aspectos como a estabilidade dos movimentos e os eixos dominantes nos gestos. Movimentos mais controlados tendem a apresentar variações mais estreitas, indicando um maior domínio gestual. Além disso, a análise dos eixos pode revelar quais direções (eixos y e z, neste caso) são mais predominantes no gesto. Se as médias dos valores positivos e negativos forem aproximadamente iguais em módulo, isso pode sugerir que o movimento é simétrico em torno de um ponto

central, indicando um controle técnico equilibrado.

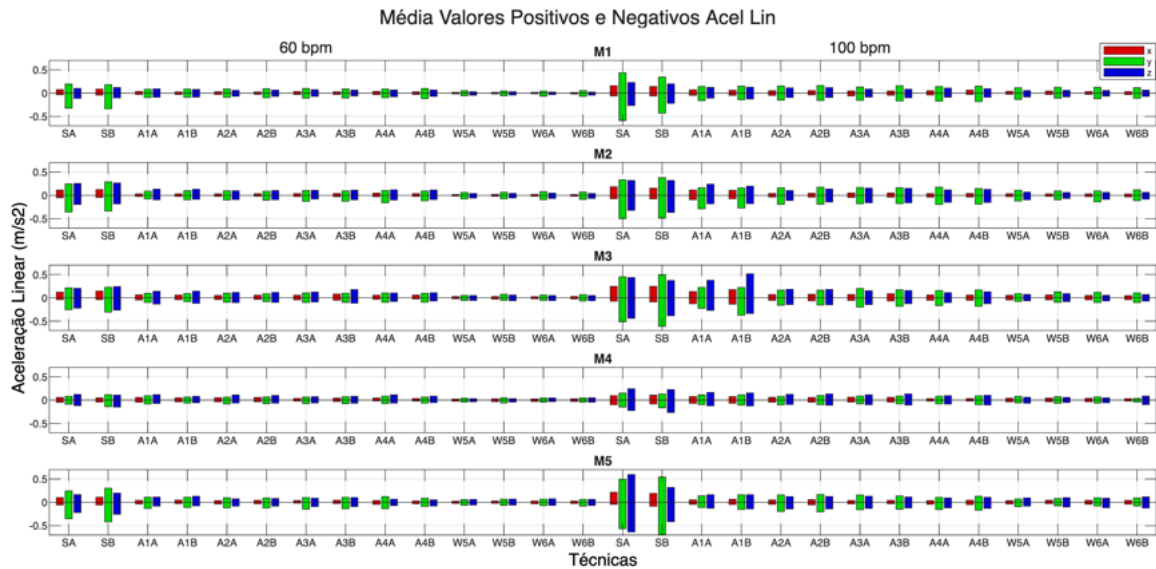


Figura 32: Média valores positivos e negativos de aceleração linear de todas amostras, de todos os músicos.

De forma geral, observamos que os cinco músicos demonstram o eixo y predominante nos gestos, com algumas exceções em M3 e M5, quando o eixo z se torna predominante. Também identificamos um aumento nos valores de aceleração com o andamento mais rápido, o que é esperado, uma vez que trechos mais rápidos demandam mudanças mais rápidas de velocidade, refletidas no aumento da aceleração. Os gestos de vai e vem da palheta, presentes no *strumming* e na palhetada alternada, apresentam valores maiores do que no *sweep*; de maneira inversa, o *strumming*, por atacar diversas cordas simultaneamente, mobiliza mais força em cada evento.

Podemos observar na Figura 33 as médias positivas e negativas das velocidades angulares de todos os trechos por todos os músicos. De forma análoga à análise das acelerações, também é possível identificar os eixos dominantes de rotação em cada técnica, bem como avaliar o equilíbrio rotacional. A análise revela estratégias distintas adotadas pelos músicos entre os dois andamentos (60 bpm e 100 bpm), com valores de rotação mais elevados no andamento mais rápido. Entre os músicos, observa-se uma diversidade de padrões: M4 demonstra uma abordagem equilibrada, distribuindo a rotação de maneira mais uniforme entre os três eixos (x, y e z). Por outro lado, M1 apresenta maiores rotações nos eixos x e z (exceto na técnica de *strumming*), enquanto em M2 e M5 predominam em x e y. Já M3 varia sua predominância de acordo com a técnica utilizada, alternando entre x

e y ou x e z. Em termos de simetria, os valores de rotação no eixo x apresentam, de forma geral, um bom equilíbrio em todos os músicos, indicando uma distribuição uniforme entre os movimentos positivos e negativos. Nos outros eixos, contudo, as variações são mais significativas, especialmente na técnica de *strumming*, que mostra médias de velocidades angulares negativas em y e z consideravelmente maiores que as positivas. Podemos inferir, portanto, que a palhetada para cima se dá mais na rotação do que a palhetada para baixo.

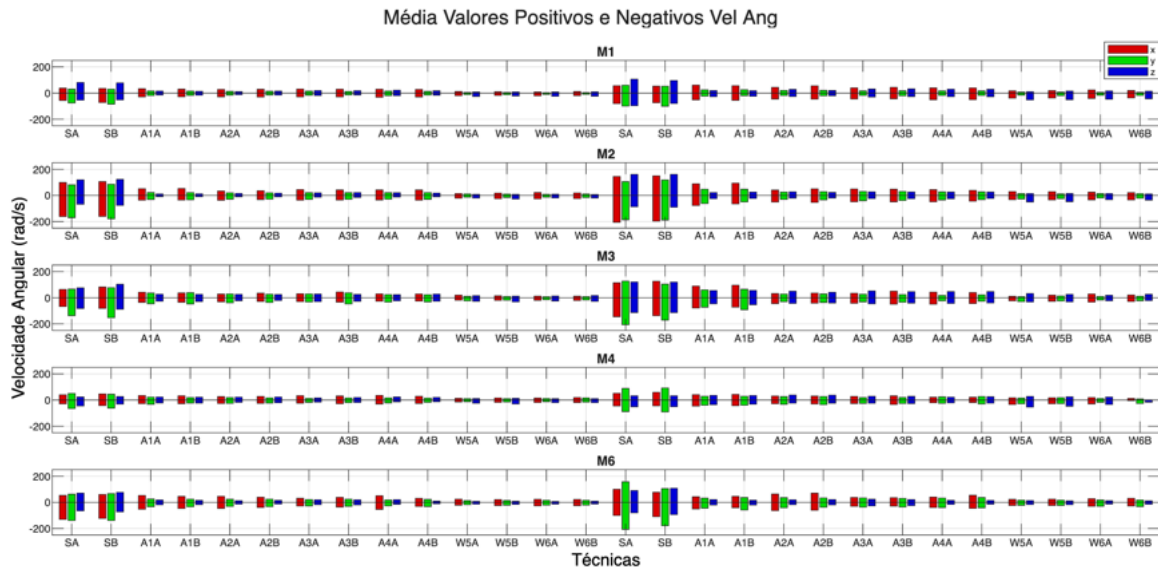


Figura 33: Média valores positivos e negativos de velocidade angular de todas amostras, de todos os músicos.

Como última etapa desta análise gestual geral, utilizamos a PCA aplicada às acelerações lineares e velocidades angulares. Embora a Análise de Componentes Principais seja tradicionalmente empregada para redução de dimensionalidade em contextos com grande número de variáveis, no presente estudo seu uso sobre os dados de aceleração linear e velocidade angular tem outro propósito: compreender o comportamento espacial dos gestos. Assim, a PCA é utilizada como ferramenta de interpretação das relações entre os eixos, permitindo visualizar e quantificar a direção predominante e a coerência do movimento no espaço tridimensional.

Esse método permite identificar o peso de contribuição de cada eixo (x, y e z) na composição de cada componente principal e o fator de explicação (ou variância explicada) associado a esse componente. Valores elevados em x, y ou z indicam que a aceleração ou rotação nesse eixo desempenha um papel significativo na direção definida pelo componente. Caso um eixo apresente um peso substancialmente maior que os demais, isso

sugere que o componente está fortemente alinhado com esse eixo específico. A PCA das acelerações lineares (Figura 34) revela tendências distintas entre os músicos.

M1 e M2 exibem, de forma geral, maior contribuição do eixo y, com os fatores do primeiro componente apresentando valores altos e constantes independentemente da técnica ou andamento. Essa consistência sugere uma maior padronização técnica desses músicos. Por outro lado, M5 mostra uma variação mais significativa, tanto entre diferentes técnicas quanto entre os andamentos, ainda com predominância do eixo y, indicando comportamentos gestuais distintos para cada caso. Já M3 e M4 alternam o eixo predominante entre y e z, evidenciando estratégias distintas de execução, especialmente em função do andamento. Essa alternância reflete diferenças na forma como esses músicos adaptam seus gestos às exigências técnicas. Apesar disso, ambos mantêm níveis relativamente estáveis na variância explicada pelo primeiro componente, sugerindo que, mesmo com mudanças de eixo predominante, a maior parte da variabilidade das acelerações é capturada de maneira consistente.

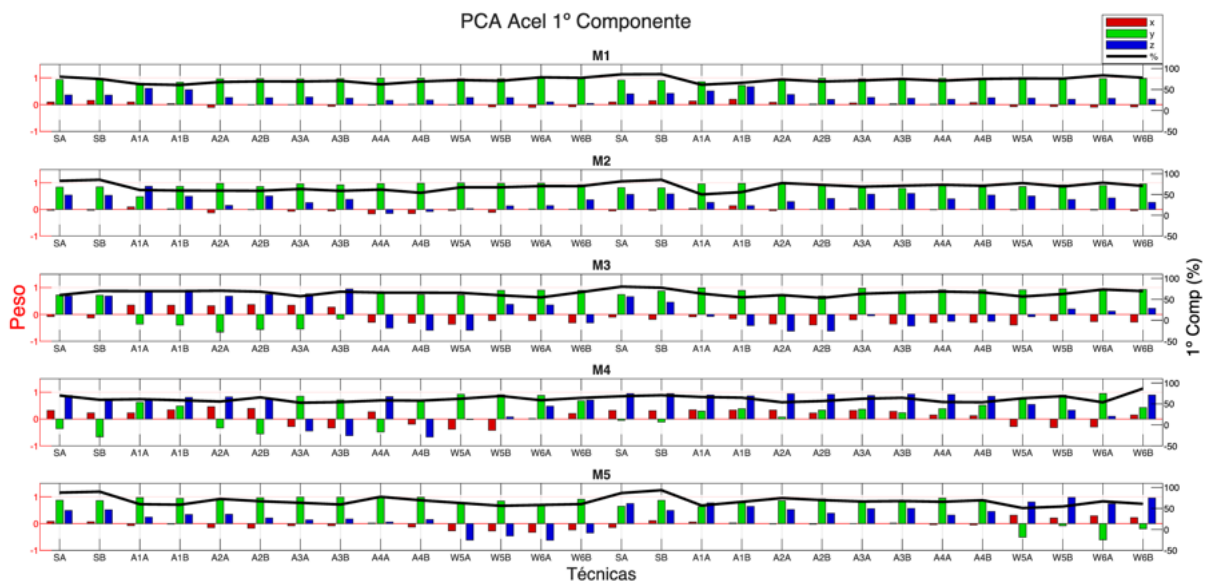


Figura 34: PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das acelerações lineares em todos os trechos, por todos os músicos.

A Análise de Componentes Principais das velocidades angulares revela (Figura 35) a predominância do eixo x na rotação de M1, M2 e M5 na maioria das técnicas. No entanto, observa-se uma mudança nos eixos dominantes no *strumming*: M1 passa a apresentar maior contribuição no eixo z, enquanto M5 transfere a predominância para o eixo y. Os valores de variância explicada associados às velocidades angulares seguem

padrões semelhantes aos observados nas acelerações lineares para esses músicos. Por outro lado, M3 e M4 não demonstram um padrão claro de predominância de rotação em nenhum eixo específico. Uma exceção ocorre com M4, que apresenta maior alinhamento com os eixos x e z nas técnicas de palhetada alternada a 60 bpm e de *sweep picking* a 100 bpm. Esses resultados destacam a variabilidade nas estratégias de rotação adotadas por esses músicos, refletindo escolhas gestuais mais diversificadas ou menos sistemáticas dependendo da técnica e do andamento.

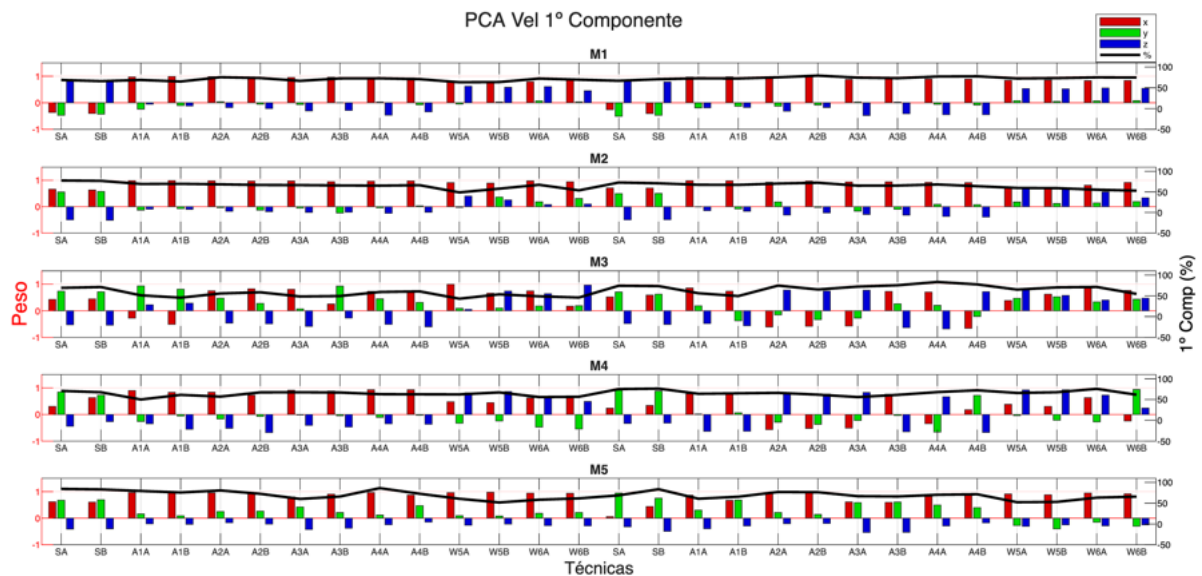


Figura 35: PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das velocidades angulares em todos os trechos, por todos os músicos.

Embora a análise distinga, em termos descritivos, os componentes de translação e rotação da mão, é importante destacar que, do ponto de vista gestual, esses movimentos não ocorrem de forma totalmente independente. Uma rotação do punho ou do antebraço inevitavelmente produz pequenas translações da mão no espaço, devido ao fato de que os eixos articulares não são perfeitos pivôs fixos.

Da mesma forma, movimentos predominantemente translacionais também podem gerar componentes rotacionais residuais, especialmente quando envolvem trajetórias curvas ou ajustadas para atingir diferentes cordas. Assim, translação e rotação devem ser entendidas como dimensões interdependentes de um mesmo gesto, que se combinam continuamente para permitir a execução da palhetada.

Em síntese, ainda que a análise dos dados permita separar numericamente as duas grandezas, a interpretação gestual não deve tratá-las como movimentos isolados, mas

como partes integradas de um mesmo sistema motor.

### Sobre direções dos picos

A interpretação das direções dos picos de aceleração linear e velocidade angular apresenta certa complexidade, sobretudo porque muitos desses picos resultam de combinações simultâneas de eixos, o que dificulta determinar, de forma clara, qual eixo exerce maior predominância em cada gesto. Embora uma análise detalhada baseada em histogramas de direções permita compreender com maior precisão essas distribuições, tal abordagem exige um nível de aprofundamento que será desenvolvido posteriormente, na seção de discussão geral. Para a descrição e interpretação dos gráficos apresentados nesta etapa, adotamos um procedimento complementar: utilizamos as informações fornecidas pelas PCAs para identificar os eixos dominantes em cada situação. Assim, todas as menções a “eixos dominantes” ao longo da apresentação dos gráficos referem-se aos resultados das PCAs, em complemento aos valores brutos de direção dos picos.

#### 4.1.2 Análise por técnica

Após uma análise mais global da posição da mão direita e dos movimentos de translação e rotação utilizados pelos músicos nas diferentes condições de estudo, trazemos as análises individuais de cada técnica.

##### 4.1.2.1 Palhetada alternada

A palhetada alternada (*alternate picking*, em inglês) baseia-se na alternância sistemática entre ataques para baixo (*downstroke*) e para cima (*upstroke*), de modo a estabelecer uma sequência contínua e regular de movimentos da palheta. Essa alternância busca otimizar a eficiência, permitindo a manutenção do ritmo, mesmo em passagens de alta velocidade ou com subdivisões complexas.

Do ponto de vista gestual, a técnica requer uma coordenação precisa entre os movimentos do punho e do antebraço. Além da regularidade de ataques, um aspecto central da palhetada alternada é o reposicionamento da mão direita durante as mudanças de corda. Esse reposicionamento deve ocorrer de modo a preservar a consistência rítmica, e o domínio desse deslocamento intercordas é essencial para evitar descontinuidades sonoras e garantir a uniformidade entre diferentes regiões do instrumento.

Em síntese, a palhetada alternada representa um equilíbrio entre movimento, controle rítmico e adaptação espacial, configurando-se como uma técnica de precisão gestual. Observaremos o comportamento dos músicos nesta técnica nas quatro situações de estudo (quantidade de notas por corda) descritas na seção anterior.

#### 4 notas por corda

Entre as configurações de palhetada alternada analisadas neste estudo, a variação com quatro notas por corda foi considerada, por todos os participantes, a de menor complexidade técnica. Tal percepção está associada ao fato de esse padrão corresponder ao primeiro exercício prático com palheta geralmente introduzido no início do aprendizado de guitarristas e violonistas, sendo amplamente utilizado tanto para o desenvolvimento da coordenação motora quanto como rotina de aquecimento. De modo geral, todos os participantes executaram esse trecho em ambos os andamentos sem necessidade de retomada ou repetição, indicando familiaridade com o padrão proposto.

A Figura 36 se refere ao take 1 realizada pelo M1, e a Figura 37 ao take 2, no andamento de 60 bpm. Observamos nos dois registros faixas estreitas de variação de amplitudes e intervalo entre onsets, que por sua vez estão bem alinhados com os pulsos. Do mesmo modo, as forças na palheta estão dentro de uma mesma faixa de variação, com flutuações durante o trecho. Picos de aceleração linear e velocidade angular baixos e consideravelmente regulares em amplitudes, indicando um gesto mais contido, e, apesar de grande variabilidade nas combinações dos eixos nos picos encontrados, percebe-se uma tendência de movimentação regular (com análise mais aprofundada na seção de discussão).

No andamento mais rápido, temos os gráficos da Figura 38, que pode representar os dois takes de M1. Em comparação com o trecho a 60 bpm, destacamos o atraso em relação ao pulso, mas ainda sim com pouco distanciamento à referência de IOI, e o comportamento dos picos parecidos, indicando mesma estratégia independente dos andamentos.

Os dois takes de M2, realizado com 60 bpm, estão apresentado em Figura 39 e Figura 40. Pode-se observar regularidade notável nas amplitudes extraídas no take 1, além de flutuações sucessivas acentuadas de IOIs, principalmente na primeira metade do trecho (sentido das cordas graves para as agudas). Observamos medidas das forças da palheta mais próximas em M1 e valores baixos de amplitude de picos, porém com uma predominância de combinação de eixos na categoria 10 para aceleração linear e categoria 7 para velocidade angular (ver Tabela 1).

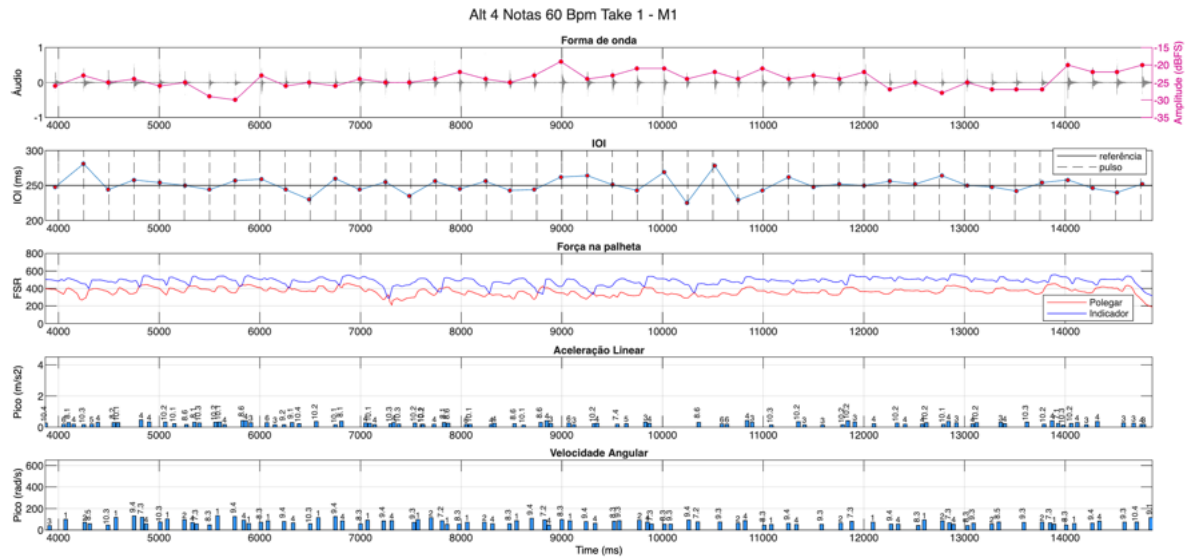


Figura 36: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.

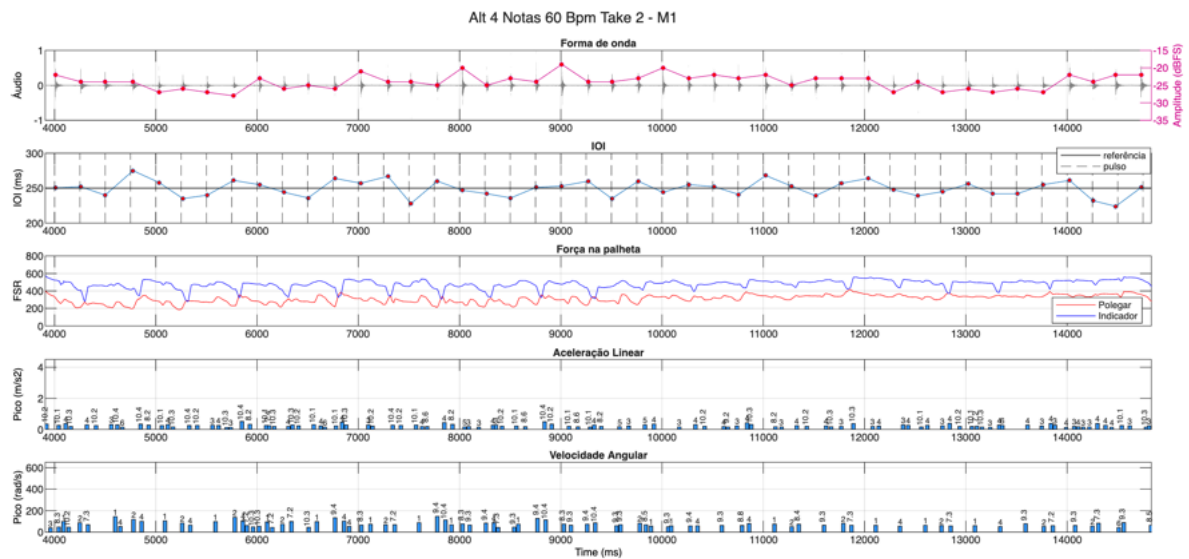


Figura 37: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.

Quando o andamento sobe (Figura 41), nos dois takes destacamos a troca de combinação de eixos nos picos de velocidade angular, passando da predominância da categoria 7 (x/y) para a categoria 9 (x/z).

M3 apresenta irregularidades entre os dois takes desta técnica, nos dois andamentos, retratados nas figuras seguintes. Quando realizada a técnica em 60 bpm (Figura 42 e Figura 43), percebemos o início com amplitudes bem baixas na primeira amostra, acom-

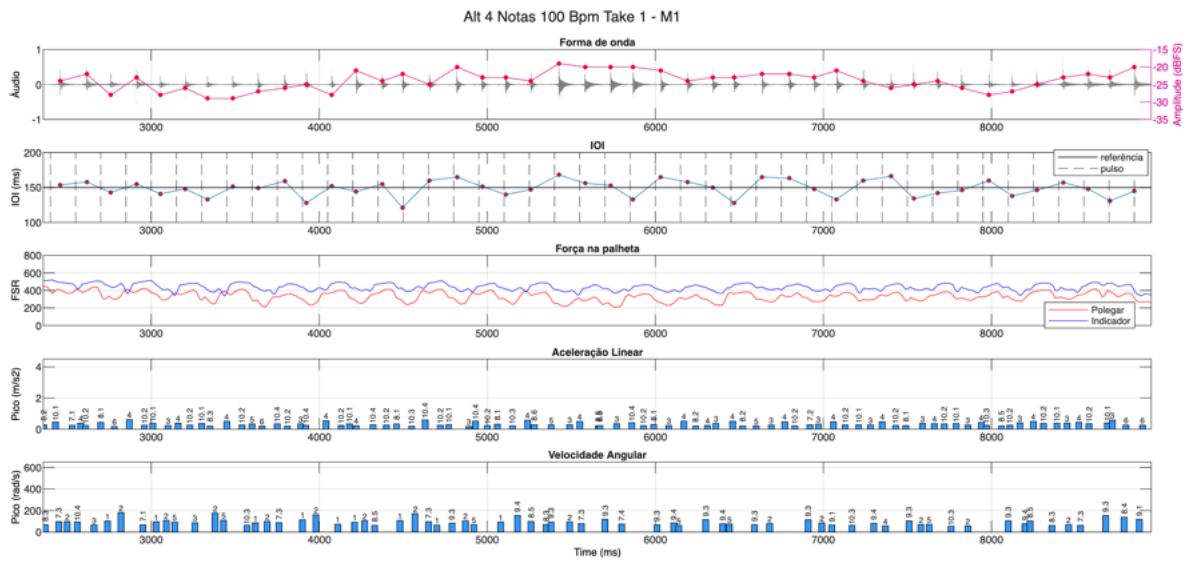


Figura 38: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.

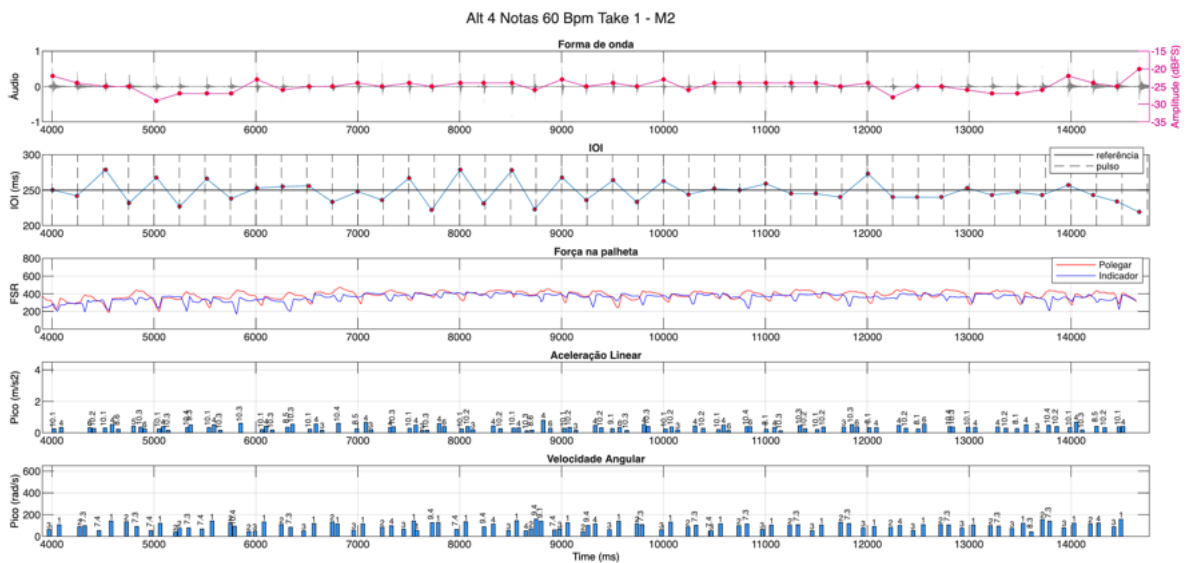


Figura 39: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.

panhada de grande variação, distanciamento da referência de IOI e alternância rítmica irregular durante todo o trecho. Os picos possuem mais ocorrência do que no take 2.

Já em 100 bpm, o primeiro take (Figura 44) mostra valores de IOIs bem distantes da referência, por vezes ultrapassando os limites da figura rítmica indicada (chegando a categoria de fusa). O segundo take (Figura 45) não apresenta valores extremos de IOI, mas mantém a irregularidade, acompanhado de menor força na palheta (indicando uma

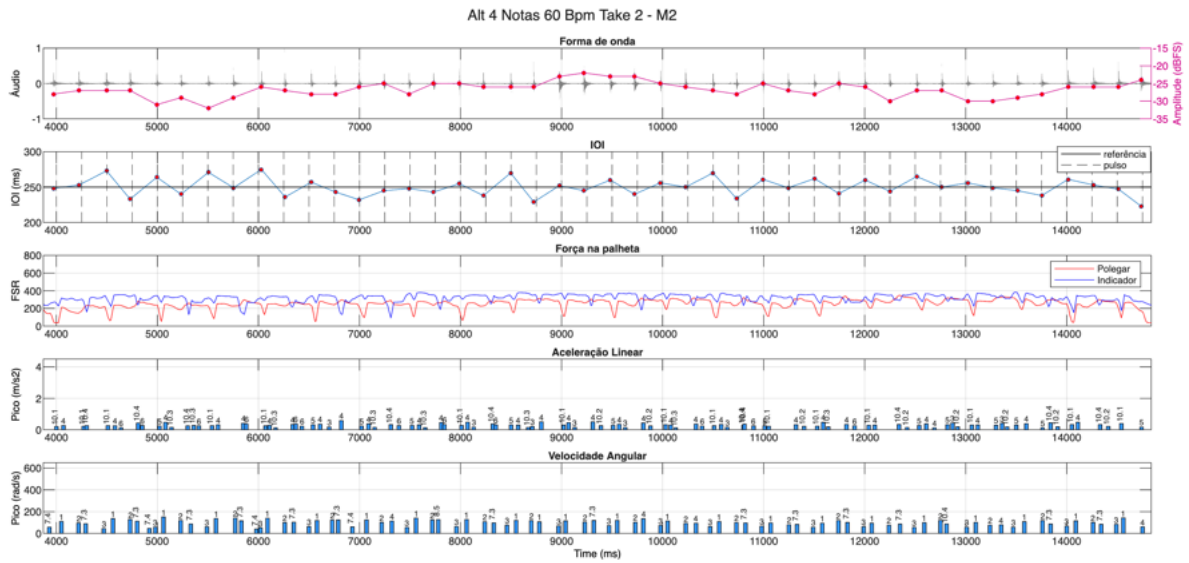


Figura 40: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.

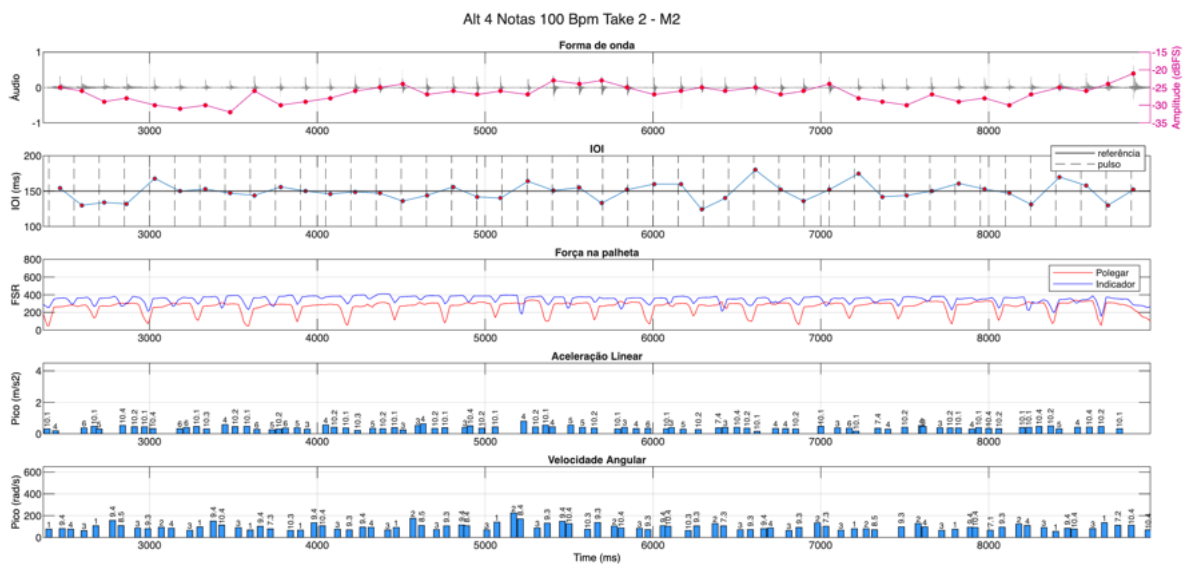


Figura 41: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.

pegada diferente entre os takes) e maior incidência de picos de velocidade angular.

O músico M4 mantém algumas características observadas nos participantes anteriores: amplitudes das notas regulares, com alguns saltos pontuais; tendência em manter um padrão alternante dos IOIs (com maiores variações a 100 bpm), mas com antecipação das notas em relação ao pulso; força na palheta semelhante para os dois dedos; picos de baixa intensidade, com grande combinação dos eixos x, y e z nas acelerações lineares e

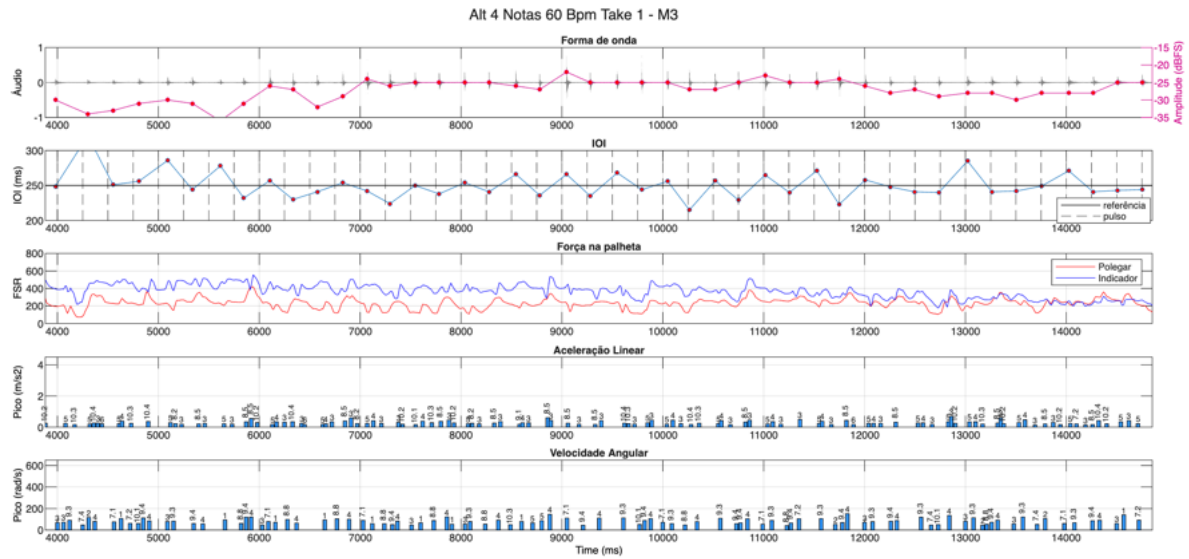


Figura 42: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.

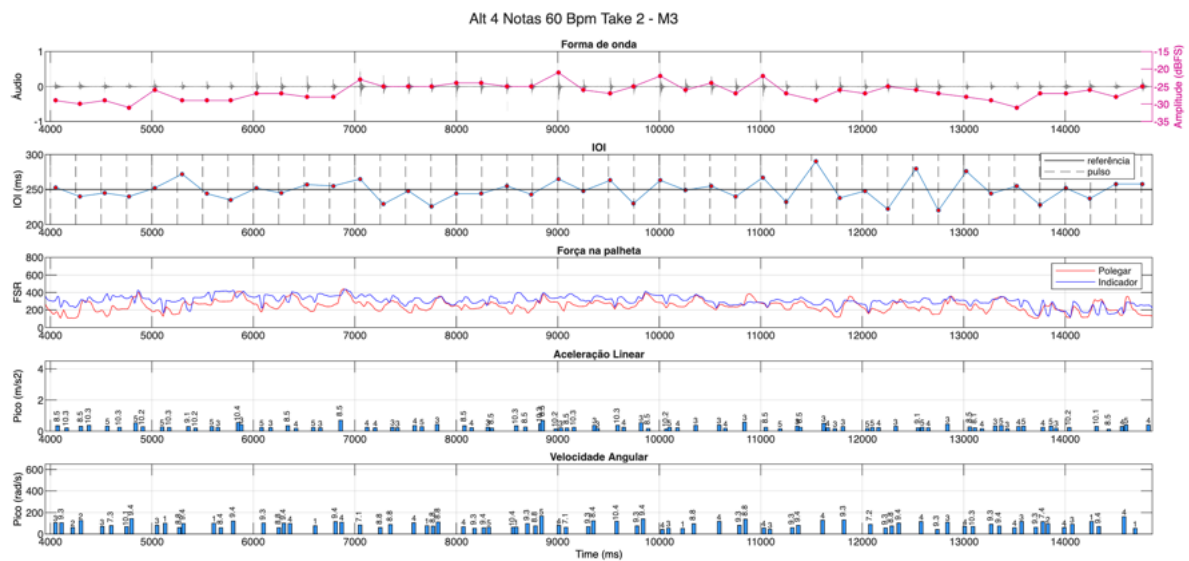


Figura 43: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.

velocidades angulares. As figuras Figura 46 e Figura 47 demonstram diferenças nas estratégias gestuais em 60 bpm, tanto em relação à quantidade de picos quanto à direção, principalmente na aceleração linear.

As Figura 48 e Figura 49 representam os takes no andamento a 100 bpm, que se destacam pela diferença nos picos das velocidades angulares: no primeiro take os eixos x e y são negativos e z positivo; já no segundo take, x e y passam a ser positivos e z negativo.

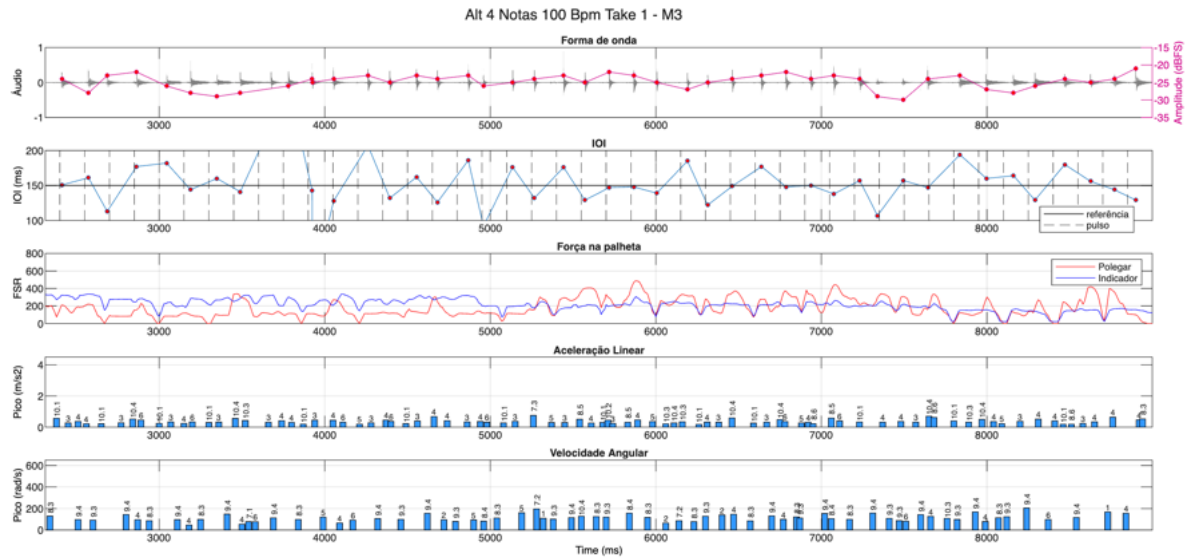


Figura 44: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.

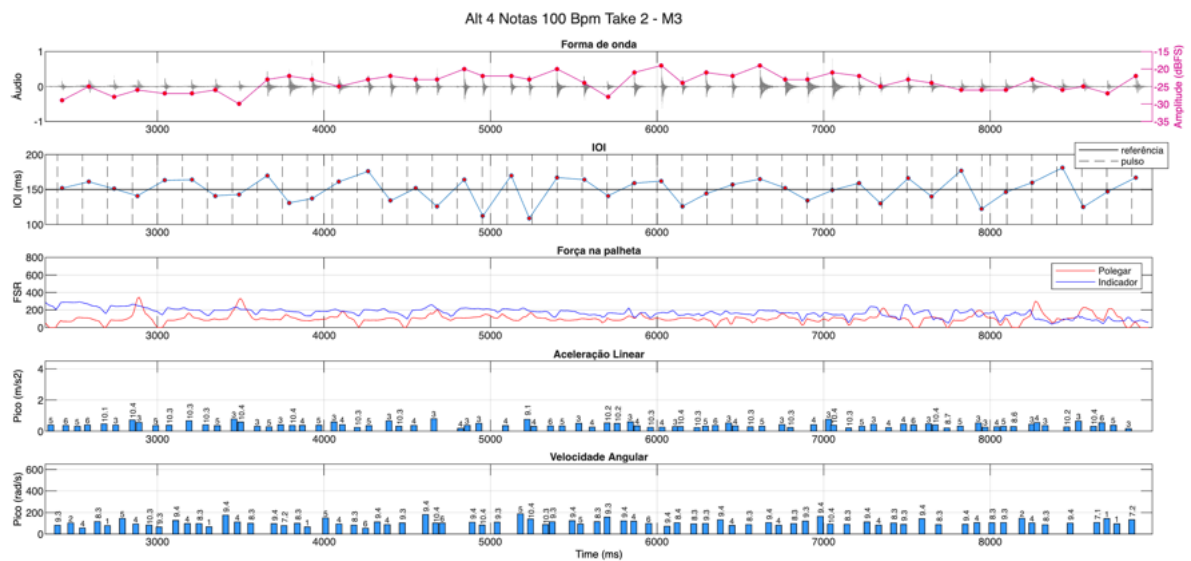


Figura 45: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.

Nos dois casos a predominância se divide entre os eixos y e z.

Podemos destacar para o músico M5 as intensidades maiores de velocidade angular no primeiro registro no andamento mais lento (Figura 50), queda nas intensidades e grandes flutuações sucessivas dos IOIs nas cordas agudas (entre 9000 e 11000 ms) no take 2 (Figura 50). Em 100 bpm (Figura 52) as irregularidades de amplitude e onsets se acentuam consideravelmente.

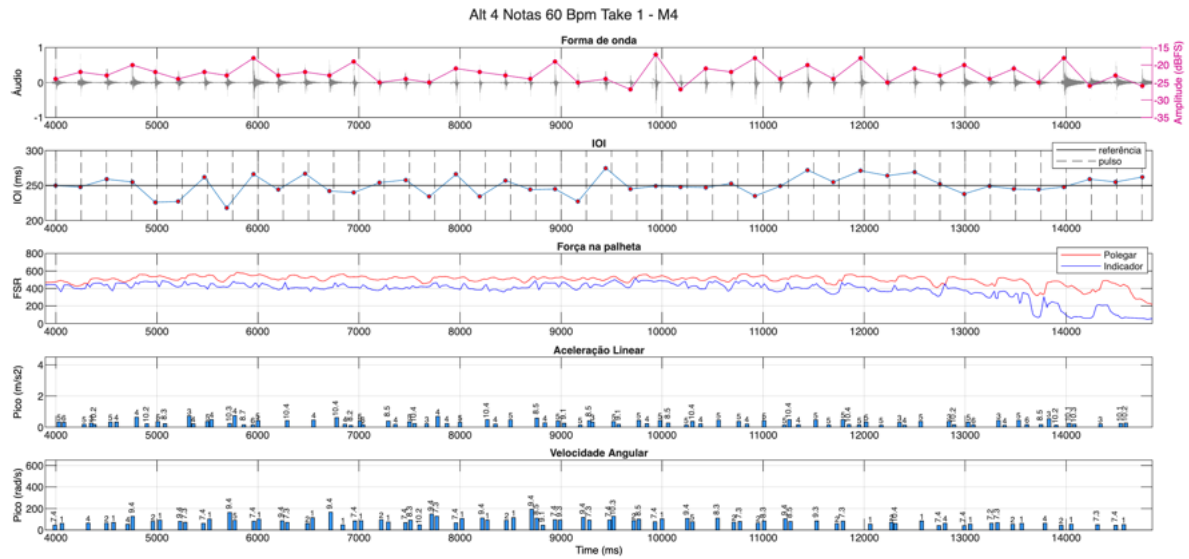


Figura 46: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.

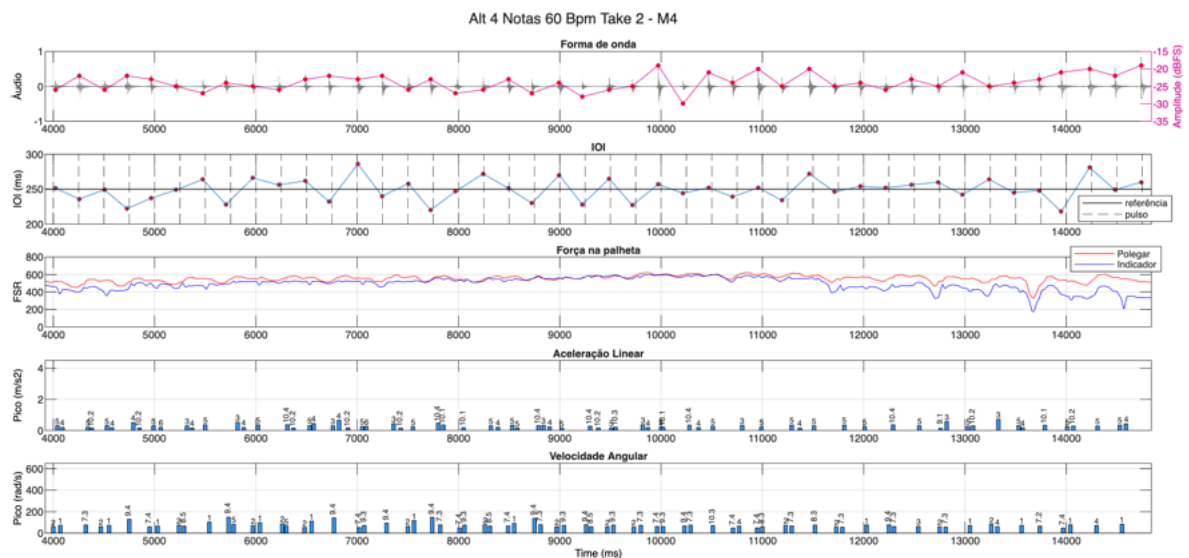


Figura 47: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.

Os gráficos a seguir têm como objetivo sintetizar as semelhanças e diferenças observadas nos registros referentes à técnica de palhetada alternada com quatro notas por corda, tanto intra quanto inter músicos, nos dois andamentos. Iniciaremos com o comparativo das amplitudes da Figura 53, onde podemos perceber o aumento geral da tendência central<sup>14</sup> no andamento em 100 bpm de M3 (2 dBFS acima) em relação ao mesmo músico

<sup>14</sup>Para revisão dos conceitos estatísticos dos gráficos tipo boxplot, ver 3.3.1.3

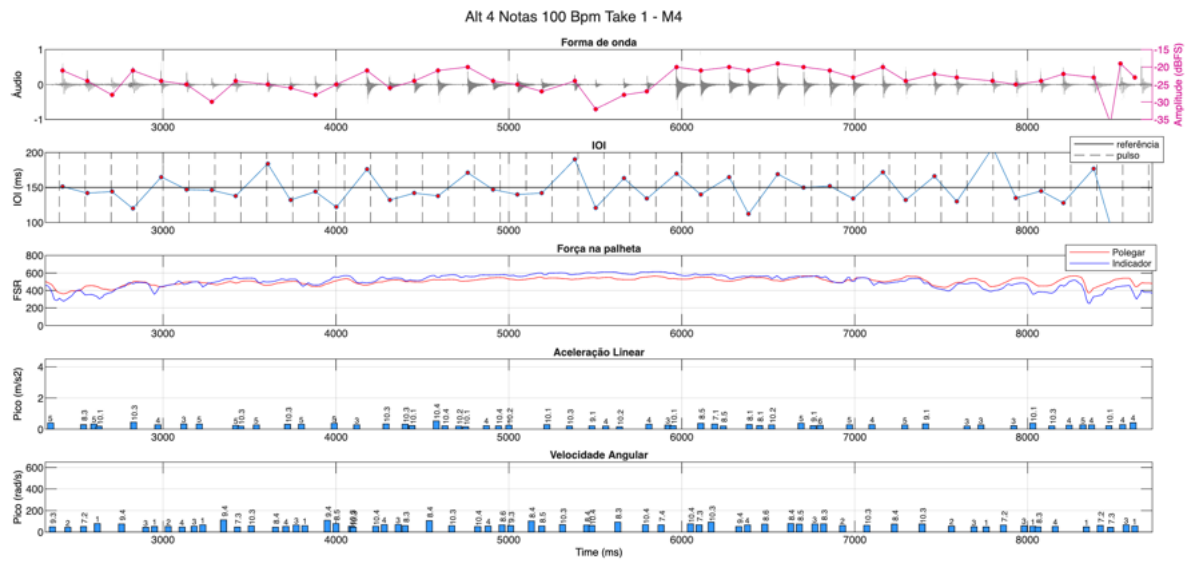


Figura 48: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.

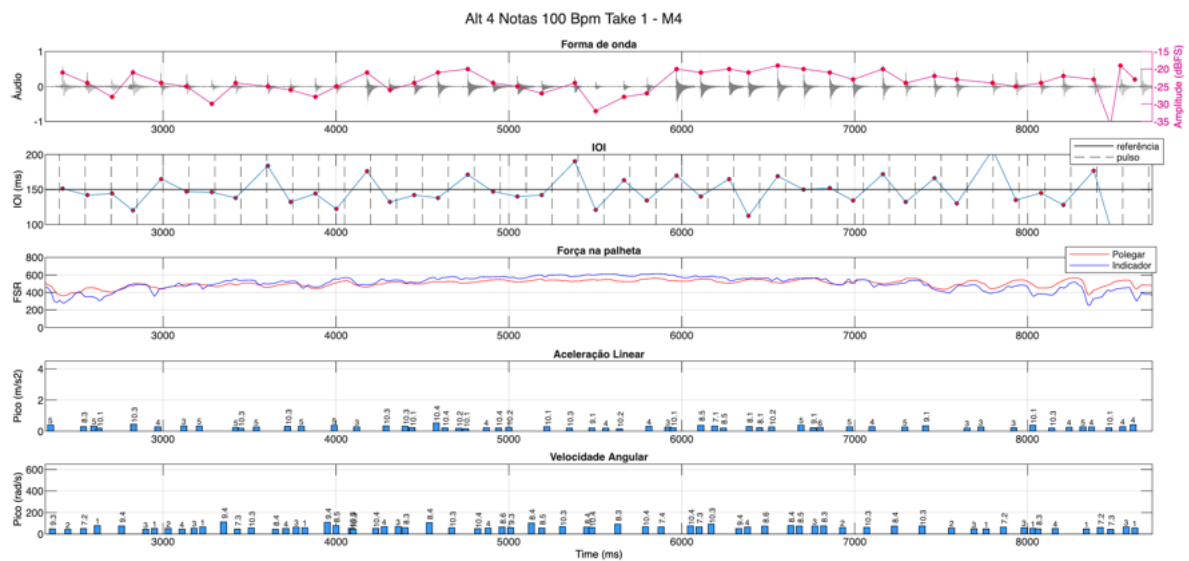


Figura 49: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.

em 60 bpm, e maior variabilidade entre todos no primeiro take em 100 bpm de M5. No geral os músicos ocupam a faixa entre -29 e -21 dBFS.

Em relação aos onsets, a Figura 54 mostra a variabilidade dos valores de IOI e a precisão metronômica, que expressa a distância dos onsets em relação ao pulso<sup>15</sup>.

<sup>15</sup>Valores acima de zero indicam que os onsets ocorreram após o pulso, e valores abaixo de zero indicam antecipação em relação ao pulso.

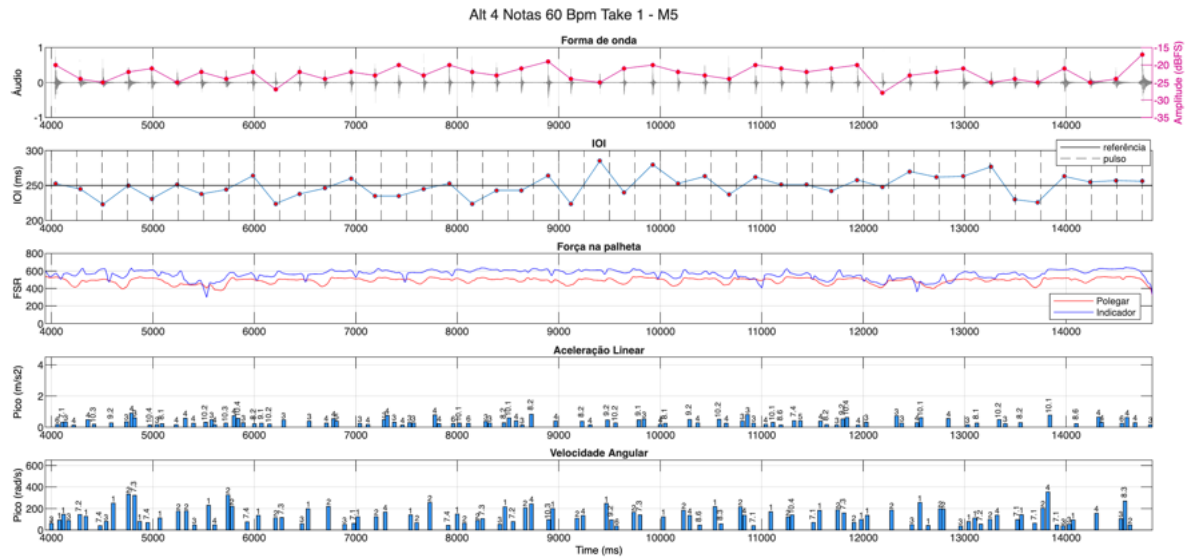


Figura 50: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.

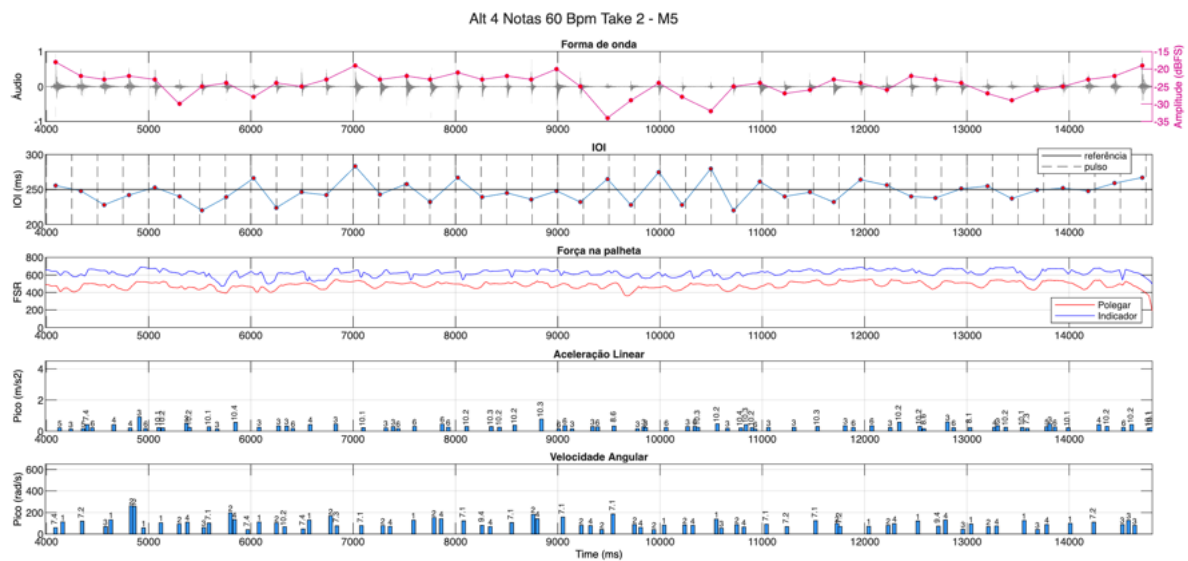


Figura 51: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.

Observa-se que a variação de andamento exerce influência reduzida sobre a variabilidade dos IOIs dos músicos M1 e M2, e nos demais participantes verifica-se que, no andamento de 100 bpm, as caixas apresentam maior amplitude em comparação a 60 bpm, o que sugere maior dispersão dos valores dessa medida. A assimetria da variabilidade, evidenciada pela posição da mediana dentro das caixas, revela tendências específicas na produção temporal — isto é, a propensão a realizar IOIs ligeiramente maiores ou menores que a média

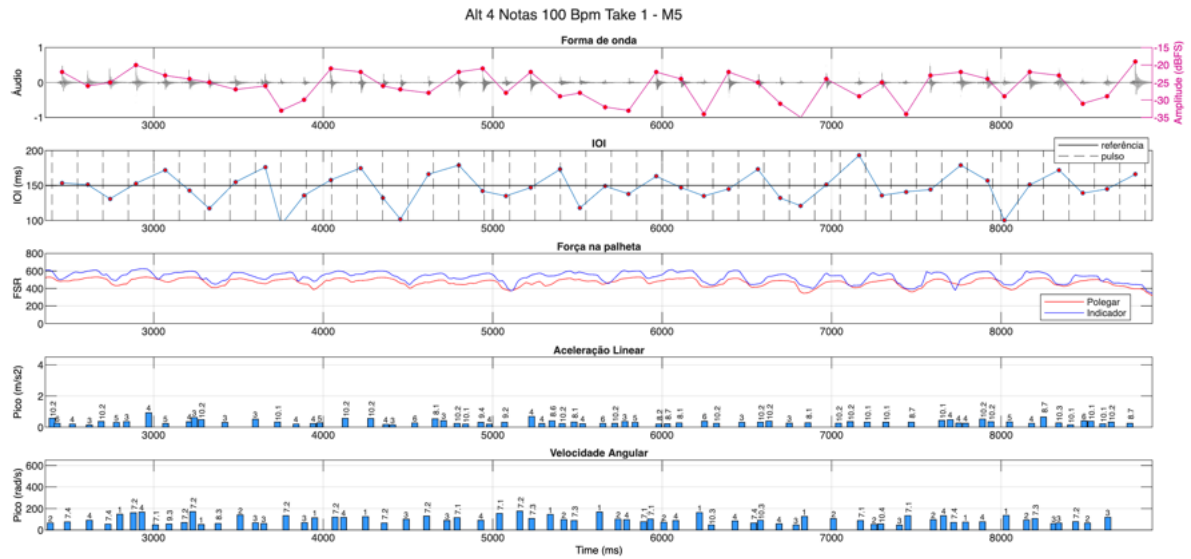


Figura 52: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.

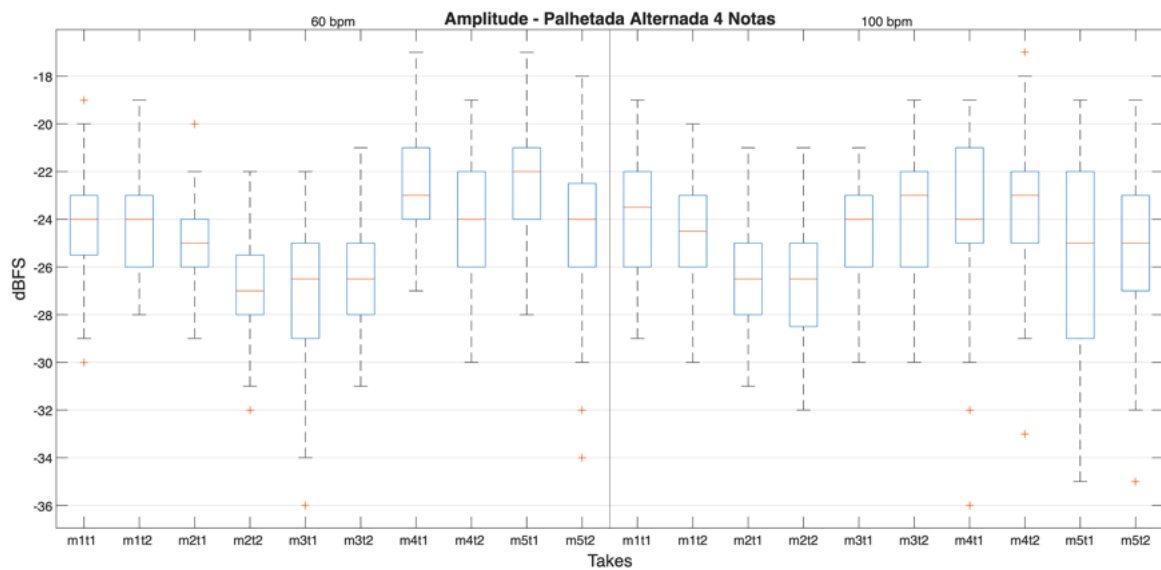


Figura 53: Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda.

geral. Como exemplo, o músico M4, no take 1 de ambos os andamentos, demonstra uma tendência a produzir IOIs superiores à tendência central das observações. Considerando as medidas de precisão metronômica, observa-se pouca influência do andamento sobre a tendência geral, uma vez que os músicos mantêm faixas de variação semelhantes nas duas condições. Isso indica uma consistência individual no comportamento temporal — ou seja, aqueles que tendem a antecipar continuam antecipando, e os que tendem a atrasar mantêm

esse padrão. Destaca-se o caso de M2, que apresenta valores ligeiramente negativos em 60 bpm e positivos em 100 bpm, ambos próximos de zero, sugerindo uma mudança sutil de alinhamento, mas sem alteração significativa na precisão geral.

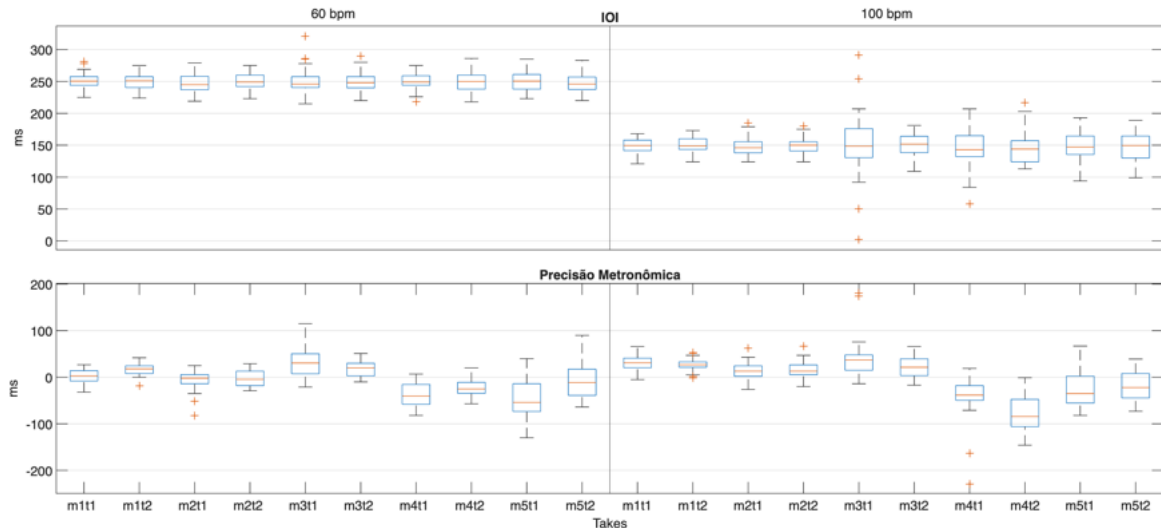


Figura 54: Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda.

A Figura 55 exibe o boxplot dos valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos, onde observa-se que o andamento exerce influência sobre o comportamento geral. Em M1, por exemplo, nota-se um aumento na amplitude das hastes no andamento de 100 bpm, indicando maior variabilidade. Já M4 apresenta o processo inverso, com menor amplitude nesse andamento, embora exiba maior ocorrência de *outliers*, o que sugere a presença de variações pontuais mais acentuadas em sua execução.

Como última análise a Figura 56 apresenta os valores de pico de velocidade angular registrados para todos os participantes. Observa-se que o andamento exerce influência limitada sobre o comportamento da velocidade de rotação da mão, cuja variação se mantém, de modo geral, em uma faixa relativamente estreita, entre aproximadamente  $\pm 50$  e 130 rad/s. Destaca-se, contudo, o primeiro take de M5 a 60 bpm, que exibe uma haste superior alongada, indicando a ocorrência de valores mais elevados nessa condição.

Finalizamos assim as análises dos dados referentes à técnica de palhetada alternada realizada com 4 notas por corda. De modo geral, as observações revelam uma consistência técnica entre os participantes, acompanhada de pequenas variações individuais associadas ao controle rítmico, dinâmica e gestualidade, fato esperado por ser a técnica de menor

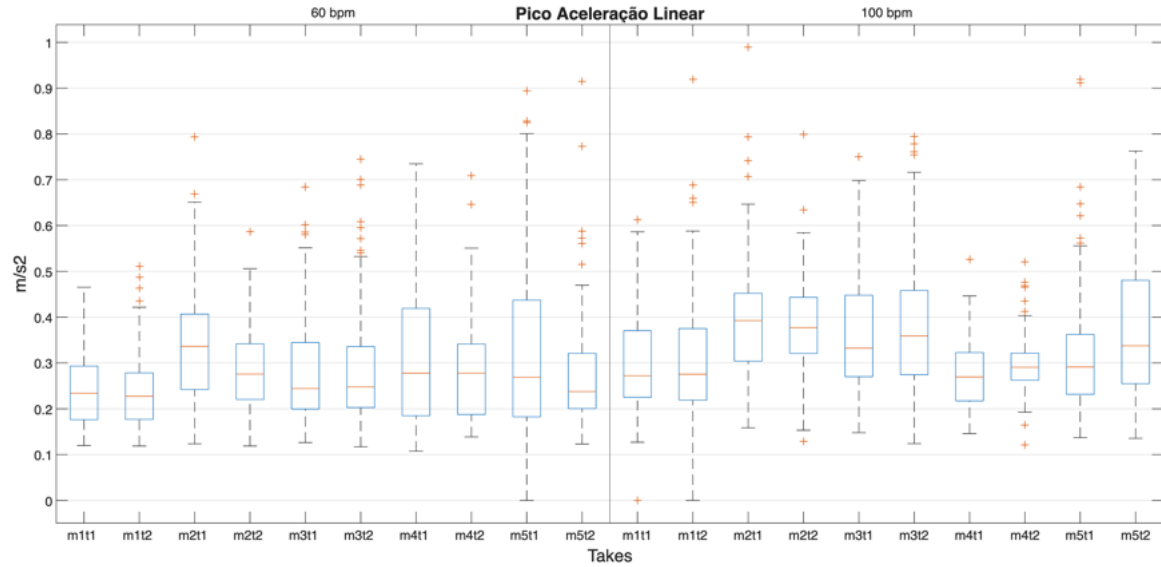


Figura 55: Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda.

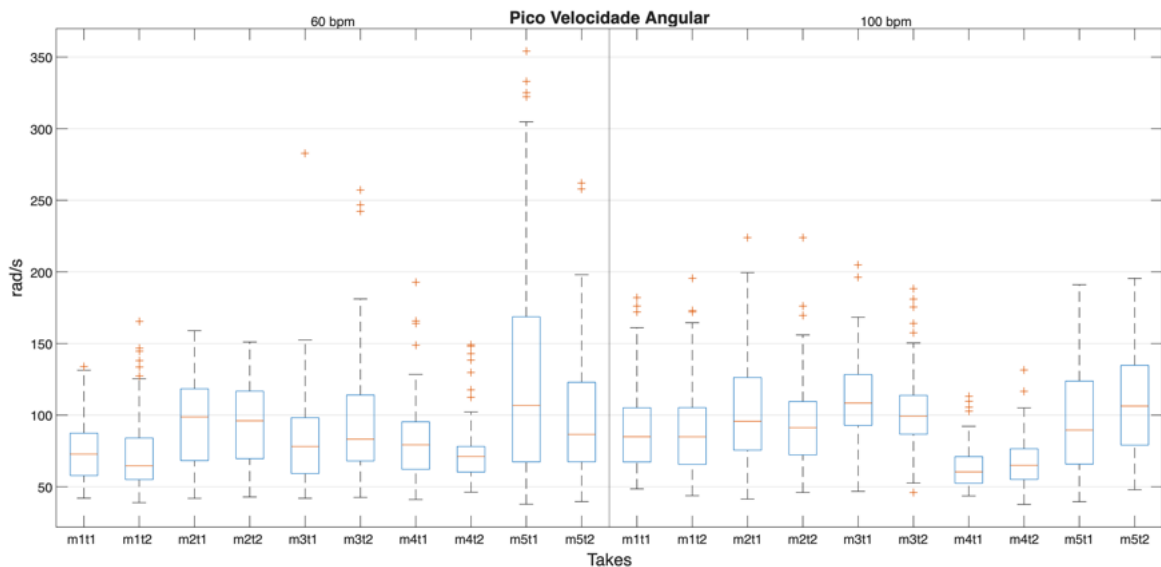


Figura 56: Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 4 notas por corda.

desafio de execução entre todas do experimento.

Dentro de um mesmo músico, nota-se a tendência à manutenção de estratégias gestuais semelhantes entre os dois andamentos, ainda que com pequenas diferenças de regularidade em relação ao pulso. Essas diferenças se manifestam, sobretudo, em alterações na variabilidade dos IOIs e nas direções dos picos de aceleração e velocidade angular.

Entre os participantes, observa-se um padrão de estabilidade geral nas amplitudes, com flutuações mais perceptíveis em andamentos rápidos, que exigem ajustes finos de

controle gestual. Em síntese, os resultados apontam para uma coerência técnica entre os performers, com diferenças pontuais de abordagem gestual e rítmica, que serão exploradas em maior profundidade na seção de discussão.

### 3 notas por corda

A técnica de palhetada alternada com 3 notas por corda, no formato adotado neste estudo, apresenta uma característica particular: a alternância do sentido da primeira palhetada em cada corda — iniciando ora com ataque para baixo, ora para cima — dentro de um mesmo agrupamento de quatro notas (semicolcheias). Essa configuração provoca um deslocamento do pulso para o interior da sequência de ataques, o que acarreta um maior desafio de sincronização entre o gesto da mão e a pulsação métrica, especialmente no andamento mais rápido. Em razão dessa complexidade adicional, os participantes necessitaram de mais tentativas de gravação até obterem um take considerado válido.

A Figura 57 e a Figura 58 mostram um take em cada andamento de M1 na técnica de palhetada alternada realizada com três notas por corda. Destaca-se para esse performer a pouca variação de amplitudes e valores de picos baixos, tanto para aceleração linear quanto para velocidade angular. Devido a complexidade da técnica, há no início do registro em 60 bpm pequenos atrasos dos onsets em relação ao pulso, fato que é bem mais acentuado em 100 bpm – o trecho todo está atrasado em relação ao metrônomo. A força na palheta apresenta comportamento distinto dependendo do sentido das cordas (do grave para agudo e vice-versa).

O músico M2 apresenta as amplitudes dos picos de aceleração e velocidade consistentes entre as duas amostras de cada andamento (Figura 59 e Figura 60), com valores maiores na rotação da mão do que na translação. Os atrasos dos onsets em relação ao pulso permanecem como em M1, principalmente no andamento mais rápido, e observamos dinâmicas baixas pontuais nas amplitudes. Nos ataques descendentes da palheta, observam-se valores menores no sensor associado ao indicador, o que pode indicar a força de reação exercida pela corda em oposição ao movimento da mão.

M3 apresenta diferenças entre os takes no dois andamentos. Em 60 bpm (Figura 61 e Figura 62) as amplitudes percebidas nas cordas graves do take 1 são muito baixas, fato que permanece no take 2, porém com mínimos um pouco maiores. As forças registradas pelo FSR são distintas para as duas gravações, mais baixas e oscilantes na segunda amostra. Os IOIs apresentam atrasos em relação ao pulso no início do trecho

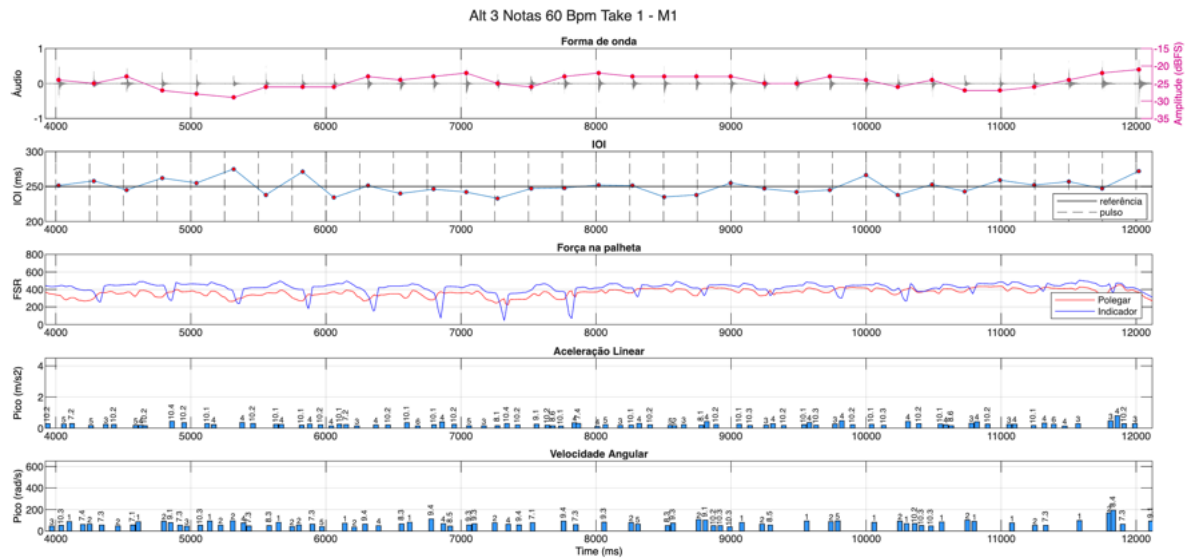


Figura 57: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.

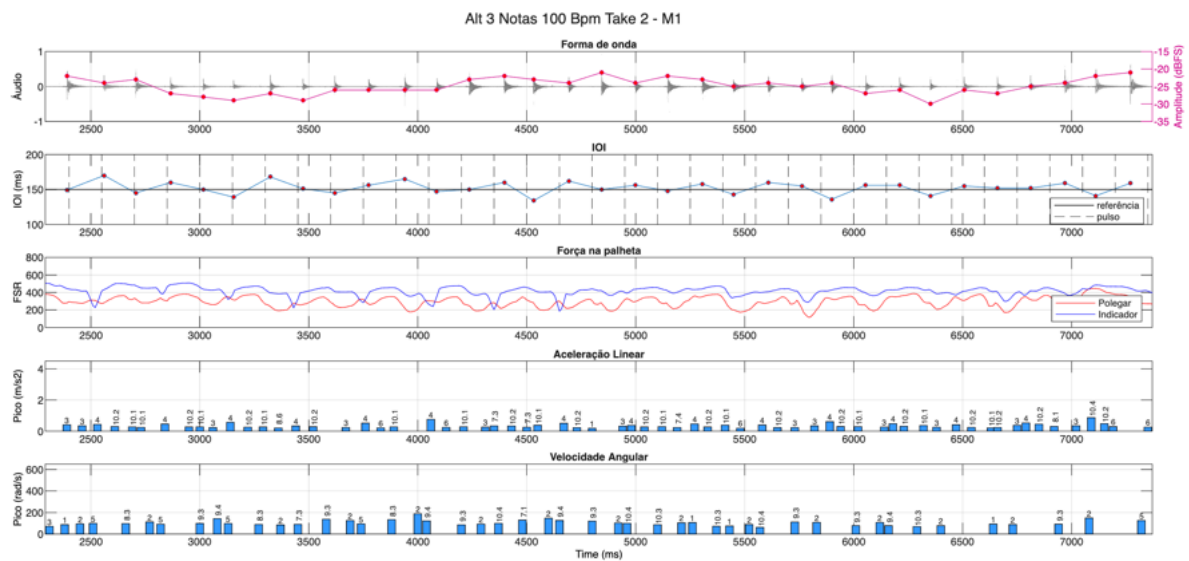


Figura 58: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

(cordas graves para agudas) do take 1, que se aproximam do tempo a partir da metade. Já o take 2 mostra atraso em toda duração. Em relação aos picos de aceleração linear e velocidade angular temos valores altos na última nota no trecho, que não se traduz em maior amplitude.

No andamento de 100 bpm (Figura 63 e Figura 64), observa-se que as amplitudes concentram-se em uma faixa intermediária. Na porção central do take 1 – correspon-

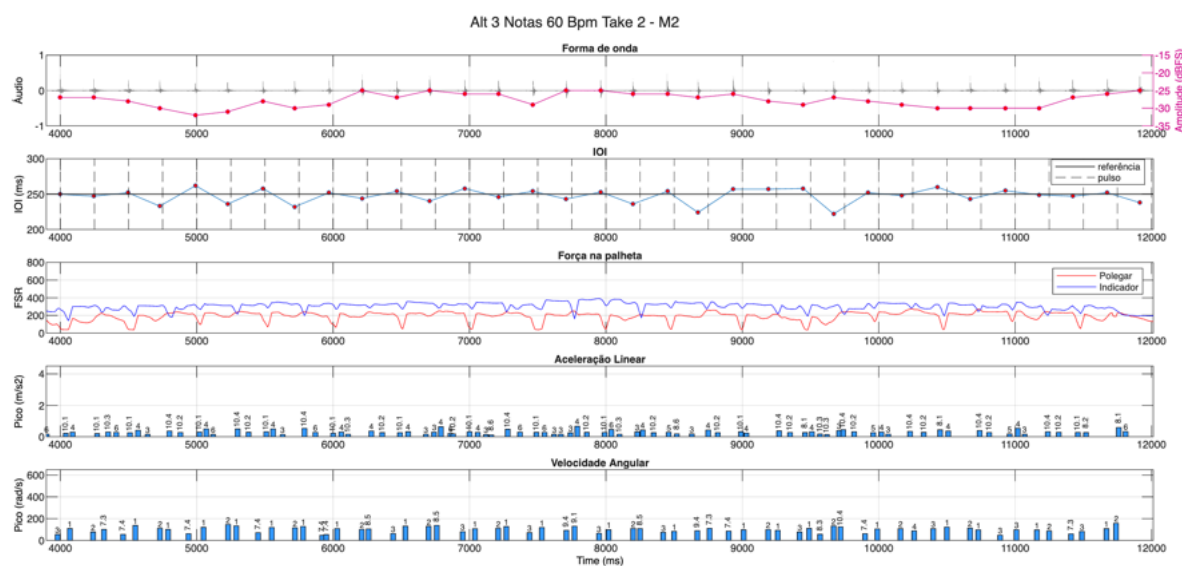


Figura 59: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.

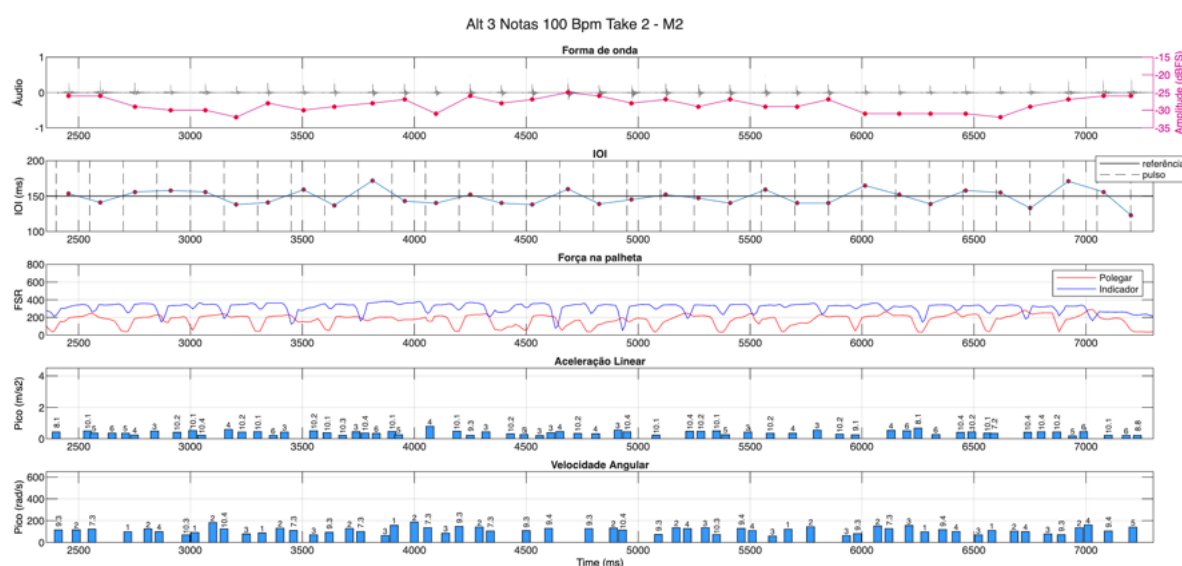


Figura 60: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.

dente às cordas agudas – os valores de IOI apresentam-se significativamente afastados da referência temporal, enquanto as amplitudes dos picos indicam uma predominância de movimentos no eixo  $y$  e na translação. Além disso, verifica-se uma menor frequência de picos em relação aos takes realizados a 60 bpm, sugerindo um gesto mais contido em termos de aceleração.

No primeiro take em 60 bpm do músico M4 (Figura 65, que pode representar os dois

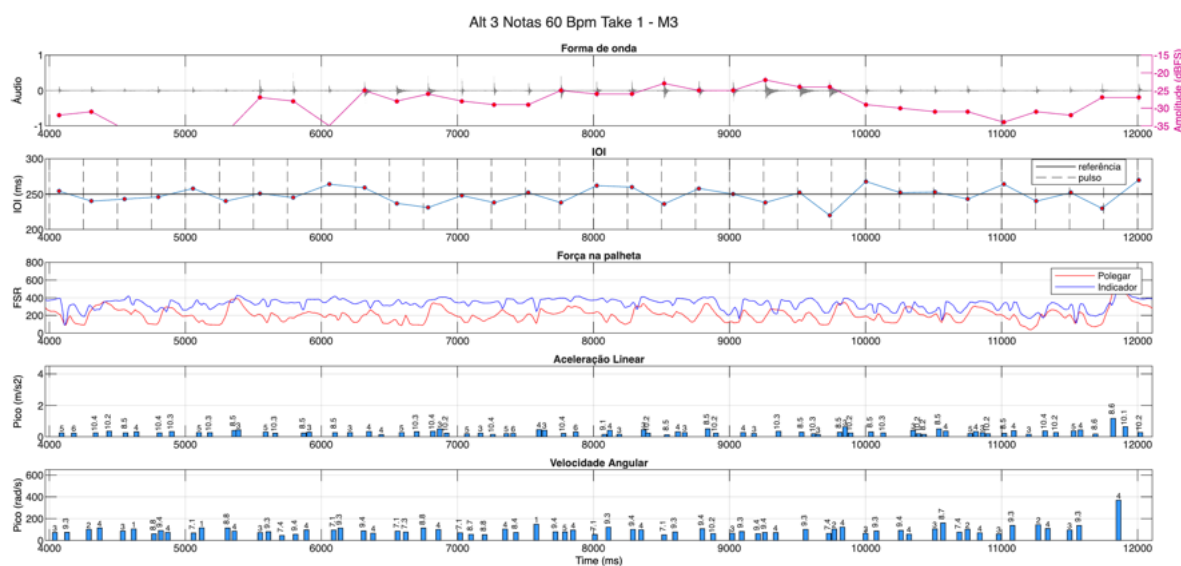


Figura 61: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.

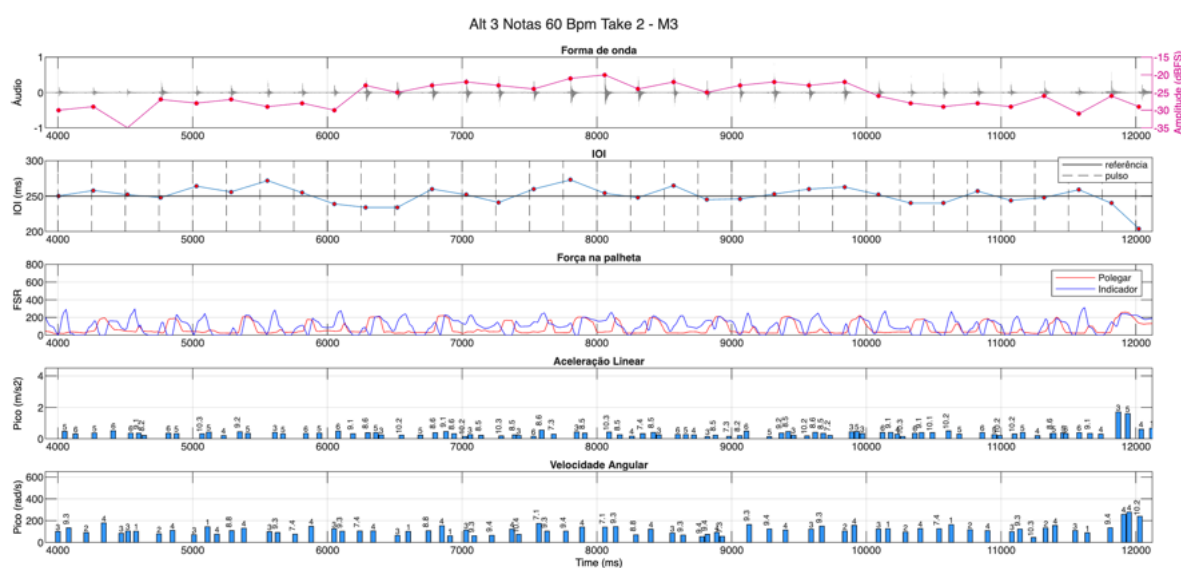


Figura 62: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.

takes), observa-se a ocorrência de notas com amplitudes bastante reduzidas, resultando em um perfil dinâmico irregular ao longo do trecho. Os ataques apresentam uma tendência sistemática de adiantamento em relação ao pulso de referência, com IOIs majoritariamente inferiores ao valor canônico, sugerindo que o músico tende a seguir um tempo interno próprio, em vez de sincronizar estritamente com o metrônomo. Uma consequência direta desse comportamento é que, em determinados momentos, o adiantamento acumulado se

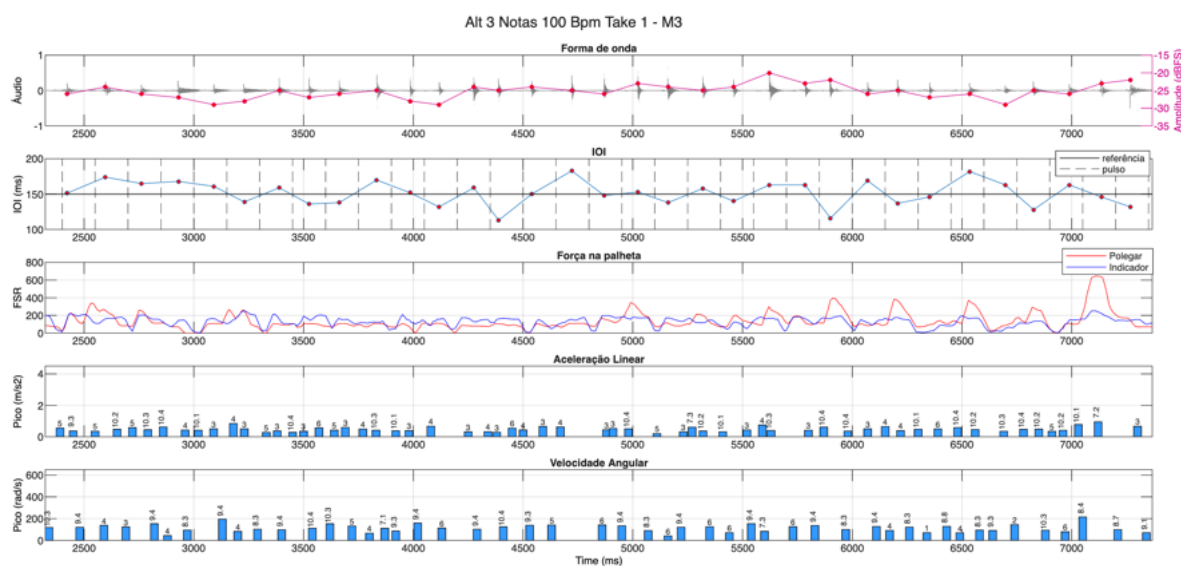


Figura 63: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.

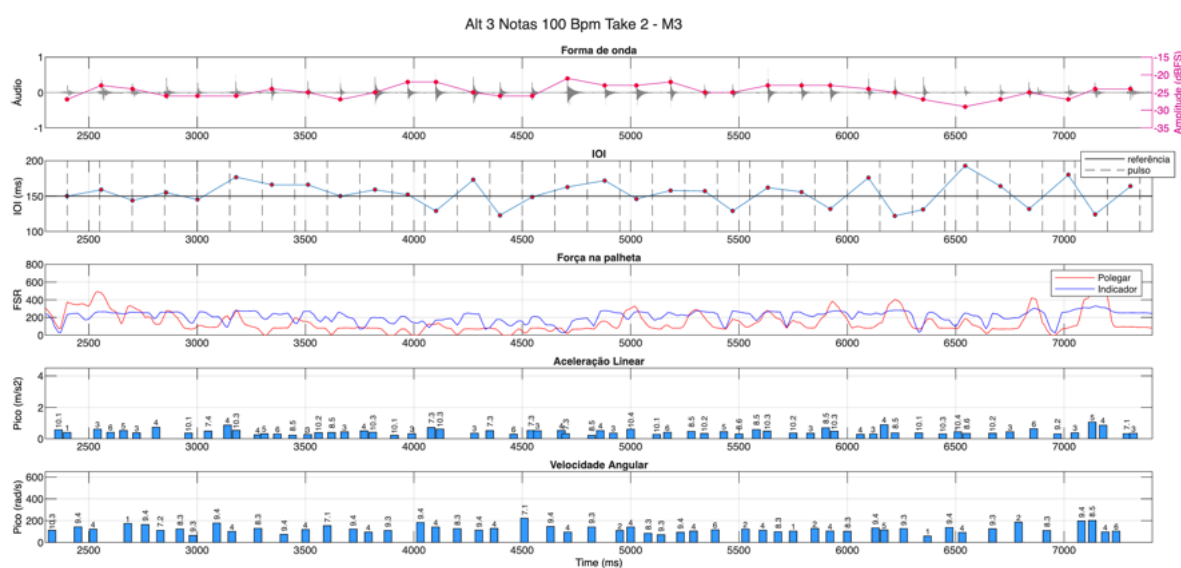


Figura 64: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.

torna tão grande que um onset passa a se aproximar do pulso imediatamente anterior àquele em que deveria ocorrer, rompendo a lógica métrica esperada. Esse descompasso progressivo faz com que o músico conclua o trecho significativamente antes dos demais participantes, nos dois takes. As forças aplicadas na palheta mantêm-se em níveis baixos, e os gestos evidenciam ocorrência de picos nas rotações da mão e movimentos de translação semelhantes, configurando um padrão em que predominam combinações dos eixos x e z

nas medidas de velocidade angular.

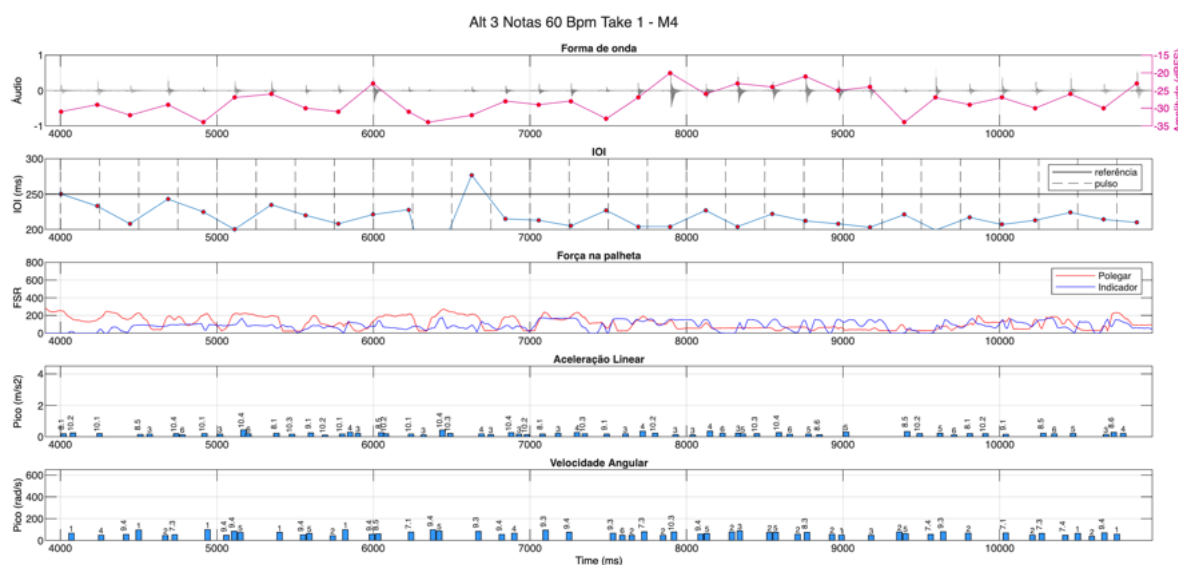


Figura 65: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.

No andamento de 100 bpm, o take 1 (Figura 66) apresenta um perfil dinâmico ainda irregular, com onsets sistematicamente atrasados, embora os IOIs se mantenham em torno do valor de referência, indicando maior precisão metronômica em comparação ao andamento lento. As forças aplicadas à palheta permanecem em níveis reduzidos, e os gestos revelam ligeiro aumento de intensidade nas velocidades angulares, com predominância de direções — e combinações — associadas a x e y negativos e z positivo. No take 2 (Figura 67), o comportamento geral se preserva, contudo observa-se uma inversão nas características rotacionais, com predominância de x e y positivos e z negativo, modificando o padrão direcional das rotações em relação ao take anterior.

Como última análise por take da técnica de palhetada alternada com três notas por corda, a Figura 68 apresenta o primeiro registro do músico M5 executado a 60 bpm. Observa-se um perfil dinâmico irregular, com IOIs oscilando em torno do valor de referência. No que se refere à precisão metronômica, nota-se um início atrasado, seguido por um processo gradual de alinhamento com os pulsos, até alcançar as cordas agudas, momento em que o músico passa a antecipar os ataques até o final do trecho. As forças aplicadas à palheta apresentam valores elevados, com predominância do eixo y nos movimentos de translação e do eixo x nas rotações da mão.

No andamento de 100 bpm (Figura 69), observa-se um conjunto de amplitudes

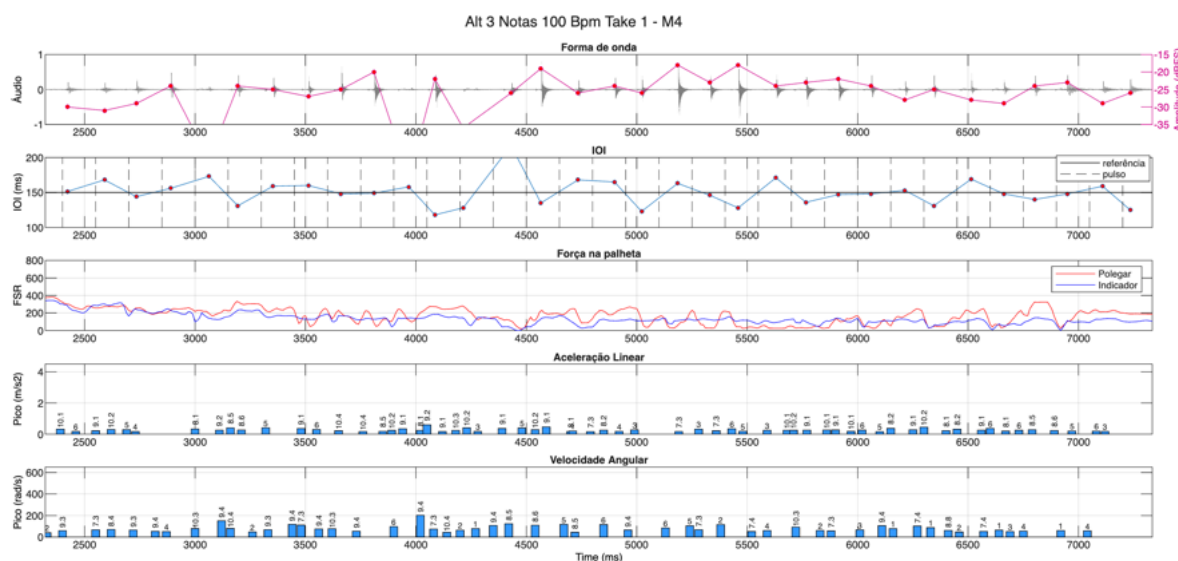


Figura 66: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.

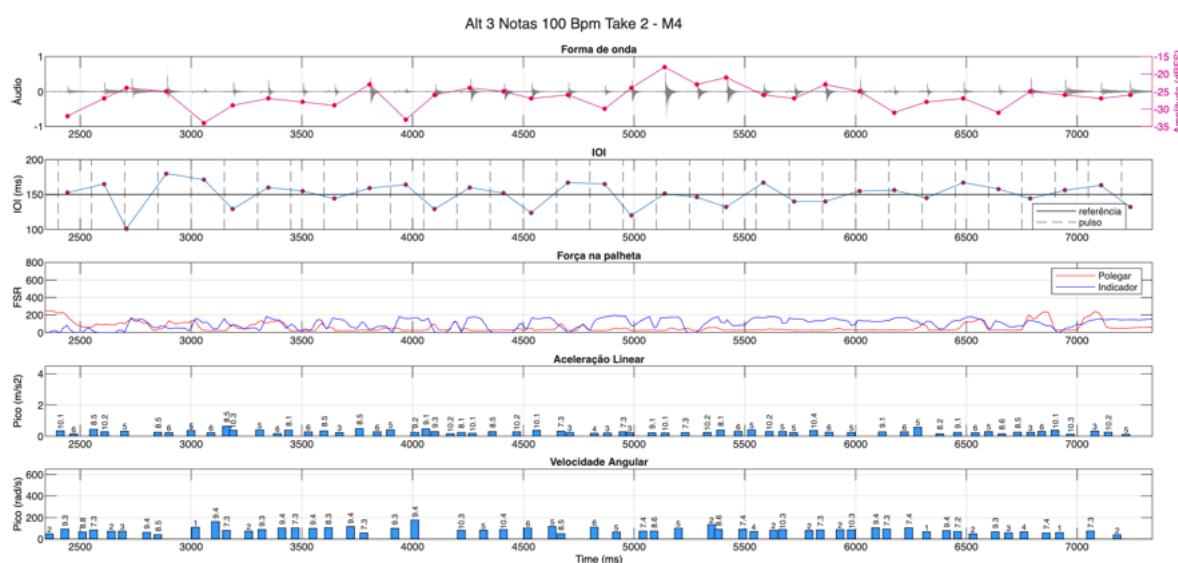


Figura 67: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.

variado e onsets sistematicamente atrasados em relação ao pulso. As forças aplicadas à palheta permanecem elevadas, apresentando leve incremento em comparação ao andamento lento. As amplitudes dos picos preservam a mesma ordem de magnitude observada nos 60 bpm e a aceleração linear continua priorizando o eixo y, enquanto a velocidade angular passa a se distribuir de maneira mais equilibrada entre os três eixos, indicando maior diversidade gestual na rotação da mão.

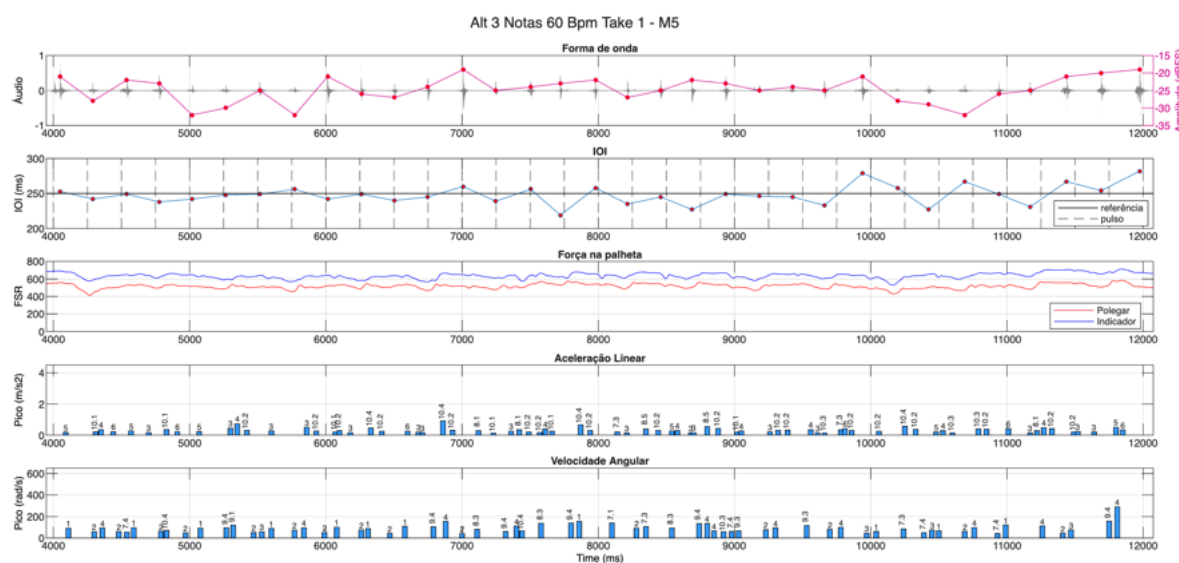


Figura 68: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.

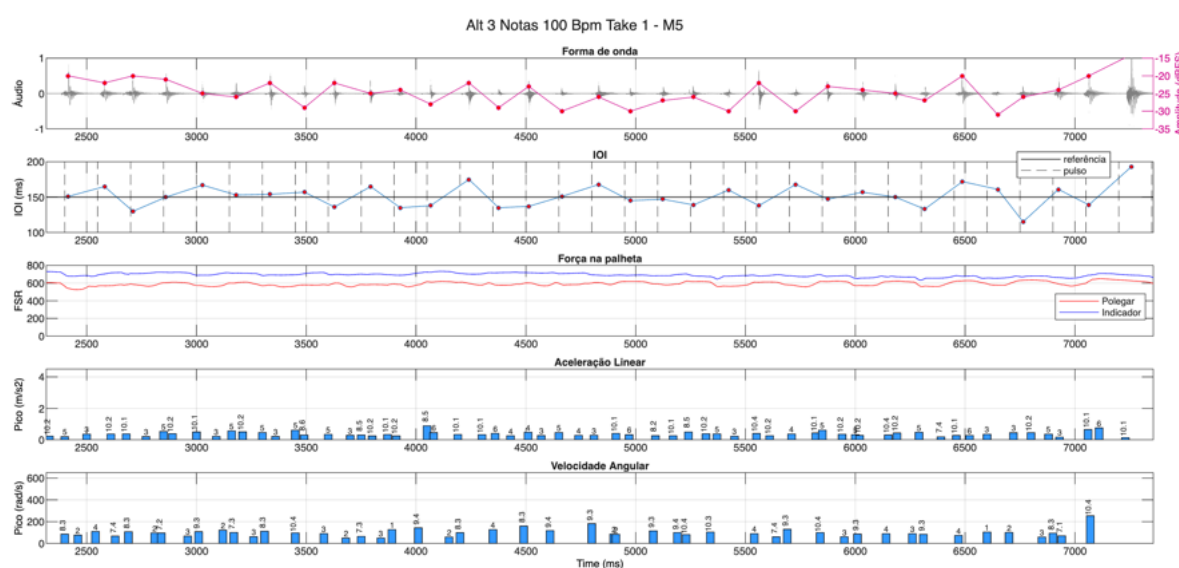


Figura 69: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.

Como etapa final da análise da técnica de palhetada alternada com três notas por corda, examinaremos os gráficos do tipo boxplot, os quais reúnem todos os takes dessa técnica em visualizações integradas dos padrões dinâmicos, temporais e gestuais que emergem em cada registro. A Figura 70 apresenta os valores de amplitude, nos quais se observa uma influência do andamento especialmente nos músicos M3 e M4, que exibem maior intensidade dinâmica na execução a 100 bpm em comparação aos 60 bpm. No

andamento mais lento, verifica-se maior dispersão entre os músicos, com amplitudes mais heterogêneas. Entretanto, no andamento rápido, eles passam a concentrar-se em uma mesma faixa de valores, destacando-se apenas M2, que permanece ligeiramente abaixo dos demais participantes. Destaca-se a redução substancial da variabilidade apresentada por M3 no andamento de 100 bpm em comparação a 60 bpm.

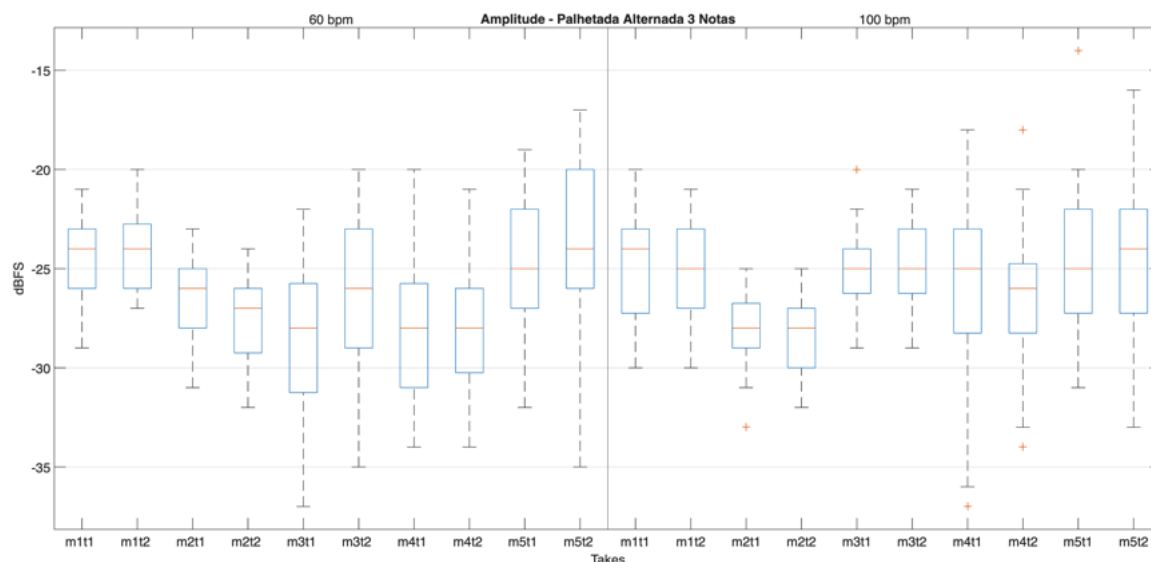


Figura 70: Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda.

Em relação ao comportamento temporal, observa-se na Figura 71 que a variabilidade dos IOIs se mantém praticamente inalterada entre os dois andamentos, apresentando caixas compactas concentradas em torno dos valores de referência para cada velocidade. Nota-se que, em 60 bpm, o músico M4 permanece sistematicamente abaixo da referência, reforçando sua tendência a seguir um pulso interno próprio. A precisão metronômica evidencia forte influência da mudança de andamento no resultado geral: enquanto em 60 bpm cada músico apresenta um padrão próprio de atraso ou adiantamento — com exceção de M4, aqui desconsiderado devido ao acúmulo progressivo de atrasos já discutido na análise de seus takes —, em 100 bpm todos os participantes passam a atrasar seus onsets. Além disso, as diferenças de variabilidade entre o mesmo músico evidenciam o grau de dificuldade envolvido na execução do trecho, especialmente no andamento mais rápido.

A amplitude dos picos de translação (Figura 72) indica que, de modo geral, todos os músicos operam em níveis baixos de aceleração linear, e a mudança de andamento não

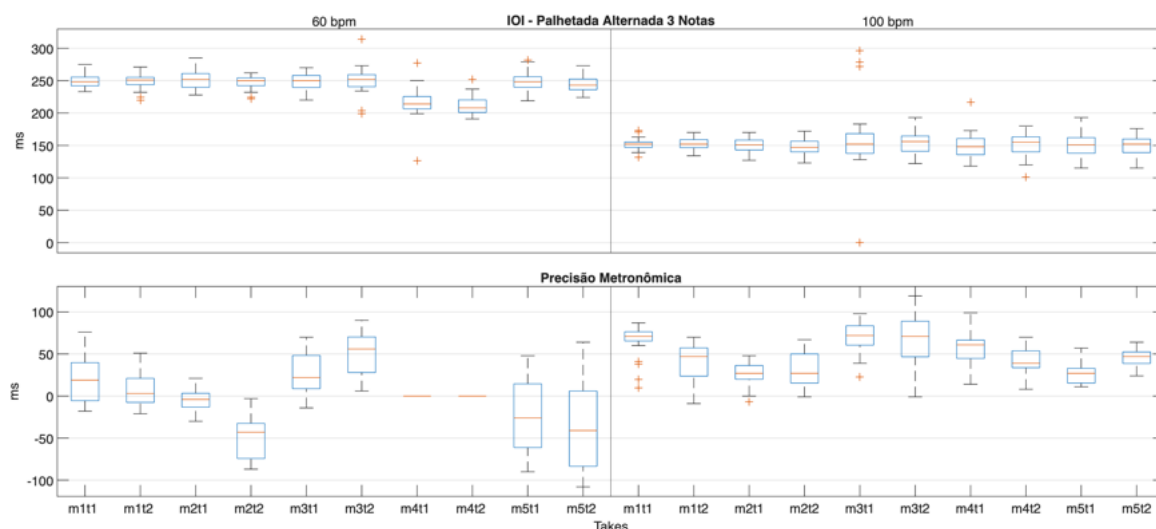


Figura 71: Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda.

produz efeitos expressivos nessa medida, excetuando-se M2 e M3, que apresentam um leve aumento. Observa-se, ainda, a presença de numerosos *outliers* em ambos os andamentos, sugerindo que episódios de aceleração linear atípica ocorrem em todos os participantes. Esses valores excepcionais reforçam a complexidade gestual envolvida na execução da técnica.

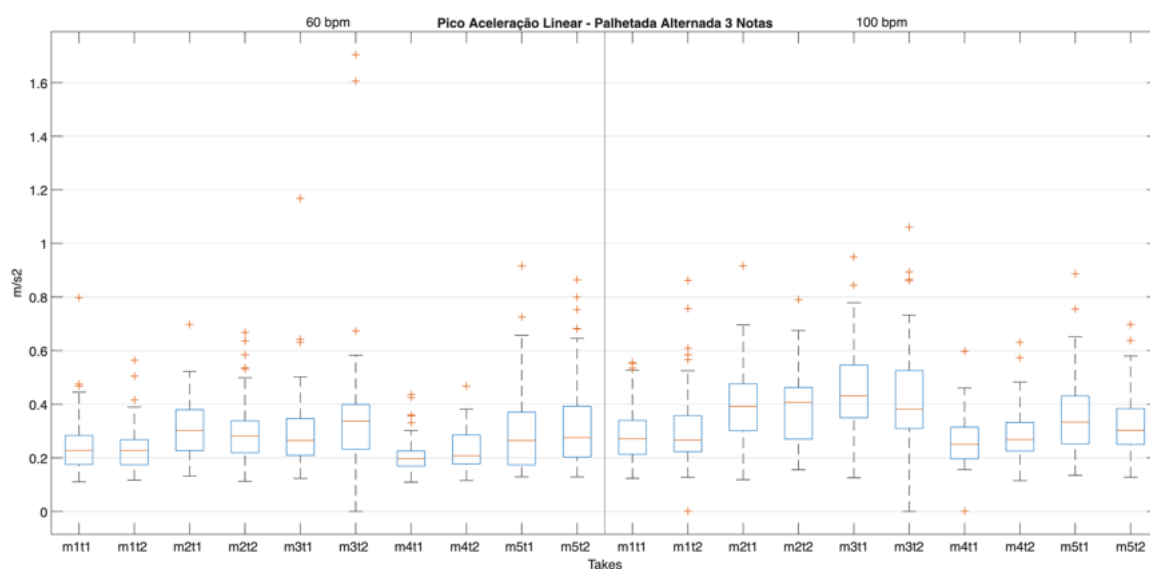


Figura 72: Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda.

Na velocidade angular (Figura 73), observa-se que as intensidades dos picos de

rotação da mão são ligeiramente mais contidas em M1 e M4 no andamento de 60 bpm, aumentando no andamento mais rápido. De modo geral, as variabilidades em 60 bpm são mais dispersas, enquanto em 100 bpm tendem a convergir para faixas mais próximas, acompanhadas de um leve aumento na intensidade dos picos para todos os músicos. Essa aproximação sugere maior uniformidade da rotação da mão no andamento rápido.

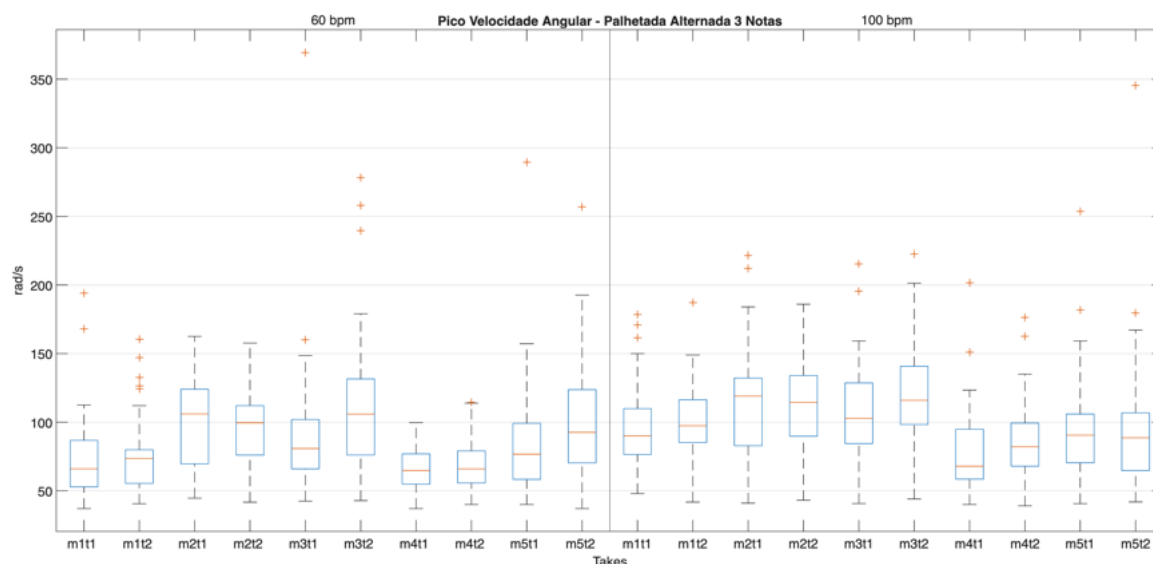


Figura 73: Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 3 notas por corda.

Como conclusão, a técnica de palhetada alternada com três notas por corda revela diferenças claras entre os músicos, tanto nos aspectos dinâmicos quanto temporais e gestuais. O músico M1 apresenta execução estável, com baixa variação de amplitude e gestos pouco intensos, embora com atrasos recorrentes em ambos os andamentos. M2 mantém desempenho consistente, com predominância de rotações da mão e comportamento temporal semelhante ao de M1, ainda que com pequenas oscilações dinâmicas.

O perfil de M3 é o mais variável da amostra, com diferenças evidentes entre takes e andamentos, amplitudes irregulares e padrões temporais oscilantes; seus gestos mostram maior complexidade, com picos pontuais que não se traduzem necessariamente em variações de amplitude. O músico M4 destaca-se por um comportamento temporal bastante idiossincrático, marcado por atraso acumulado e alinhamento irregular com o metrônomo, além de baixa força na palheta e amplitudes reduzidas. Já M5 apresenta dinâmica mais intensa, forças elevadas e um padrão temporal característico, alternando atraso inicial, alinhamento intermediário e antecipações nas cordas agudas.

As visualizações integradas mostram que o andamento influencia de maneira distinta cada músico, mas algumas tendências se repetem: amplitudes mais concentradas em 100 bpm, maior atraso temporal no andamento rápido e picos de translação geralmente baixos, ainda que acompanhados de *outliers* que evidenciam a complexidade gestual da técnica. Em conjunto, esses resultados indicam que, embora compartilhem desafios comuns, os músicos mobilizam estratégias individuais de controle dinâmico, temporal e gestual, que serão aprofundadas na discussão geral.

## 2 notas por corda

O uso de duas notas por corda na técnica de palhetada alternada é uma das abordagens mais difundidas no violão e na guitarra. Essa popularidade está diretamente relacionada ao estudo das escalas pentatônicas, que se estruturam, no instrumento, precisamente nesse padrão de duas notas por corda. Tal configuração facilita a assimilação da digitação pela mão esquerda, sobretudo entre músicos iniciantes, pois permite uma organização predominantemente vertical, sem a necessidade de deslocamentos laterais ao longo do braço do instrumento. Nesse contexto, os participantes deste estudo relataram elevada familiaridade com essa variação da técnica, o que reforça sua presença consolidada na prática pedagógica e performática.

O músico M1 apresenta um desempenho consistentemente regular nos dois takes de 60 bpm e nos dois de 100 bpm. Em ambos os andamentos, a variação dinâmica é reduzida, com notas nas cordas graves ligeiramente menos intensas que as demais. Os IOIs mantêm-se, em geral, próximos da referência temporal, embora ocorram episódios pontuais de valores mais elevados, e atrasados em relação ao pulso. As forças aplicadas à palheta situam-se em uma faixa intermediária de intensidade, com leve predominância do indicador sobre o polegar, além de maior variabilidade no andamento rápido. As intensidades e direções dos picos gestuais permanecem consistentes ao longo dos quatro registros, evidenciando predominância do eixo *y* nos movimentos de translação e do eixo *x* nas rotações da mão. A Figura 74 mostra o primeiro take no andamento de 60 bpm, e a Figura 75 o primeiro take em 100 bpm.

Assim como o músico anterior, M2 apresenta consistência nos quatro takes realizados. A Figura 76 mostra uma amostra em 60 bpm e a Figura 77 uma amostra em 100 bpm. O perfil dinâmico permanece pouco variável, com discreta redução de intensidade

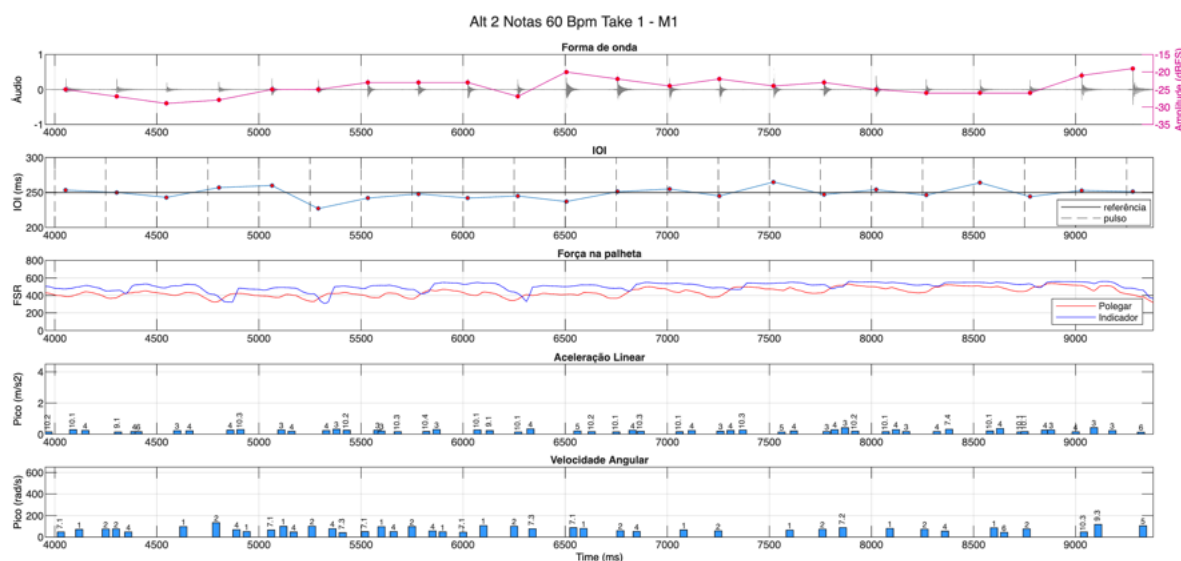


Figura 74: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.

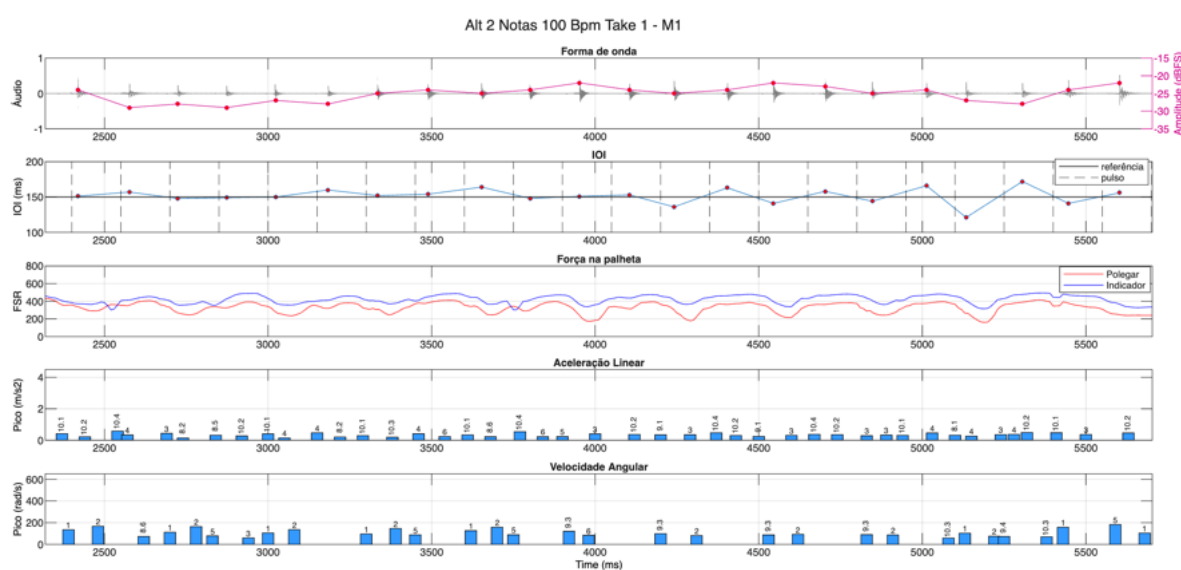


Figura 75: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.

dos ataques nas cordas graves. Os IOIs oscilam em torno da referência nos dois andamentos, porém com diferenças quanto à precisão metronômica: em 60 bpm observa-se uma tendência de adiantamento em relação ao pulso, enquanto em 100 bpm os onsets tornam-se atrasados. As forças aplicadas à palheta permanecem abaixo de 400, exibindo vales mais pronunciados tanto no polegar quanto no indicador. Quanto aos picos de aceleração linear e velocidade angular, estes ocorrem predominantemente em valores baixos,

com maior participação do eixo z na translação da mão, ainda que o eixo y se mantenha como o componente predominante.

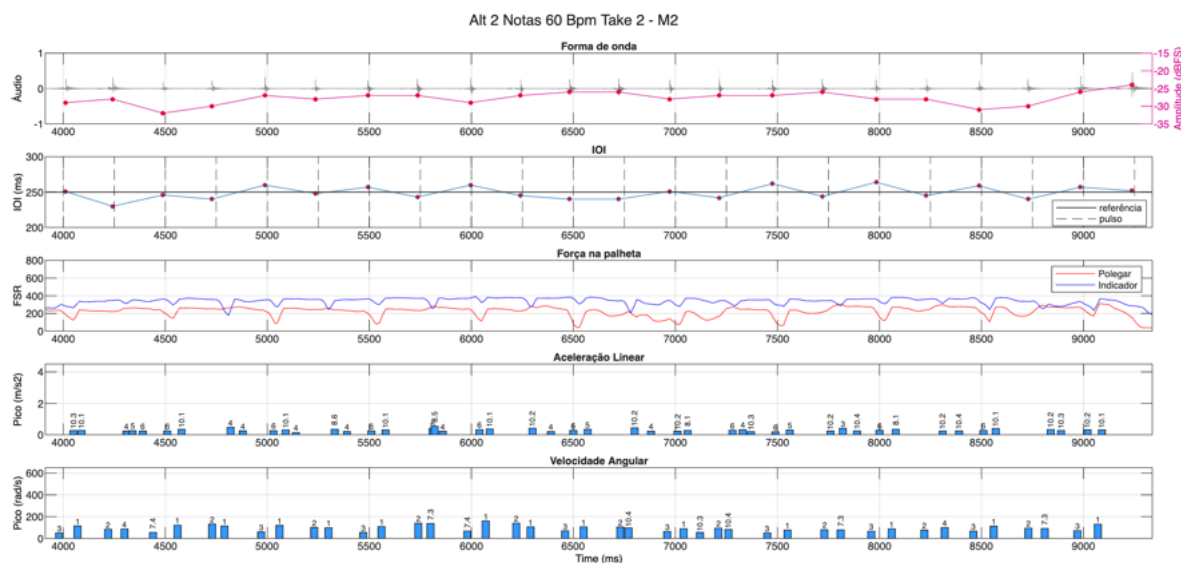


Figura 76: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.

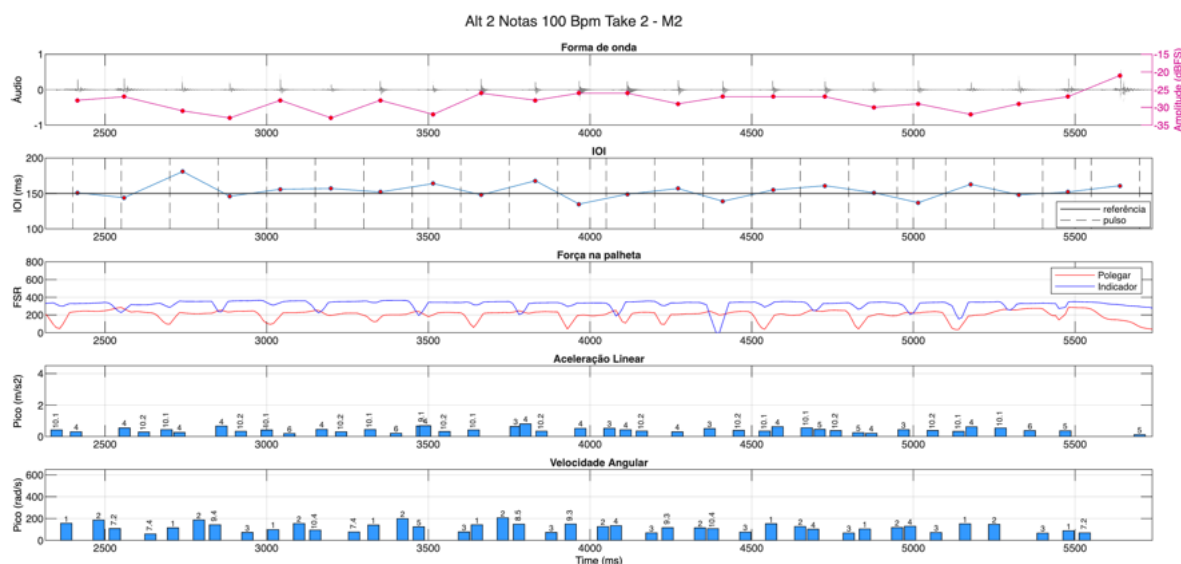


Figura 77: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.

O músico M3 apresenta consistência interna entre os takes de um mesmo andamento, mas adota estratégias gestuais distintas ao comparar as execuções em 60 e 100 bpm. Nos registros mais lentos (Figura 78), os picos de aceleração linear distribuem-se

predominantemente em x e z positivos e y negativo. Em 100 bpm (Figura 78), essa configuração se inverte completamente, passando a apresentar x e z negativos e y positivo. Padrão semelhante ocorre na velocidade angular: no andamento lento, observa-se x e y positivos e z negativo, enquanto no andamento rápido há uma inversão para x e y negativos e z positivo. Apesar dessas mudanças gestuais marcantes, os resultados sonoros e temporais permanecem comparáveis entre os dois andamentos: amplitudes menores nas cordas graves, IOIs em torno da referência e onsets atrasados em relação ao metrônomo. As forças aplicadas à palheta indicam um uso mais contínuo do indicador em relação ao polegar, com valores ligeiramente maiores no andamento de 60 bpm em comparação ao de 100 bpm.

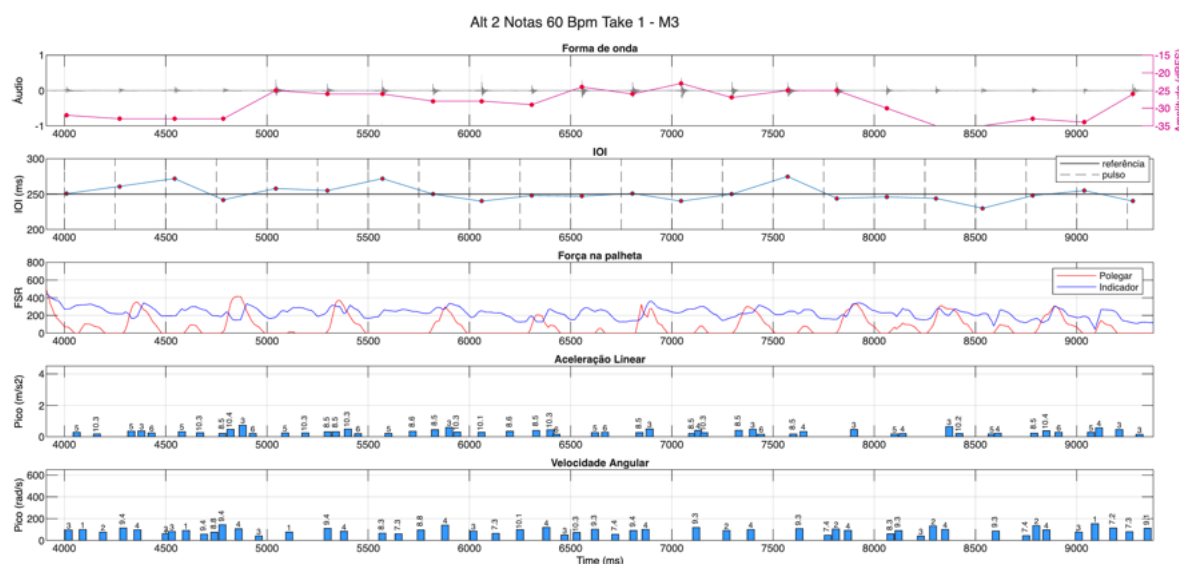


Figura 78: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.

A Figura 80 apresenta um dos takes do músico M4 a 60 bpm. Observa-se um perfil dinâmico semelhante ao dos demais participantes, com amplitudes menores nas cordas graves. Os IOIs exibem um padrão de oscilação constante e os ataques iniciam atrasados em relação ao pulso, gradualmente se alinhando e posteriormente passando a adiantar o metrônomo. A força aplicada à palheta diminui à medida que o músico se desloca para as cordas agudas e permanece mais baixa até o final do trecho. As amplitudes dos picos de aceleração linear e velocidade angular são baixas, com leve predominância do eixo z positivo nas translações e do eixo x positivo nas rotações da mão.

No andamento mais rápido (Figura 81), a maior parte das características observa-

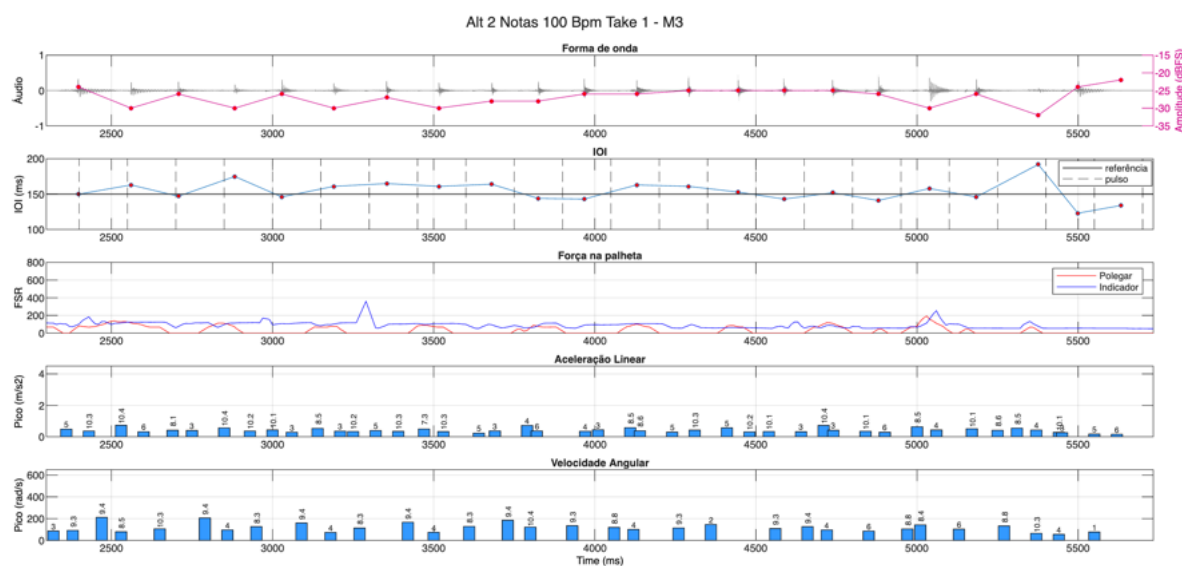


Figura 79: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.

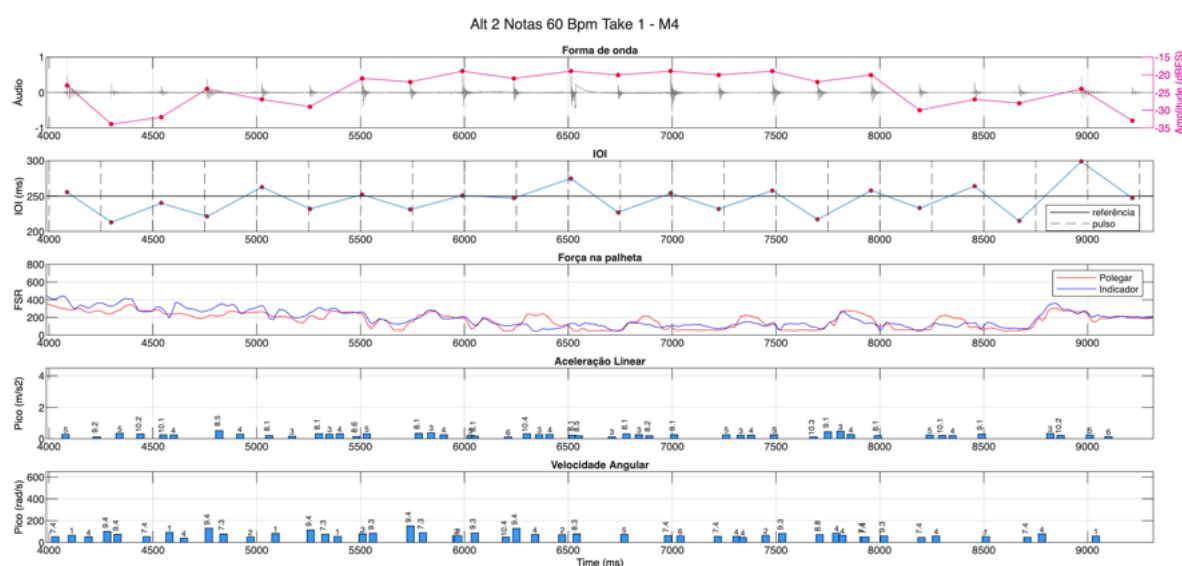


Figura 80: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.

das em 60 bpm se mantém; contudo, destaca-se a ausência de adiantamento dos onsets. Em vez disso, observa-se um sincronismo mais evidente com o metrônomo, especialmente no terço final do trecho, quando os IOIs se aproximam de forma mais consistente da referência temporal. Além disso, ocorre uma inversão nos eixos de rotação da mão, com o eixo x passando a apresentar picos com valores negativos e o eixo z com valores positivos, alterando o padrão gestual registrado no andamento mais lento.

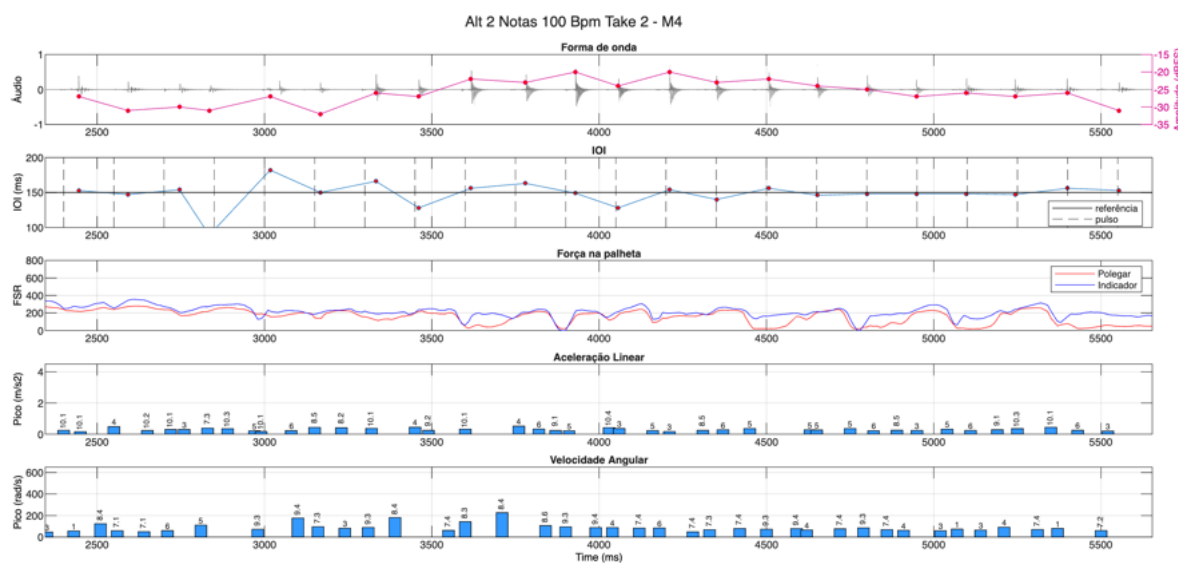


Figura 81: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.

No caso do músico M5, observa-se grande similaridade gestual entre os dois andamentos, caracterizada predominantemente por movimentos de translação no eixo y e rotações no eixo x. Apesar dessa estabilidade gestual, o comportamento temporal difere significativamente: em 60 bpm (Figura 82), os onsets encontram-se sistematicamente adiantados em relação ao pulso, enquanto em 100 bpm (Figura 83) passam a ocorrer atrasados. Os IOIs oscilam em torno da referência temporal, sendo que no primeiro take do andamento rápido permanecem praticamente alinhados à métrica. As forças aplicadas à palheta situam-se em faixas elevadas.

Passamos agora à análise geral dos takes da técnica de palhetada alternada com duas notas por corda. Iniciando pelos parâmetros relacionados aos onsets, a Figura 84 apresenta, na parte superior, os valores de IOI e, na parte inferior, as medidas de precisão metronômica. Conforme indicado nas análises individuais, todos os músicos exibem baixa dispersão dos IOIs, com valores bem alinhados à referência de cada andamento. A variação do andamento exerce influência limitada sobre essa medida, observando-se apenas uma leve compressão das caixas em M4 e M5 no andamento de 100 bpm em comparação a 60 bpm. Por outro lado, a precisão metronômica mostra-se mais sensível a diferenças individuais e entre takes: no andamento mais lento, identificam-se tendências de atraso (M1 e M3) e de adiantamento (M2, M4 e M5), revelando abordagens temporais distintas entre os músicos. No andamento rápido, entretanto, há uma convergência geral para

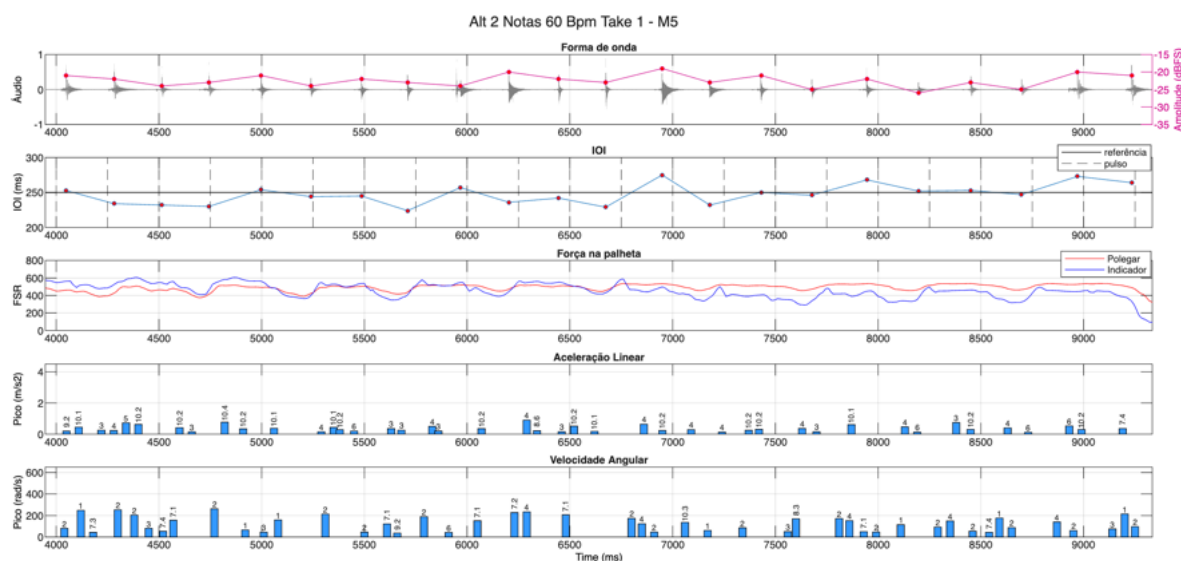


Figura 82: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.

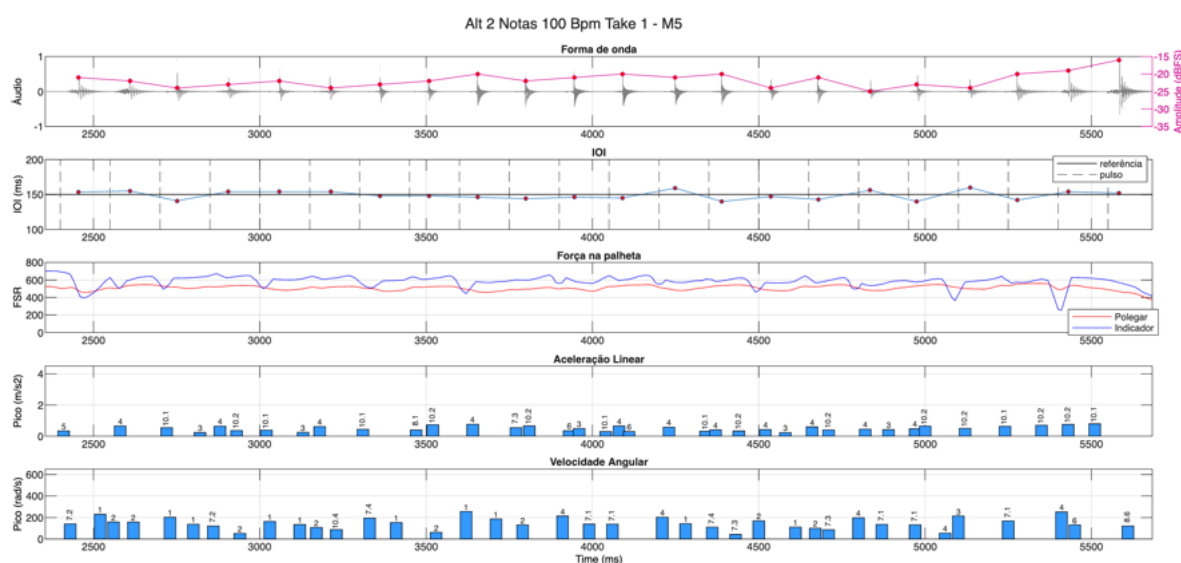


Figura 83: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.

atrasos dos ataques em relação ao pulso, indicando um comportamento temporal mais uniforme diante da maior demanda técnica.

No que se refere às dinâmicas das notas (Figura 85), o andamento mais lento evidencia variabilidades mais amplas do que as observadas no andamento rápido, com destaque para o comportamento mais disperso de M4. A influência do andamento se manifesta de forma individualizada: em comparação a 60 bpm, o andamento mais rápido

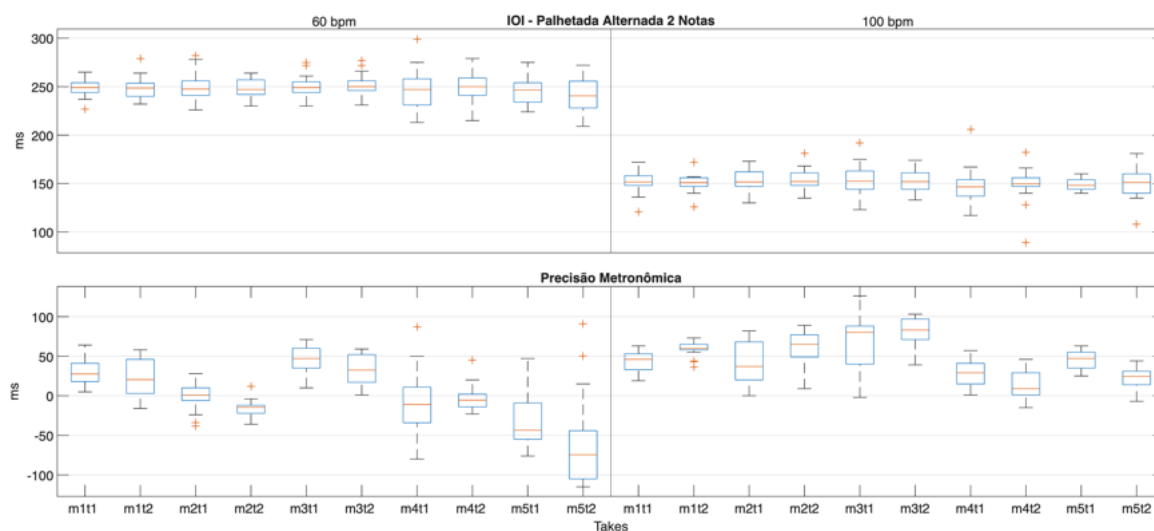


Figura 84: Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda.

produz uma leve redução de amplitude em M1 e uma diminuição mais acentuada em M4, enquanto promove aumento nos valores de M3 e M5. O músico M2, por sua vez, mantém-se na mesma faixa dinâmica em ambos os andamentos.

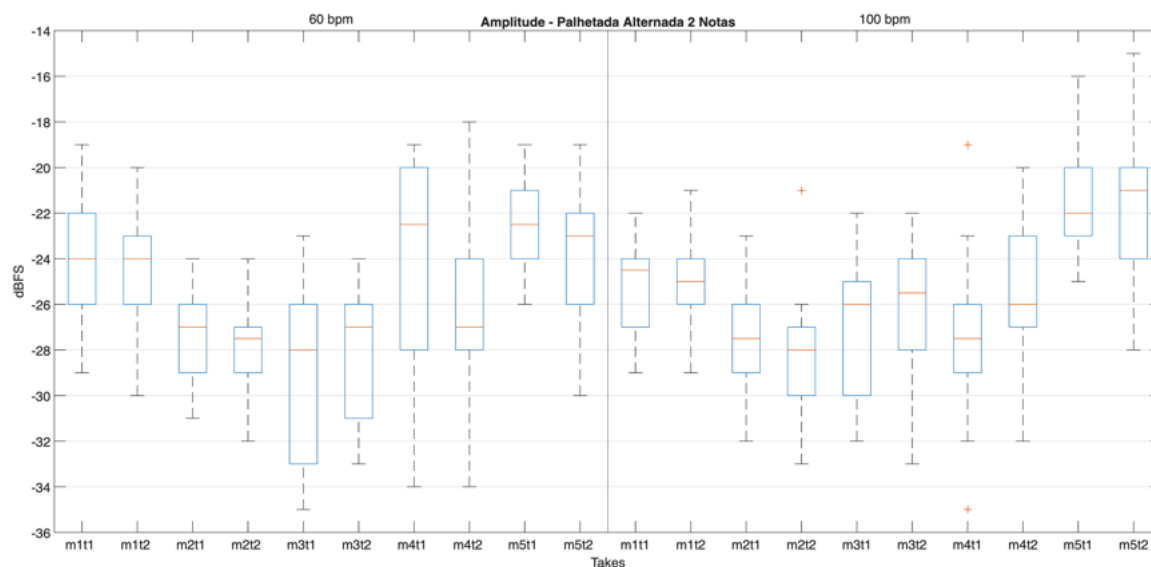


Figura 85: Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda.

Os gestos revelam diferenças marcantes entre os andamentos. Tanto os picos de aceleração linear (Figura 86) quanto os picos de velocidade angular (Figura 87) apresentam aumento de intensidade no andamento mais rápido, um efeito em certa medida esperado

devido à maior exigência técnica. A variabilidade gestual também cresce com a velocidade, embora o músico M5 se destaque por não sentir de forma tão evidente essa mudança, mantendo elevada dispersão nos dois andamentos.

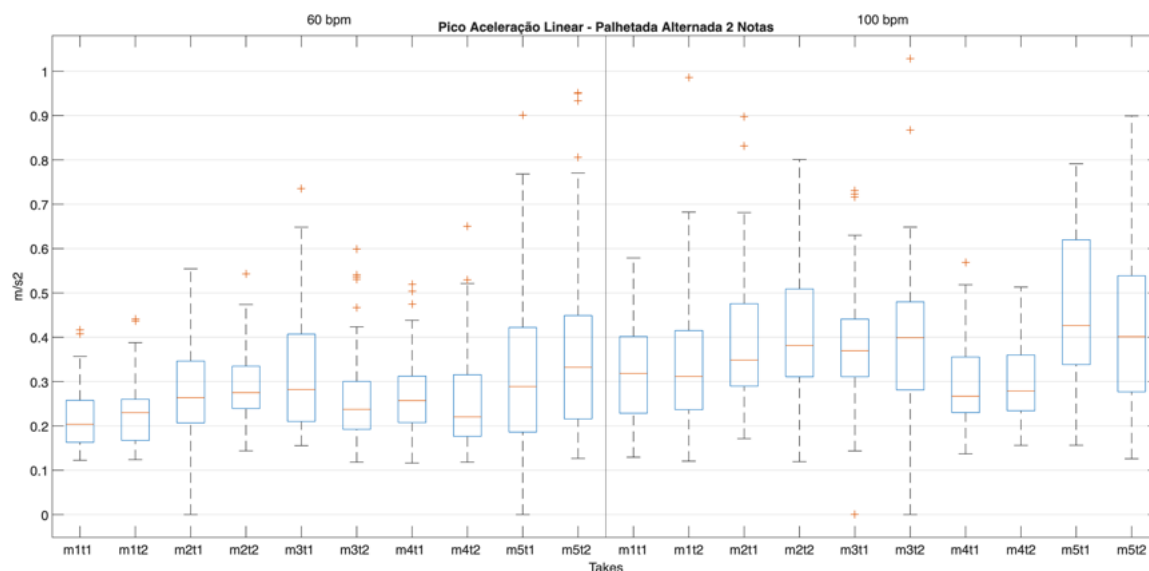


Figura 86: Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda.

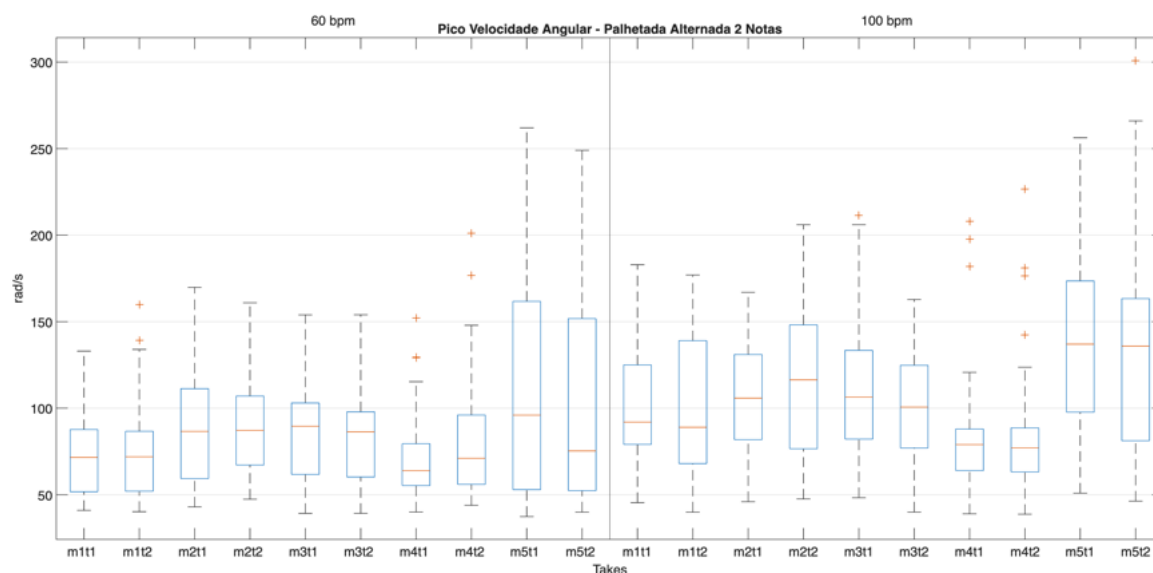


Figura 87: Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 2 notas por corda.

De forma geral, a técnica de palhetada alternada com duas notas por corda revela que, embora cada músico adote estratégias gestuais próprias — envolvendo combinações distintas de eixos de translação e rotação, modos variados de aplicação de força e padrões

temporais particulares — o resultado sonoro tende a convergir entre os participantes. Todos demonstram controle consistente dos IOIs, com baixa dispersão e alinhamento próximo à referência métrica, além de perfis dinâmicos relativamente estáveis.

As diferenças individuais aparecem principalmente nos ajustes gestuais: M1 e M2 mantêm execuções regulares e pouco variáveis; M3 altera de forma mais marcada sua organização motora entre os andamentos; M4 apresenta maior oscilação temporal e ajustes de força mais perceptíveis; e M5 combina estabilidade gestual com mudanças temporais entre andamentos. Apesar disso, as características sonoras fundamentais — regularidade dos ataques, manutenção da métrica e distribuição das amplitudes — permanecem próximas entre todos, especialmente no andamento mais rápido.

Esses resultados reforçam que a familiaridade dos participantes com a técnica de duas notas por corda favorece uma execução com resultado sonoro homogêneo, mesmo quando os caminhos gestuais que sustentam essa execução se mostram diversos.

## 1 nota por corda

A variação da técnica de palhetada alternada com uma nota por corda configura-se como a mais complexa deste estudo por dois motivos principais. Em primeiro lugar, trata-se de uma aplicação pouco usual nas técnicas com palheta: passagens dessa natureza são tradicionalmente executadas por meio do *sweep picking*, e não pela palhetada alternada. Consequentemente, nenhum dos participantes possuía estudo prévio ou experiência performática consolidada com essa abordagem específica. Em segundo lugar, a técnica impõe um desafio gestual significativo, pois exige ajustes rápidos e precisos tanto na troca de cordas quanto na inversão contínua da direção da palheta, o que aumenta substancialmente a complexidade envolvida. Dessa forma, a combinação entre baixa familiaridade técnica e exigência gestual elevada tornou a execução particularmente desafiadora. Cada músico precisou realizar diversos takes, incluindo interrupções pontuais para estudo e familiarização, evidenciando o caráter tecnicamente exigente dessa variação da palhetada alternada.

As amplitudes de M1, tanto em 60 bpm (Figura 88) quanto em 100 bpm (Figura 238), distribuem-se dentro de uma mesma faixa, apresentando baixa dispersão em ambos os andamentos. Os IOIs mantêm-se oscilando em torno da referência temporal, porém com atrasos sistemáticos em relação ao pulso. No andamento mais rápido, esse atraso

se acumula progressivamente, deslocando o onset em aproximadamente uma semicolcheia à frente de sua posição métrica esperada, o que evidencia o alto grau de dificuldade da técnica, especialmente em 100 bpm. As forças aplicadas à palheta situam-se na mesma faixa nos dois andamentos, embora em 60 bpm se observem vales mais acentuados do que em 100 bpm. Do ponto de vista gestual, não se identificam alterações relevantes entre os andamentos: em ambos, os movimentos de translação apresentam intensidade discreta, enquanto as rotações exibem predominância do eixo x.

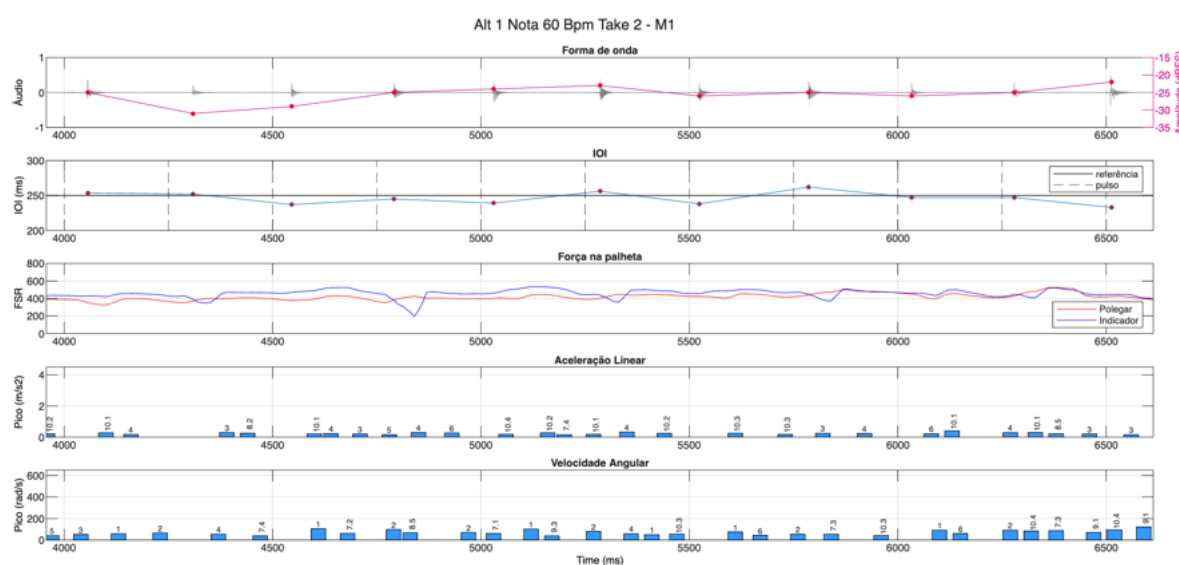


Figura 88: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.

No andamento de 60 bpm, M2 apresenta uma ligeira mudança na estratégia de translação da mão entre os dois takes. No primeiro registro (Figura 90), observa-se predominância do eixo z, seguida pelo eixo y; já no segundo take (Figura 91), essa relação se inverte, com predomínio do eixo y e contribuição secundária de z. Essa alteração gestual parece estar associada a diferenças no comportamento temporal: no take 1, os onsets encontram-se bem alinhados à métrica, com apenas pequenos adiantamentos, enquanto no take 2 essa antecipação se torna mais sistemática. Em ambos os casos, os IOIs oscilam em torno do valor de referência. As forças aplicadas à palheta permanecem estáveis entre os takes, com o dedo indicador apresentando valores superiores aos do polegar.

No andamento mais rápido, representado pela Figura 92, não se observam diferenças gestuais relevantes entre os takes, tampouco variações significativas nas forças aplicadas à palheta ou nas amplitudes das notas. O principal aspecto distintivo diz res-

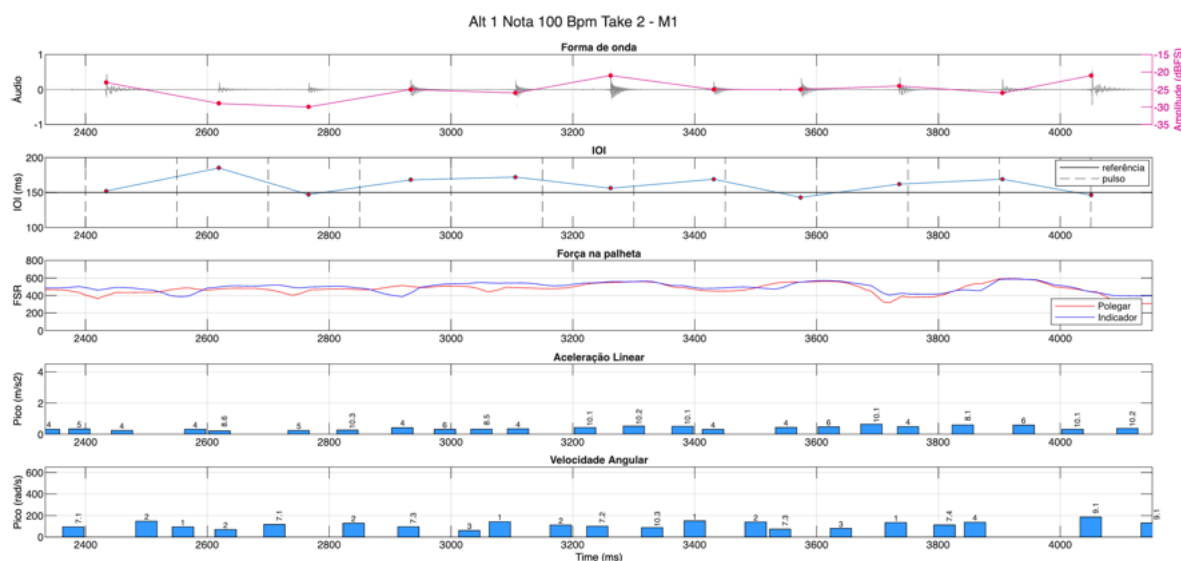


Figura 89: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

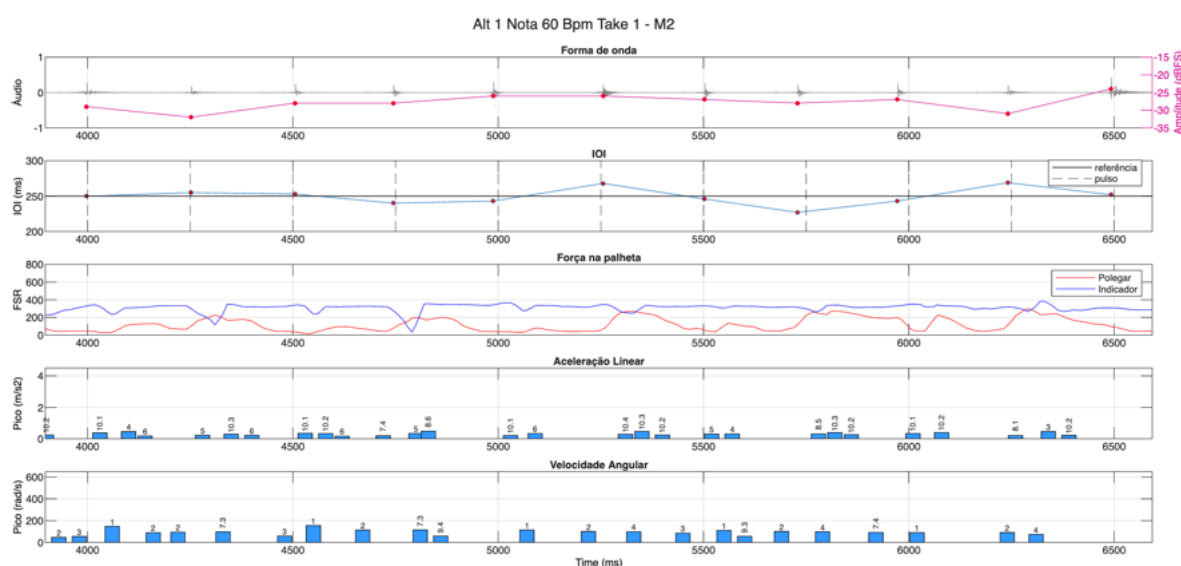


Figura 90: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.

peito ao comportamento temporal: nas execuções a 100 bpm, os onsets tendem a ocorrer atrasados em relação ao pulso. Ainda assim, os IOIs permanecem distribuídos em torno do valor canônico, mantendo estabilidade interna apesar do atraso sistemático dos ataques.

A Figura 93 representa os takes de M3 no andamento de 60 bpm. Observa-se a ocorrência de amplitudes menores nas cordas graves e onsets sistematicamente atrasados em relação ao pulso. Quando relacionados à variação dos IOIs, que se mantém muito

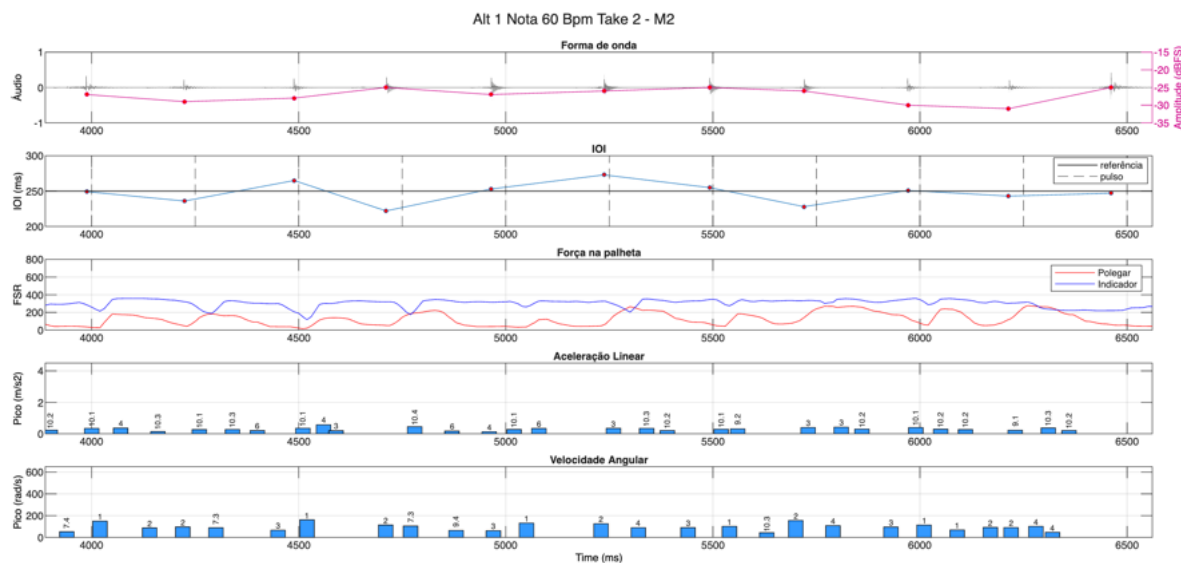


Figura 91: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.

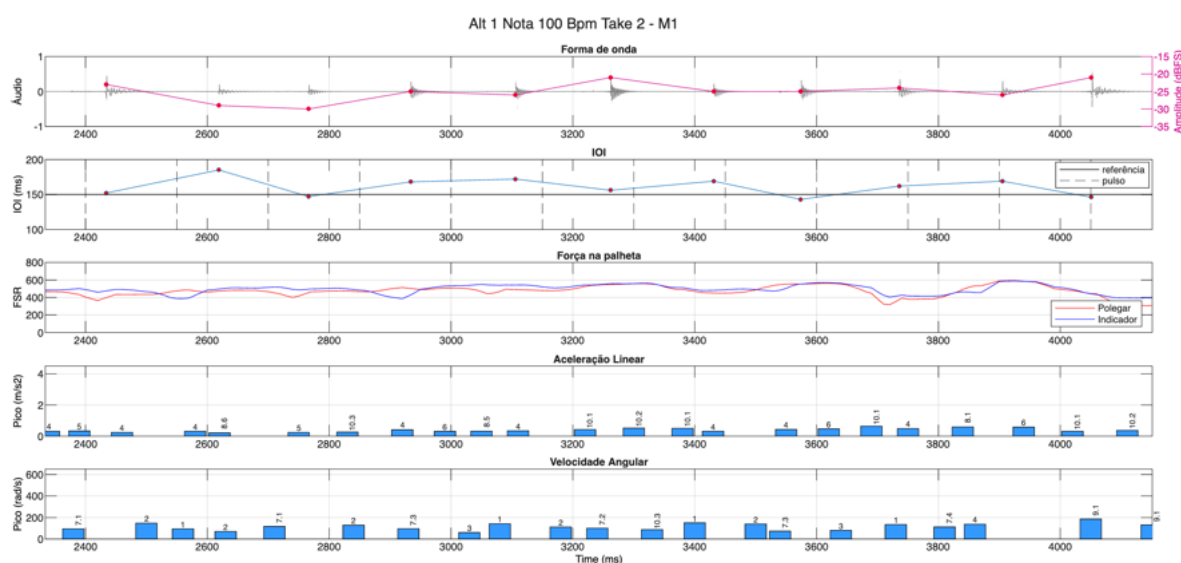


Figura 92: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.

próxima ao valor de referência, esses atrasos sugerem uma precisão temporal interna elevada, ainda que não perfeitamente sincronizada ao metrônomo. As forças aplicadas à palheta apresentam maior oscilação no polegar do que no indicador, e os picos de aceleração linear e velocidade angular ocorrem com intensidades reduzidas. Destaca-se o maior uso do eixo z na translação da mão.

No andamento de 100 bpm (Figura 94), este músico apresenta oscilações mais

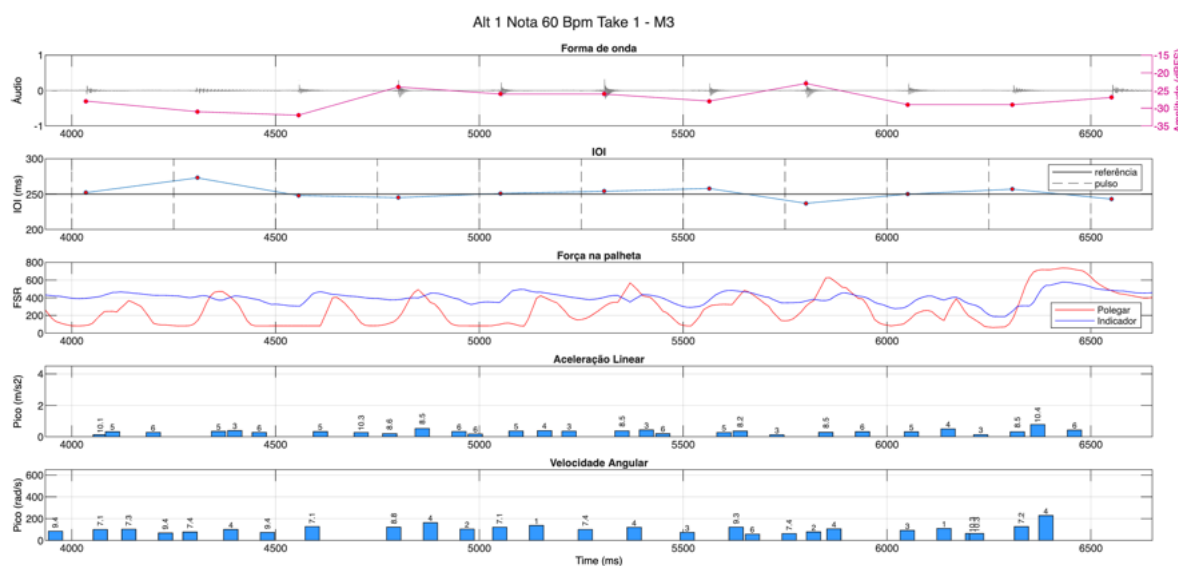


Figura 93: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.

pronunciadas nas amplitudes das notas e, além do atraso sistemático em relação ao metrônomo, evidencia um vai-e-vem mais acentuado nos IOIs, indicando maior instabilidade temporal. A força aplicada no polegar torna-se mais constante, enquanto a oscilação passa a se concentrar no indicador. Observa-se, ainda, um aumento expressivo nas intensidades dos picos de translação e rotação da mão, acompanhado de uma mudança na estratégia gestual: as acelerações lineares passam a apresentar predominância compartilhada entre os eixos z e y, em contraste com o comportamento mais uniforme observado no andamento lento.

A Figura 95 apresenta o primeiro take de M4 no andamento de 60 bpm, enquanto a Figura 96 mostra o segundo. Ambos os registros compartilham um conjunto consistente de características: o perfil dinâmico concentra-se em uma mesma faixa de amplitude, com variações discretas; as forças aplicadas à palheta apresentam comportamentos semelhantes entre os dedos; e os gestos de translação e rotação surgem com intensidades comparáveis, mantendo os mesmos eixos predominantes — y e z para as acelerações lineares e x para as velocidades angulares. As diferenças mais relevantes entre os takes estão nos onsets: no take 1, os ataques ocorrem atrasados em relação ao pulso, enquanto no take 2 aparecem adiantados. Os IOIs, por sua vez, exibem dispersões pontuais acentuadas em relação à referência temporal.

No andamento de 100 bpm (Figura 97 e Figura 98), as irregularidades tornam-

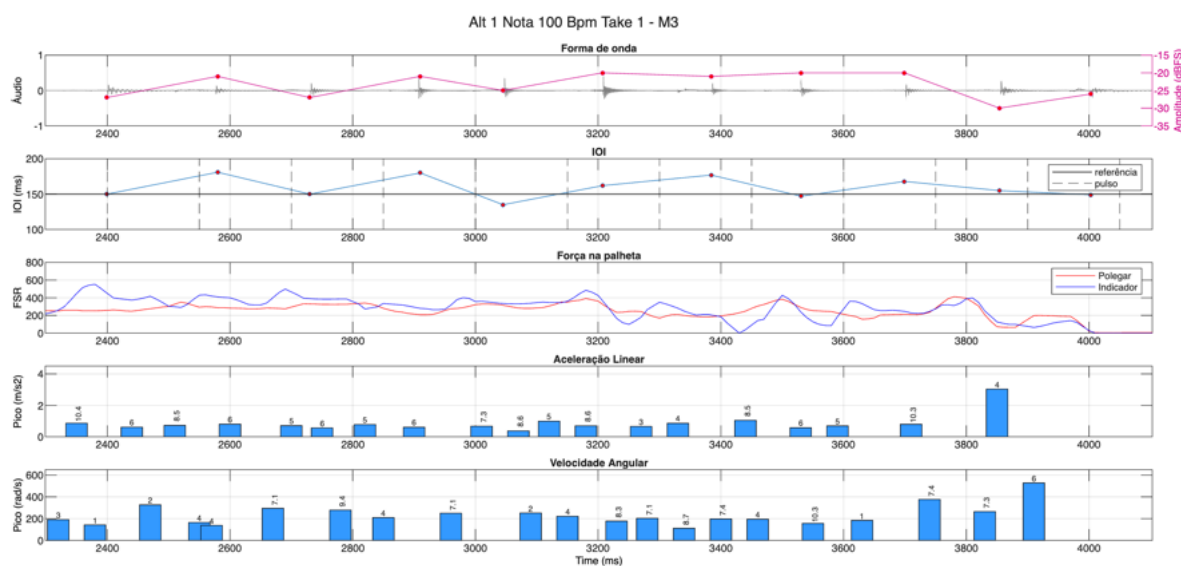


Figura 94: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.

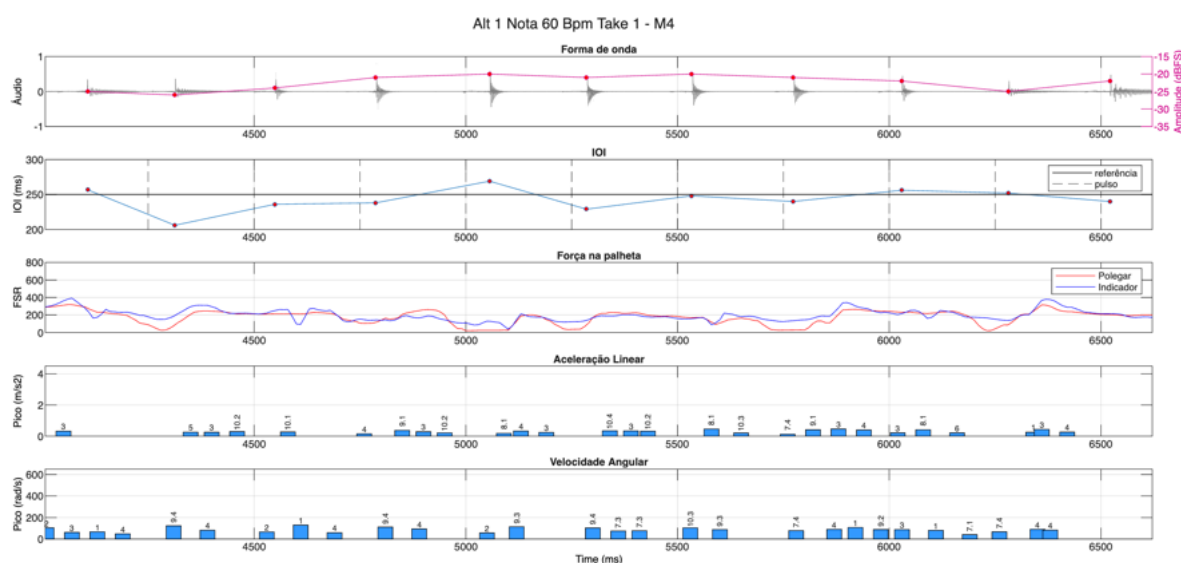


Figura 95: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.

se mais evidentes, tanto no comportamento dinâmico quanto nos parâmetros temporais. Em ambos os takes, as amplitudes apresentam valores mínimos e máximos amplamente distantes, indicando maior instabilidade na produção sonora. Os IOIs também revelam desvios expressivos em relação à referência temporal, refletindo dificuldades na manutenção de regularidade rítmica sob maior velocidade. Os ataques, por sua vez, ocorrem sistematicamente atrasados em relação ao pulso metronômico. Quanto às forças aplica-

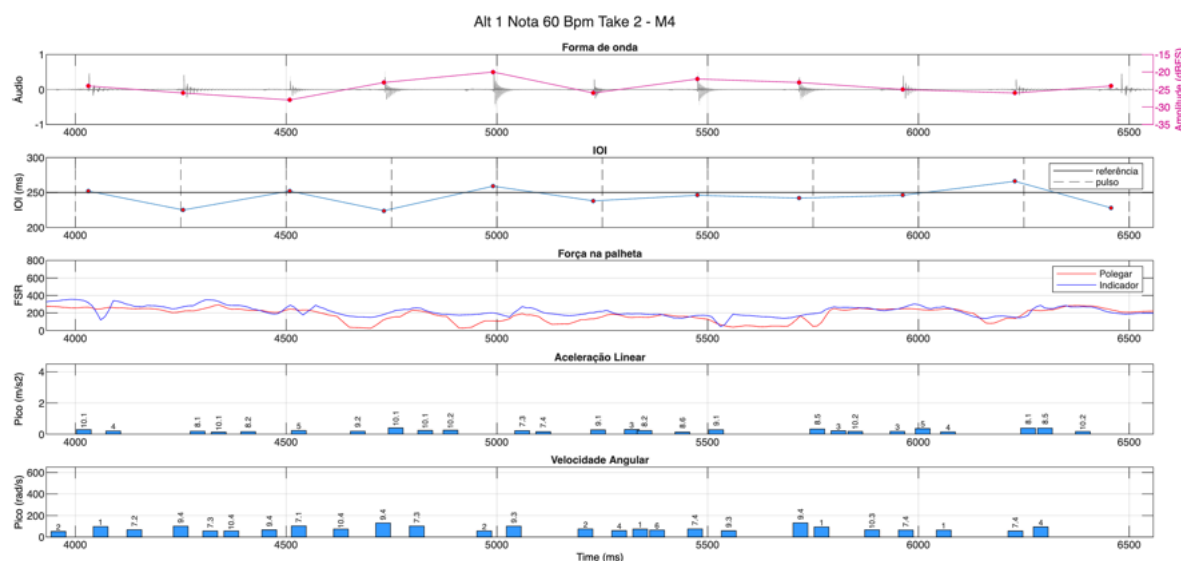


Figura 96: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.

das à palheta, observa-se um aumento moderado em comparação ao andamento lento. Da mesma forma, os picos de aceleração linear e de velocidade angular se intensificam, ainda que mantenham as mesmas direções predominantes identificadas em 60 bpm.

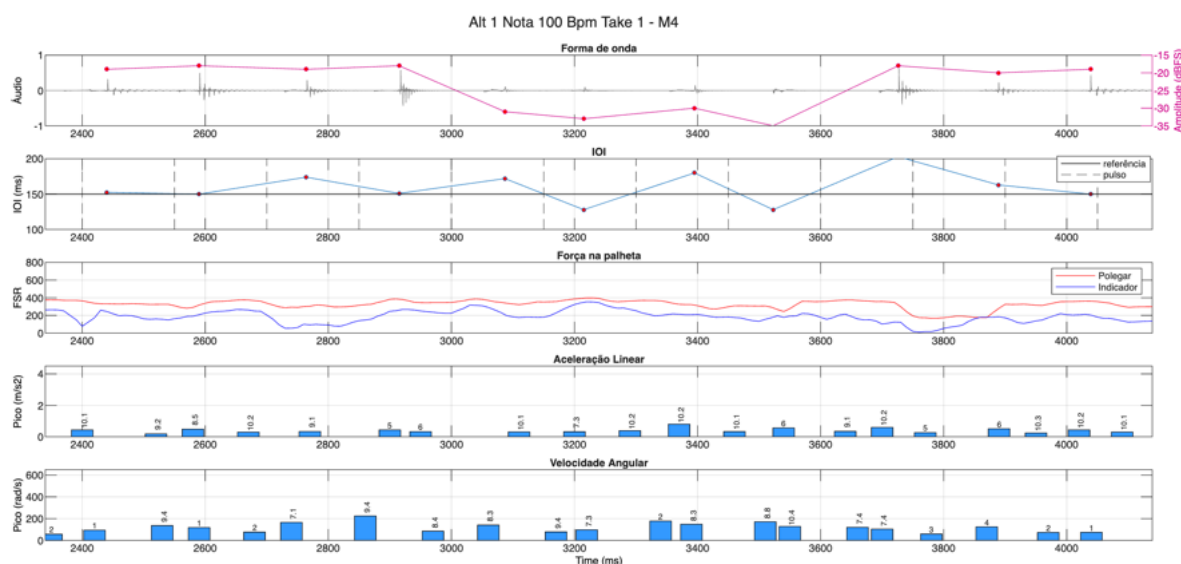


Figura 97: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.

Para o andamento de 60 bpm (Figura 99), o músico M5 apresenta dinâmicas elevadas e um comportamento temporal caracterizado por onsets inicialmente atrasados, que

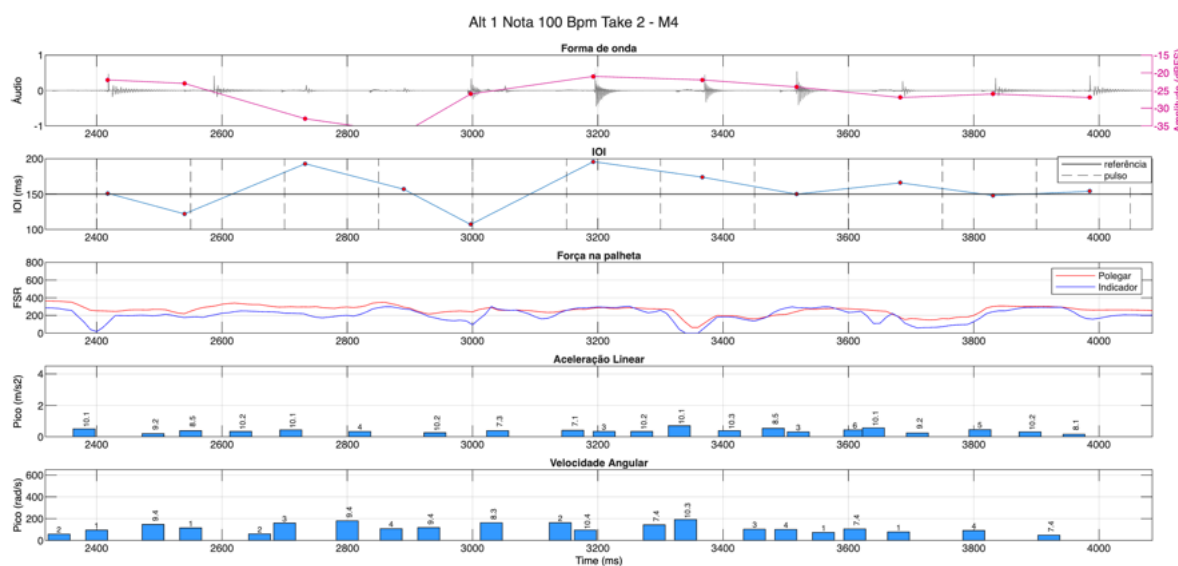


Figura 98: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.

posteriormente passam a adiantar-se em relação ao pulso, embora os IOIs permaneçam, em geral, próximos da referência métrica. As forças aplicadas à palheta situam-se em níveis altos, e os picos de aceleração linear e velocidade angular exibem intensidades elevadas, sobretudo na parte final do trecho, com destaque para valores expressivos associados à rotação da mão. No andamento mais rápido (Figura 100), a maioria dessas características se preserva. A principal mudança ocorre no comportamento temporal: os onsets passam a se concentrar sistematicamente atrasados em relação ao metrônomo.

Ao observar a técnica de palhetada alternada com uma nota por corda de forma integrada, verifica-se que todos os músicos apresentam baixa variabilidade dos IOIs, com valores próximos ao padrão esperado para cada andamento (Figura 84). Ainda assim, nota-se uma assimetria na posição da mediana dentro das caixas, indicando que as oscilações temporais não se distribuem de maneira equilibrada. No que se refere à precisão dos onsets em 60 bpm, há diferenças claras entre os intérpretes: enquanto alguns atrasam, outros adiantam os ataques, com destaque para M4, que passa de atraso no take 1 para antecipação no take 2. Com o aumento do andamento, todos os músicos passam a atrasar sistematicamente seus onsets em relação ao pulso, acompanhados, em geral, de maior dispersão dos valores; a única exceção é M5, que reduz sua variabilidade no andamento mais rápido.

A Figura 102 apresenta os valores integrados de aceleração linear. Observa-se

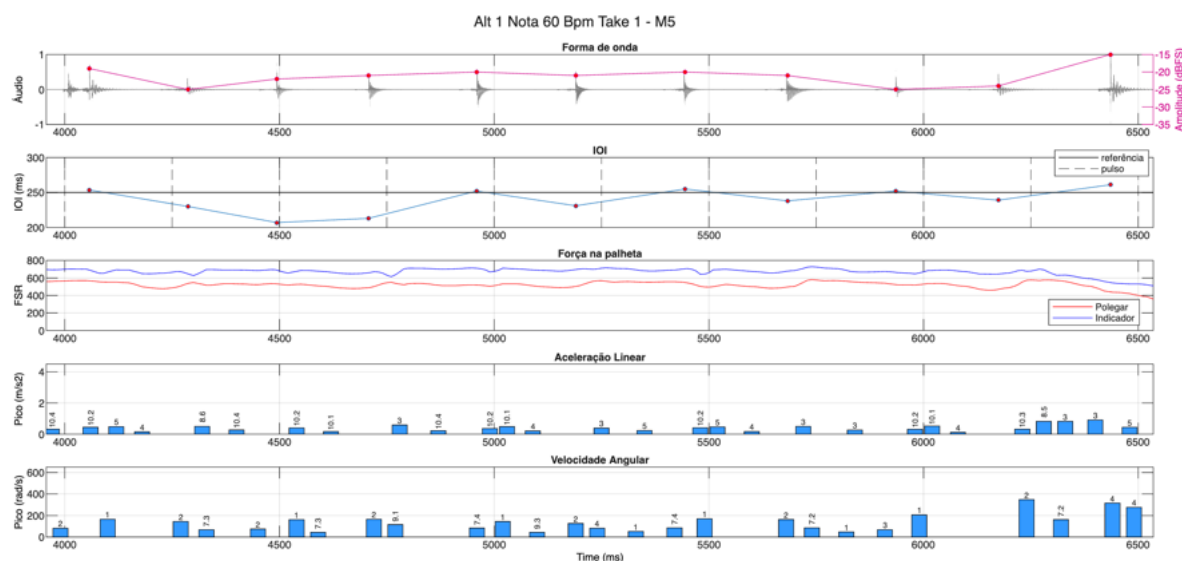


Figura 99: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.

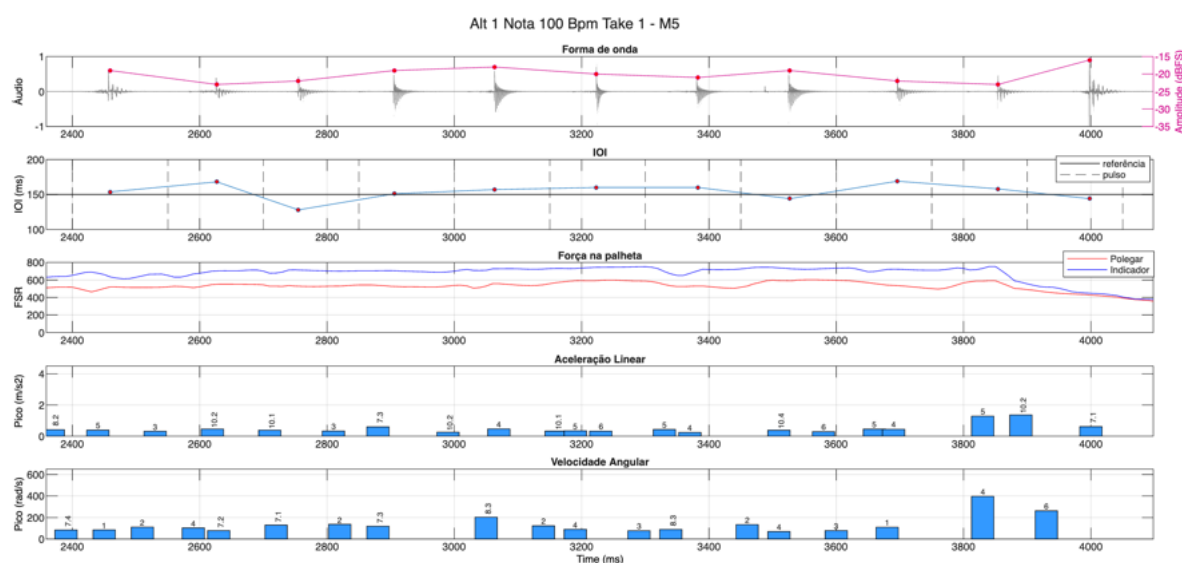


Figura 100: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.

influência da mudança de andamento principalmente nos músicos M2 e M3, que exibem picos de maior intensidade em 100 bpm em comparação a 60 bpm. Destaca-se, ainda, a maior ocorrência de *outliers* em M5 no andamento rápido, bem como a presença de valores atípicos de grande magnitude em M3, também em 100 bpm, indicando variações gestuais mais extremas nessas condições.

Ao analisar as velocidades angulares (Figura 103), observa-se uma influência evi-

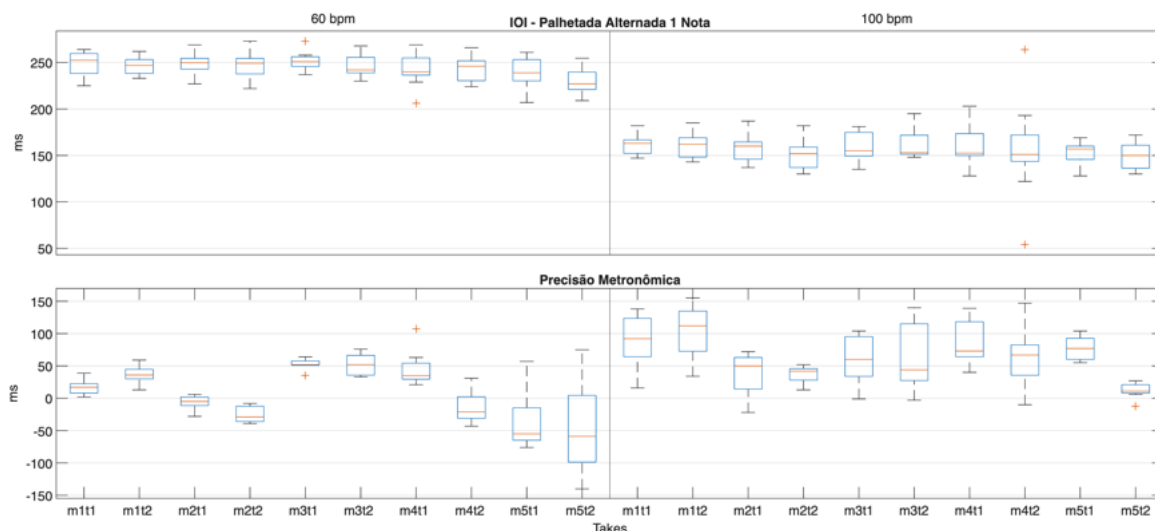


Figura 101: Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda.

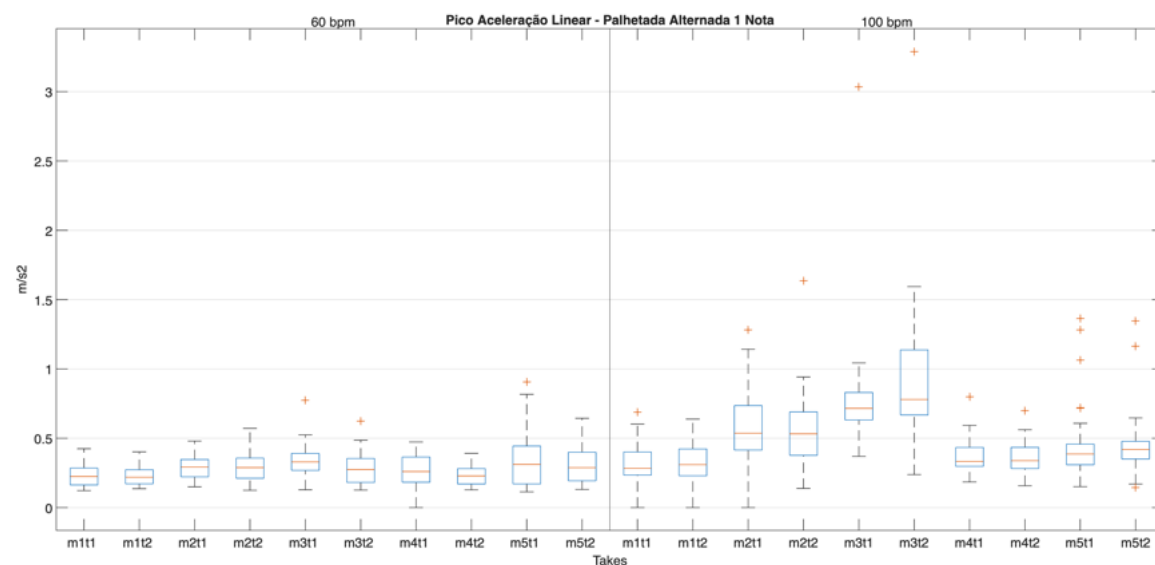


Figura 102: Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda.

dente do andamento. Os músicos M2 e M3 apresentam aumentos expressivos tanto na intensidade dos picos de rotação da mão quanto na variabilidade gestual em 100 bpm, em comparação a 60 bpm. Nos demais participantes, essas mudanças também ocorrem, porém de forma mais discreta, indicando que o efeito do aumento de velocidade é mais pronunciado para alguns músicos do que para outros.

No perfil dinâmico (Figura 104), observa-se que M3 e M4 alteram substancialmente

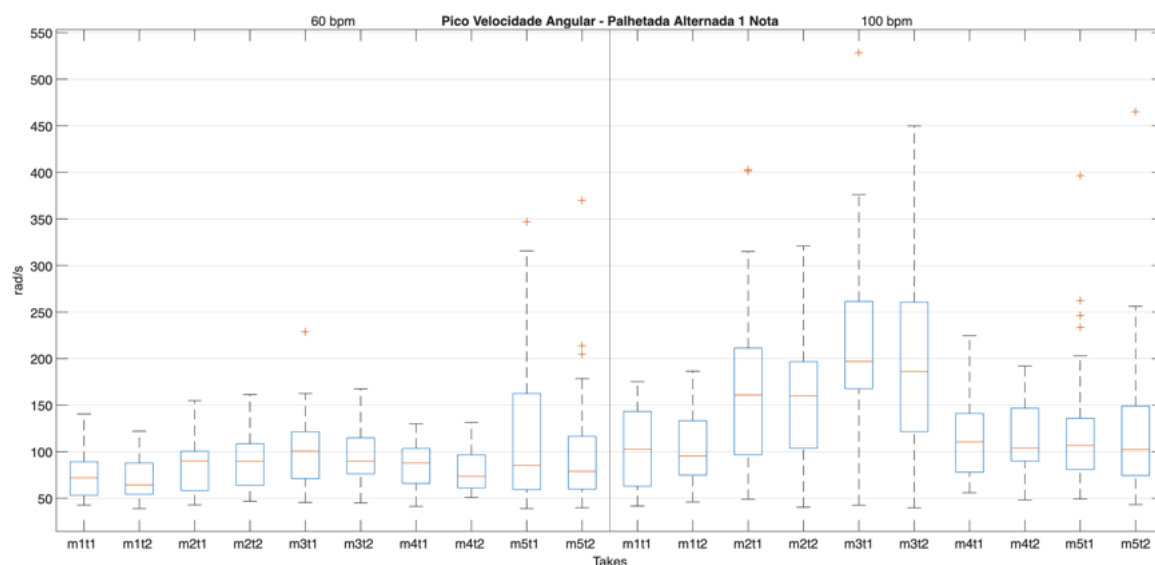


Figura 103: Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda.

o resultado sonoro em 100 bpm. Enquanto em 60 bpm ambos apresentam variabilidades semelhantes — com M4 ligeiramente mais intenso —, no andamento mais rápido passam a exibir grande dispersão e acentuadas assimetrias nos valores de amplitude. Esse contraste evidencia que o aumento de velocidade impacta de maneira expressiva o controle dinâmico desses dois músicos.

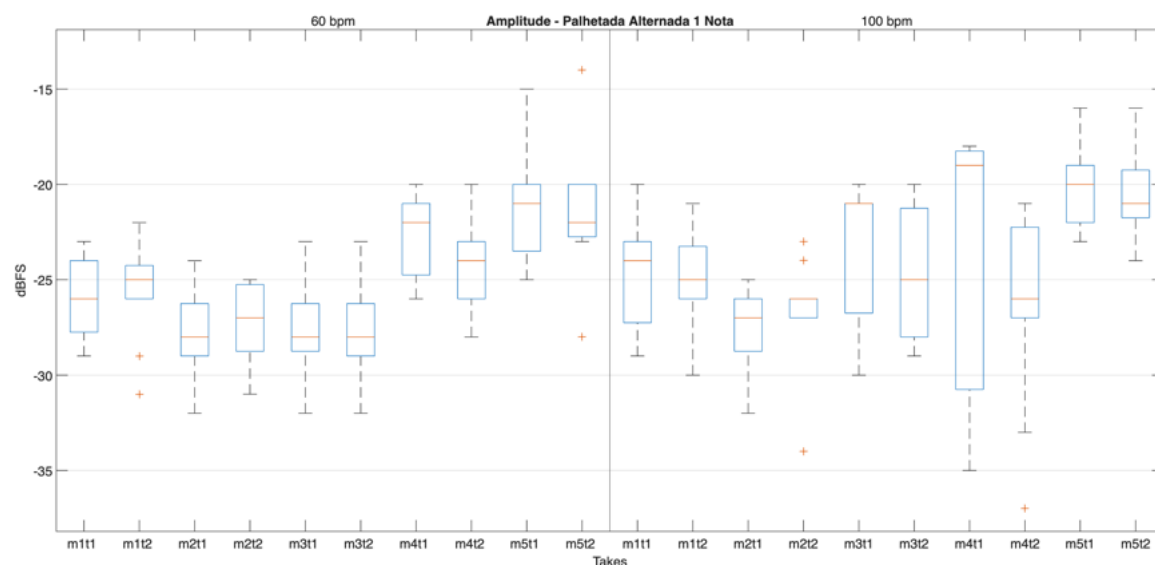


Figura 104: Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de palhetada alternada executada com 1 nota por corda.

A análise integrada dos dados evidencia que esta variação — a mais complexa técnica de palhetada alternada entre as estudadas — impõe desafios significativos a todos

os participantes, tanto pela baixa familiaridade com sua aplicação quanto pelas exigências gestuais de troca rápida de corda e inversão contínua da palhetada. Ainda assim, cada músico desenvolveu estratégias particulares de controle dinâmico, temporal e gestual, que permitem compreender como diferentes abordagens convergem ou divergem no resultado final.

O músico M1 apresentou um comportamento altamente estável entre andamentos, com amplitudes concentradas em uma faixa reduzida, IOIs próximos da referência e atrasos sistemáticos dos onsets. Sua gestualidade manteve-se consistente, com translações discretas e rotações predominantemente no eixo x. M2 também demonstrou regularidade, embora com pequenas variações gestuais entre os takes de 60 bpm, sobretudo na escolha dos eixos de translação. Em 100 bpm, manteve estabilidade dinâmica e gestual, mas com onsets sistematicamente atrasados.

O músico M3 apresentou maior contraste entre andamentos: em 60 bpm, os resultados foram mais regulares e estáveis, enquanto em 100 bpm surgiram maiores oscilações dinâmicas, variações temporais mais acentuadas e intensificação tanto das acelerações lineares quanto das rotações, com mudança clara de eixos predominantes. M4 manteve características semelhantes entre os dois takes de 60 bpm, diferenciando-se sobretudo no comportamento temporal — atrasos no take 1 e adiantamentos no take 2. Em 100 bpm, suas execuções tornaram-se mais irregulares, com maior dispersão das amplitudes, IOIs distantes da referência e intensificação dos picos gestuais.

Por fim, M5 apresentou o perfil mais intenso entre os participantes, com amplitudes elevadas, forças altas na palheta e picos gestuais expressivos. Seu comportamento temporal variou conforme o andamento: adiantamentos iniciais em 60 bpm e atrasos sistemáticos em 100 bpm.

Quando observados coletivamente, os músicos exibem baixa variabilidade dos IOIs, independentemente do andamento, embora com assimetrias que revelam distribuições não equilibradas das variações temporais. A 60 bpm, há diversidade de comportamentos entre antecipações e atrasos; em 100 bpm, todos passam a atrasar os ataques, sugerindo uma resposta comum ao aumento da demanda técnica. As análises integradas mostram ainda que a aceleração linear e a velocidade angular tendem a intensificar-se no andamento rápido — especialmente em M2 e M3 —, enquanto o perfil dinâmico se altera mais profundamente em M3 e M4, que apresentam maior dispersão e assimetria em 100 bpm.

De modo geral, apesar das diferenças individuais nas estratégias de execução, todos os performers convergem para resultados sonoros relativamente próximos, demonstrando adaptação eficiente a uma técnica considerada pouco usual e tecnicamente desafiadora.

#### 4.1.2.2 *Sweep picking*

A técnica de *sweep picking* fundamenta-se na execução de ataques sequenciais em uma única direção — descendente ou ascendente — aproveitando o deslocamento contínuo da palheta entre as cordas. Diferentemente da palhetada alternada, em que cada ataque exige mudança de direção, o *sweep* privilegia a fluidez gestual, permitindo que a mão direita percorra o conjunto de cordas em um único gesto suave, com economia de movimento e manutenção da velocidade. Trata-se de uma estratégia frequentemente associada à execução de arpejos extensos, nos quais cada corda produz uma única nota, favorecendo um fraseado contínuo e articulado.

No contexto deste estudo, a técnica apresenta um desafio adicional: não há repetição de notas na corda 1, prática comum nos exercícios tradicionais de *sweep picking* e que auxilia no ajuste da mão durante a transição entre o movimento descendente e o ascendente. A ausência desse ponto de apoio torna a execução mais exigente, pois o retorno da palheta deve ocorrer sem a “âncora” gestual normalmente oferecida pela repetição da nota no extremo agudo. Desse modo, o *sweep picking* analisado aqui demanda não apenas fluidez direcional, mas também alto controle espacial e temporal na inversão do trajeto da palheta.

Em síntese, o *sweep picking* combina deslocamento contínuo e adaptação na mudança de direção, configurando uma técnica cuja complexidade se intensifica nas condições investigadas neste estudo. Observaremos a seguir o comportamento dos músicos diante desses desafios específicos.

## 5 cordas

Iniciaremos a análise da técnica de *sweep picking* considerando a variação que utiliza cinco cordas, abrangendo a corda A até a corda E aguda.

Os takes do músico M1 no andamento de 60 bpm (Figura 105) e de 100 bpm (Figura 244) não apresentam diferenças substanciais entre si. Em ambos, observa-se um perfil dinâmico característico, no qual a intensidade inicial aumenta progressivamente até

a chegada às cordas agudas e, em seguida, diminui no retorno ao ponto de origem. No domínio temporal, os IOIs em 60 bpm oscilam em torno da referência, exibindo valores significativamente maiores no momento de inversão da direção do *sweep*. Já em 100 bpm, o músico apresenta um comportamento de leve aumento e posterior diminuição dos IOIs, predominantemente acima da referência temporal. A relação com os pulsos é semelhante nos dois andamentos: os onsets ocorrem sistematicamente atrasados em relação ao metrônomo. As forças aplicadas à palheta evidenciam estratégias distintas conforme o sentido do gesto: na trajetória descendente, os valores são baixos para ambos os dedos, embora com picos mais evidentes no indicador; na trajetória ascendente, a força do indicador aumenta de forma expressiva. Do ponto de vista gestual, não se observam mudanças de direção ou reorganizações estruturais entre os andamentos, mas sim um aumento na intensidade das rotações da mão em 100 bpm.

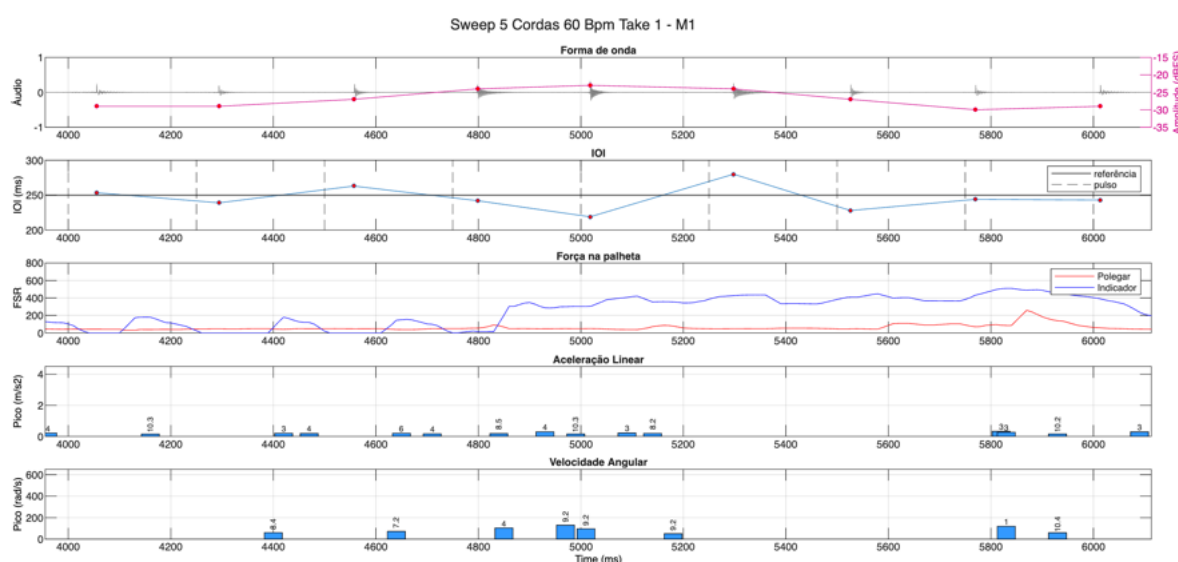


Figura 105: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.

No andamento mais lento (Figura 107), o músico M2 evidencia dificuldades expressivas na inversão da direção da palhetada. Na trajetória descendente, os ataques ocorrem atrasados em relação ao pulso, ao passo que, na ascendente, passam a se antecipar ao metrônomo. Essa assimetria entre as duas metades do gesto é acompanhada por valores máximos e mínimos de IOI bastante distantes da referência temporal, indicando irregularidade na manutenção do ritmo. As amplitudes, por outro lado, apresentam baixa variação ao longo do trecho. A força aplicada à palheta segue um padrão semelhante ao

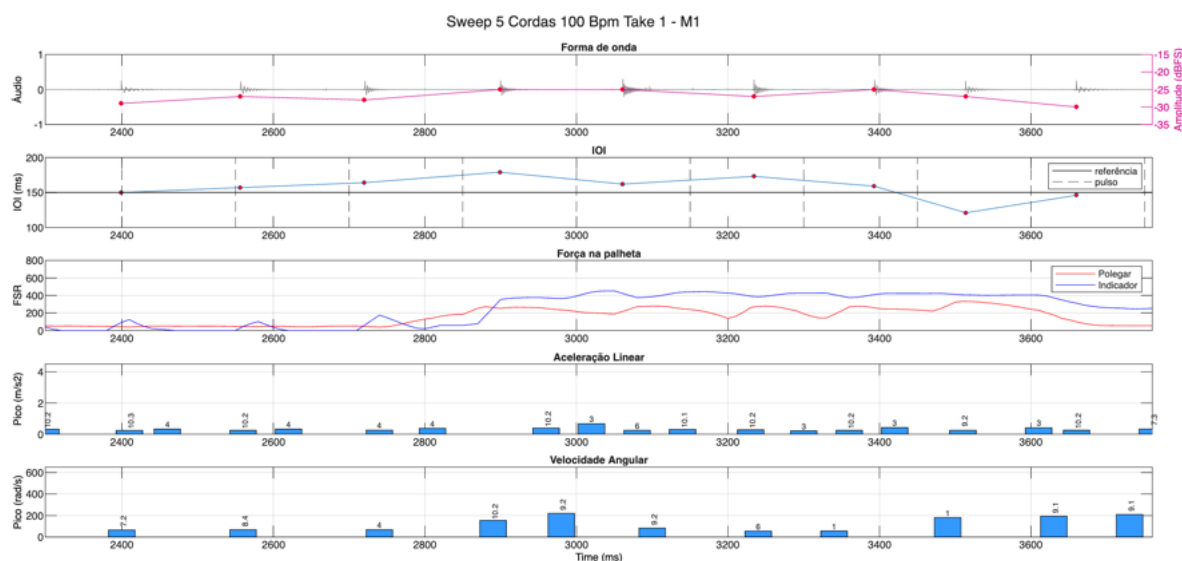


Figura 106: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.

observado em M1, com a particularidade de uma maior atuação do polegar na primeira parte da execução. Em termos gestuais, predomina o eixo y nas translações e o eixo x nas rotações da mão. No andamento mais rápido (Figura 108), a maior parte dessas características se mantém. Acrescenta-se, porém, uma contribuição mais evidente do eixo z na aceleração linear, bem como uma divisão mais equilibrada entre os eixos x e z nas velocidades angulares, sugerindo ajustes gestuais na execução em velocidade maior.

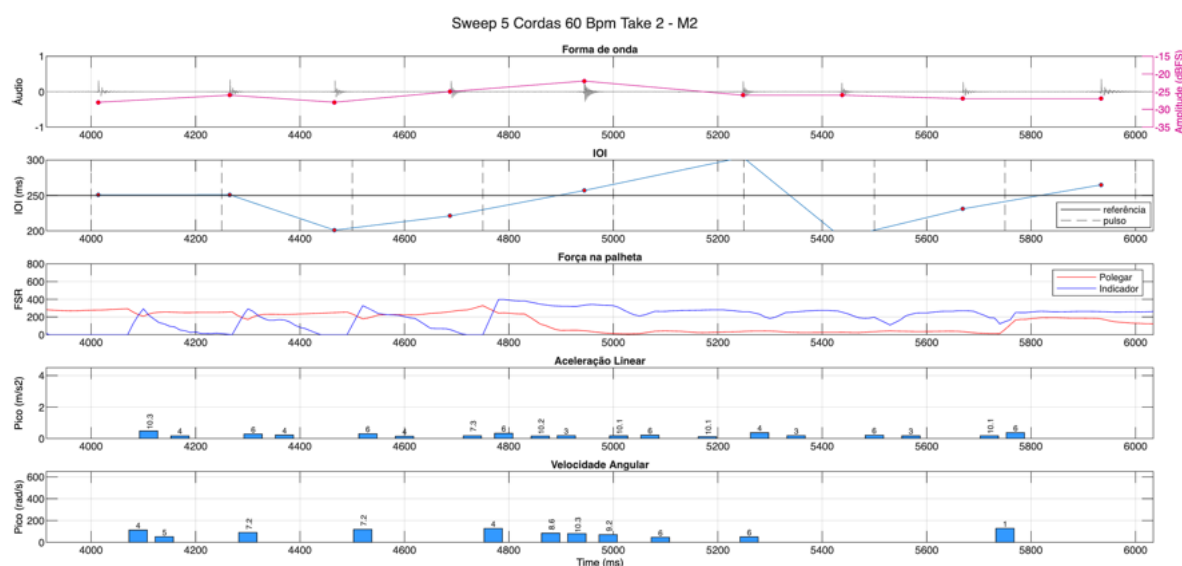


Figura 107: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.

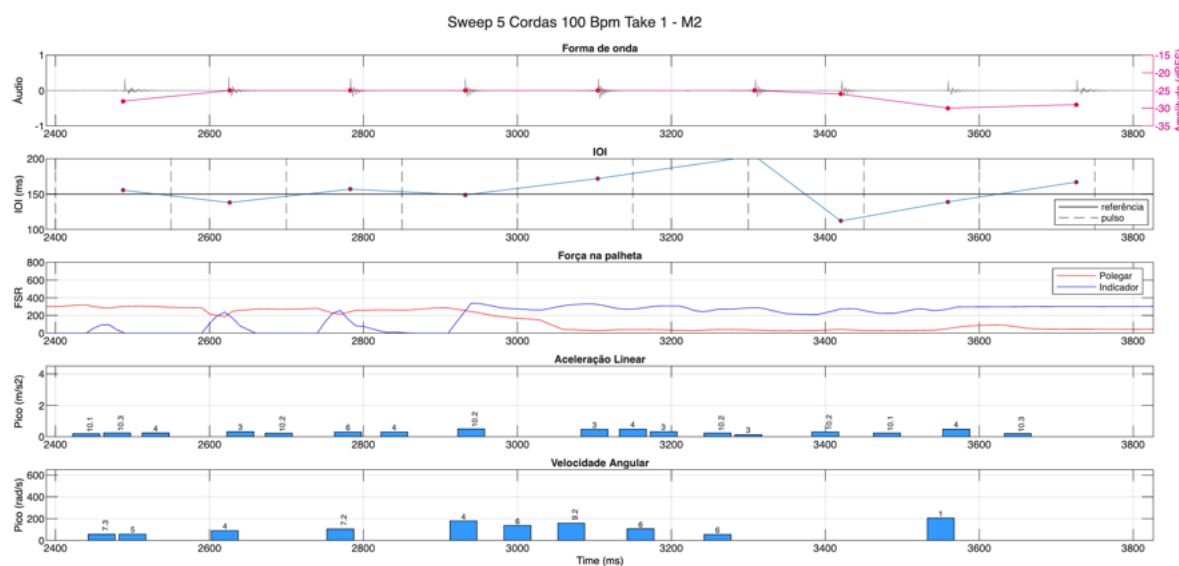


Figura 108: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.

O músico M3 apresenta comportamentos bastante distintos em cada registro do *sweep* com cinco cordas. No primeiro take do andamento mais lento (Figura 109), observa-se um leve aumento progressivo da dinâmica no início da execução, enquanto os IOIs se mantêm relativamente concentrados em torno do valor de referência. Ainda assim, os onsets ocorrem atrasados em relação ao pulso, indicando um descompasso apesar da regularidade interna. Nas forças aplicadas à palheta, as medidas associadas ao indicador são consistentemente maiores que as do polegar. Do ponto de vista gestual, a translação da mão é dominada pelo eixo y positivo, acompanhado de contribuições relevantes dos eixos x e z, ambos com valores negativos. Já na rotação da mão, observa-se atuação praticamente exclusiva do eixo x.

No segundo take (Figura 110), o perfil dinâmico mantém-se praticamente constante ao longo do trecho. Os IOIs permanecem próximos ao valor de referência, com exceção da mudança de direção da palhetada, momento em que se observa um valor significativamente elevado. Nessa mesma região, os onsets — que nos ataques anteriores apareciam adiantados — passam a ocorrer atrasados em relação ao metrônomo, evidenciando uma ruptura no padrão temporal. As forças aplicadas à palheta permanecem relativamente estáveis, embora exibam um salto expressivo próximo ao último ataque. Do ponto de vista gestual, nota-se uma alteração importante: a velocidade angular, antes concentrada exclusivamente no eixo x, passa a compartilhar protagonismo com o eixo z. Na ace-

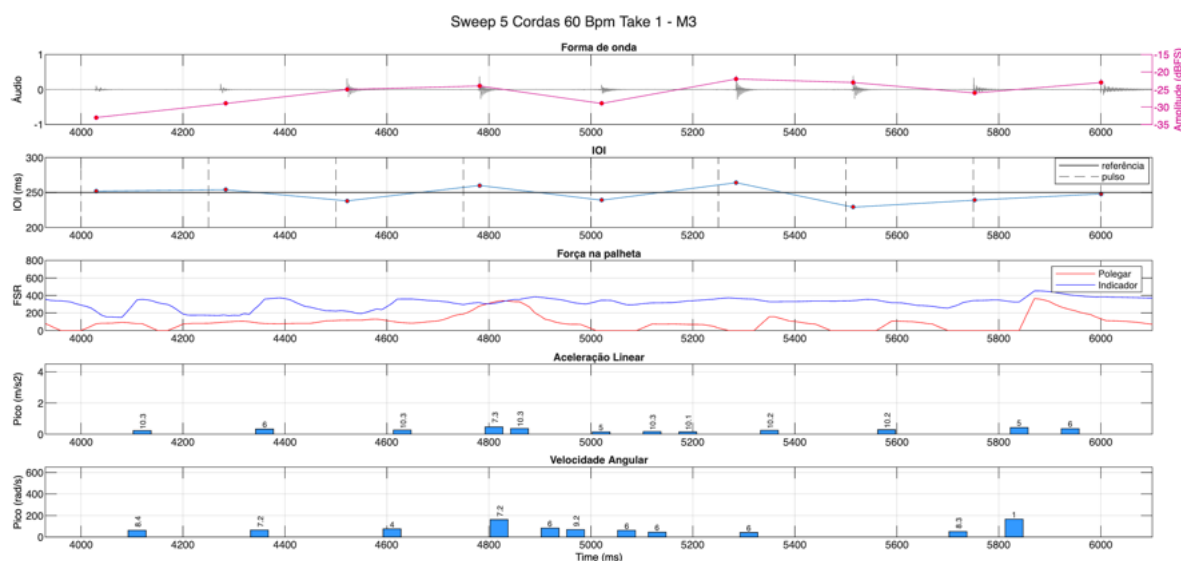


Figura 109: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.

lação linear, o eixo z também sofre uma mudança significativa, invertendo seu sentido e passando a apresentar valores positivos, o que indica ajuste gestual específico para este take.

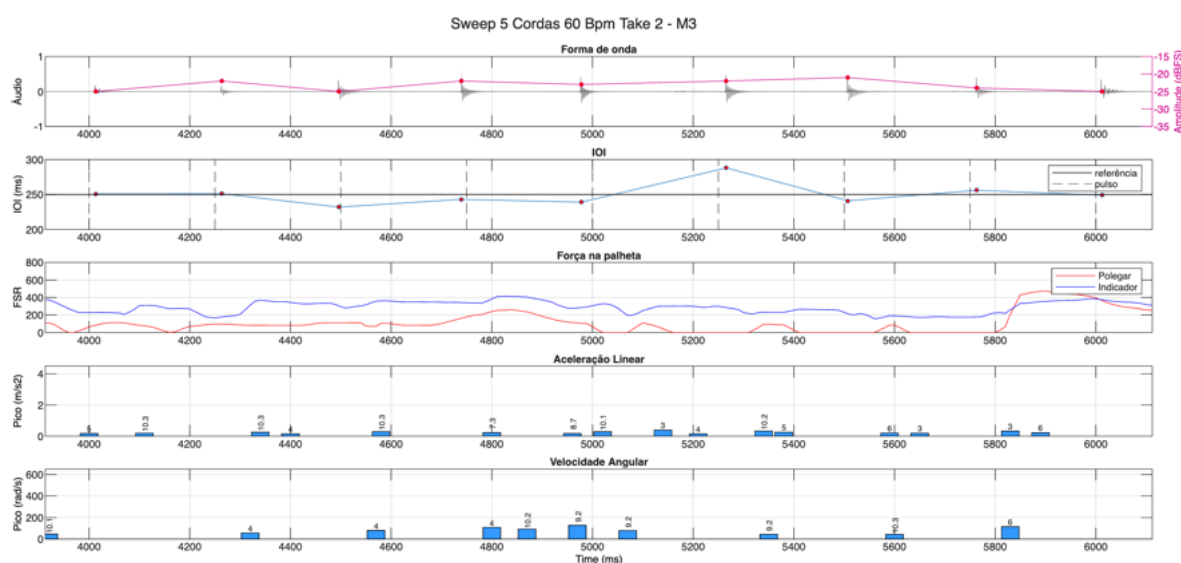


Figura 110: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.

No andamento de 100 bpm, o primeiro registro (Figura 111) apresenta amplitudes elevadas, comportamento que se repete no segundo registro (Figura 112). Em ambos os takes, os IOIs exibem grande dispersão em relação ao valor de referência, acompanhada de atrasos sistemáticos em relação ao pulso. As forças aplicadas à palheta — que agora

se distribuem dentro de uma mesma faixa de valores — mostram-se mais homogêneas no take 2 do que no take 1. A estratégia gestual de translação da mão mantém-se semelhante entre os dois registros e guarda continuidade com o padrão observado no andamento mais lento. Já a rotação da mão, em 100 bpm, passa a se distribuir de modo praticamente equilibrado entre os três eixos.

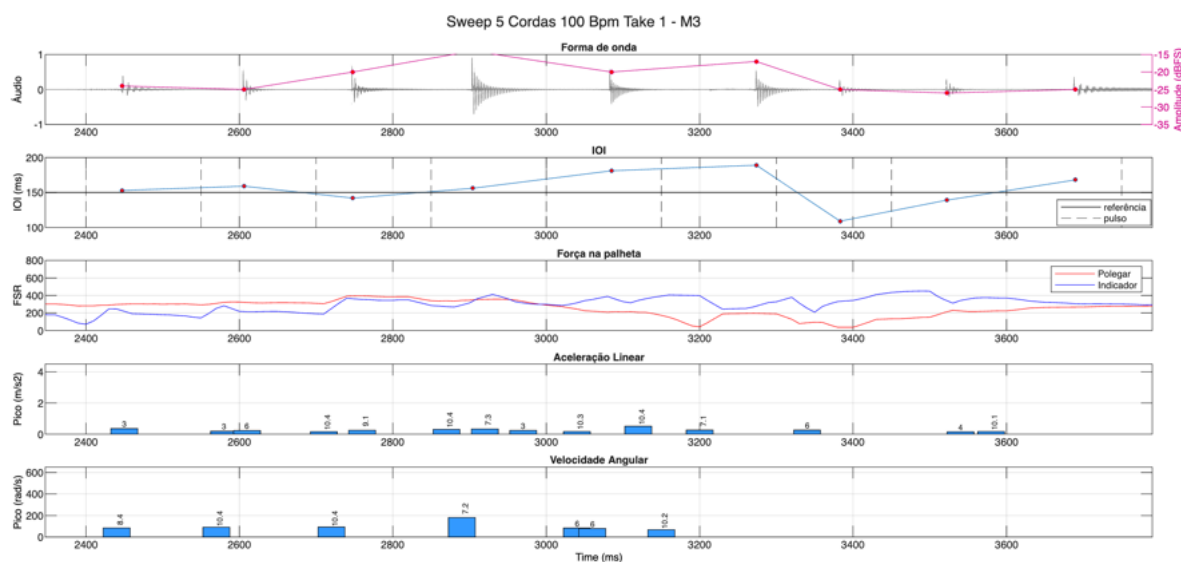


Figura 111: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.

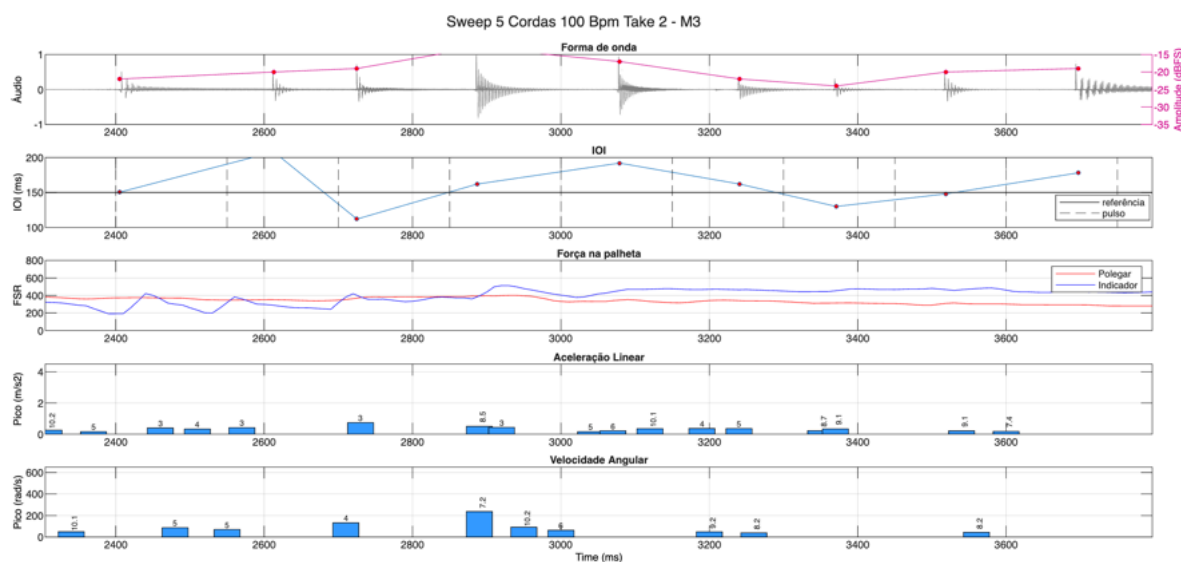


Figura 112: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.

A Figura 113 apresenta o registro de M4 no andamento de 60 bpm. Observa-se que as forças aplicadas à palheta permanecem constantes, exibindo vales alinhados entre os dois dedos durante a trajetória ascendente dos ataques. Considerando os gestos, a translação da mão ocorre principalmente nos eixos y (predominante e positivo) e x (negativo), enquanto a rotação envolve os três eixos, com x positivo, y negativo e predominância do eixo z positivo. O perfil dinâmico mantém-se relativamente estável ao longo do trecho, e os ataques ocorrem atrasados em relação ao pulso, embora a dispersão dos IOIs em torno da referência não seja tão acentuada.

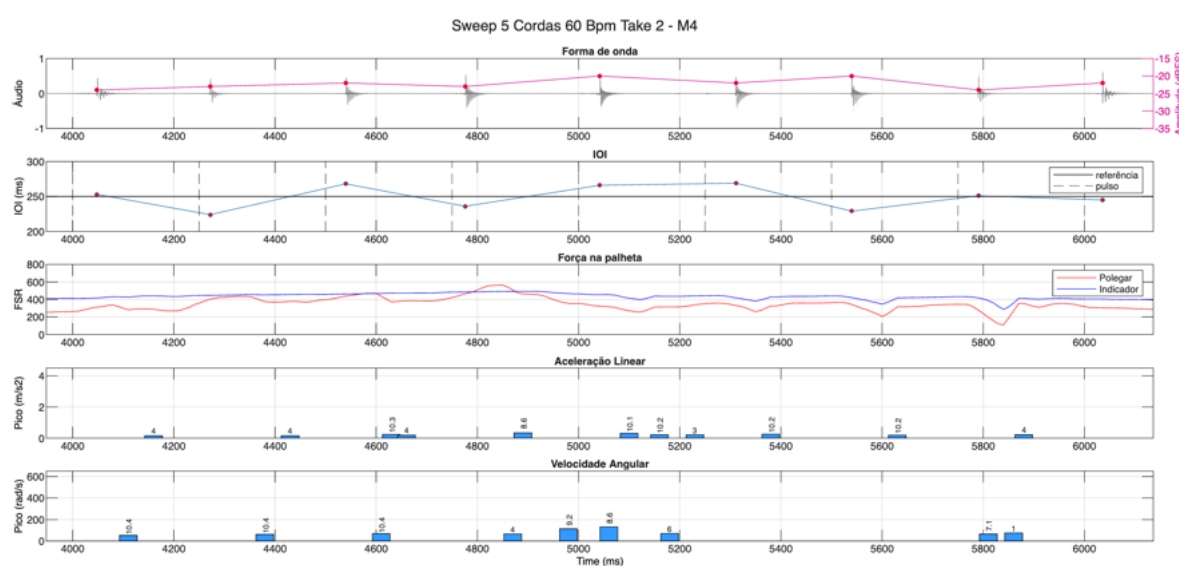


Figura 113: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.

No andamento mais rápido (Figura 114), observa-se o surgimento do eixo z positivo na translação da mão, componente não identificado no andamento mais lento, indicando um ajuste gestual específico à maior velocidade. Por outro lado, a rotação da mão mantém o mesmo padrão observado em 60 bpm, preservando a distribuição entre os três eixos. As forças aplicadas à palheta permanecem constantes e equilibradas entre os dedos, sem a ocorrência de picos ou vales expressivos. Do ponto de vista sonoro, há maior variação das amplitudes, incluindo episódios pontuais de valores elevados. Os ataques continuam atrasados em relação ao pulso, e os IOIs apresentam grande dispersão especialmente na mudança de direção da palhetada.

O perfil dinâmico do músico M5 revela-se notavelmente constante, com amplitudes muito próximas entre si tanto em 60 bpm (Figura 115) quanto em 100 bpm (Figura 116).

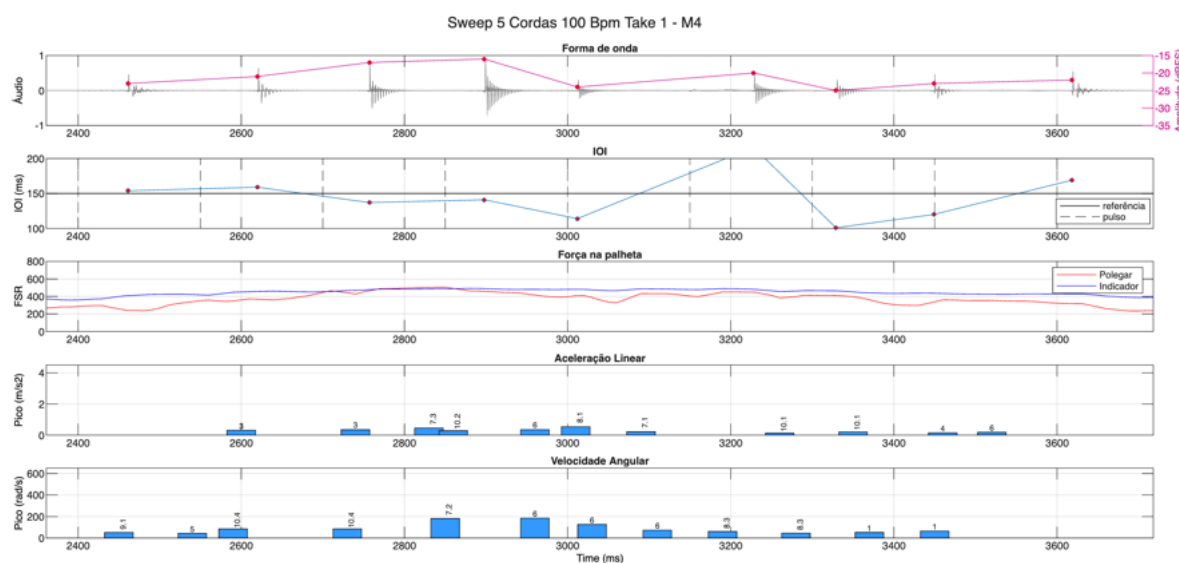


Figura 114: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.

As forças aplicadas à palheta também permanecem semelhantes entre os andamentos, embora se mostrem mais suscetíveis a vales no andamento mais lento. Temporalmente, os ataques ocorrem atrasados em relação ao pulso, porém com tendências distintas nos IOIs: em 60 bpm, os valores situam-se majoritariamente abaixo da referência, enquanto em 100 bpm passam a localizar-se acima dela. No âmbito gestual, a translação da mão apresenta estratégias diferentes conforme o andamento. Em 60 bpm, predominam picos positivos no eixo y, acompanhado de contribuições de x e z, ambos negativos. Já em 100 bpm, observa-se um padrão inverso: os picos do eixo y tornam-se negativos, enquanto x e z passam a atuar com valores positivos, com predominância do eixo z.

Na análise conjunta de todos os takes nos dois andamentos, a Figura 117 apresenta o comportamento geral dos picos de aceleração linear. Observa-se que, em ambos os andamentos, os músicos se distribuem dentro de uma faixa comum de intensidades, indicando um padrão gestual relativamente convergente. No entanto, verificam-se aumentos pontuais de variabilidade no andamento mais rápido, como nos dois takes de M1 e no segundo take de M3, evidenciando situações isoladas em que a aceleração linear se torna mais irregular sob maior demanda técnica.

Nas medidas de rotação da mão (Figura 118), observa-se um comportamento semelhante ao verificado nas acelerações lineares: os músicos ocupam uma faixa comum de velocidades angulares, revelando certa convergência gestual entre os participantes. Com o

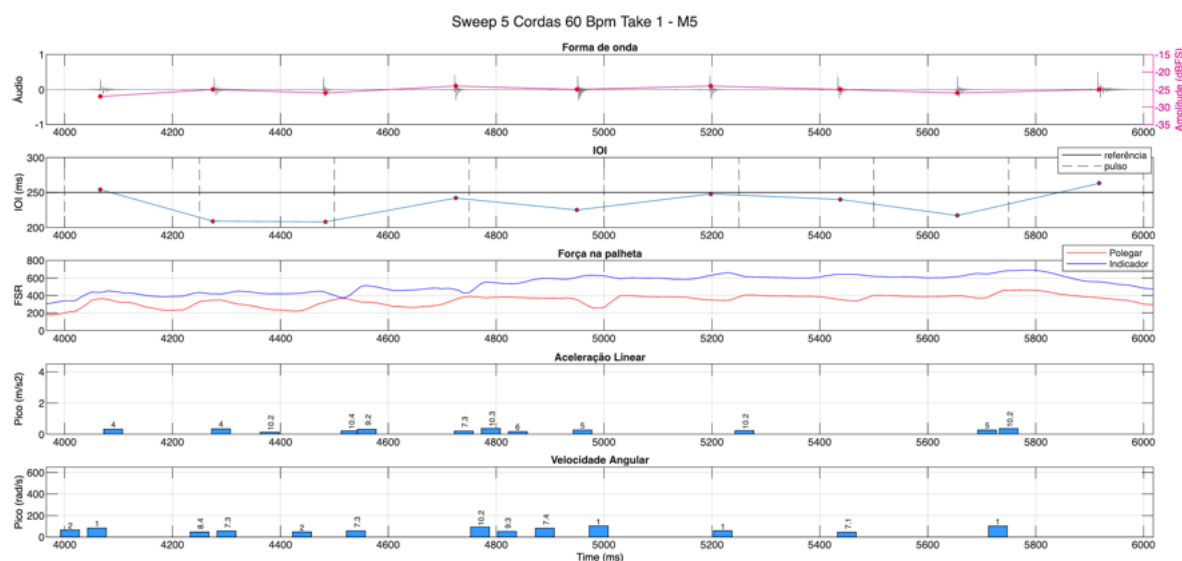


Figura 115: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.

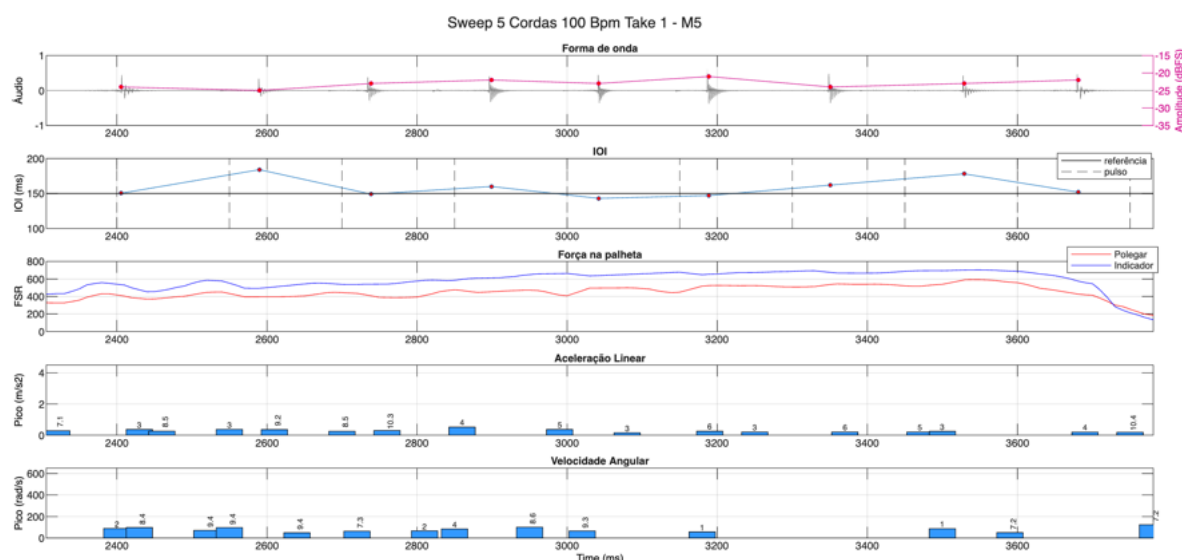


Figura 116: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.

aumento do andamento, surgem casos isolados de maior variabilidade, e nota-se também um incremento na quantidade de *outliers* em 100 bpm em comparação a 60 bpm, indicando que a execução em velocidades maiores tende a intensificar oscilações pontuais no controle rotacional da mão.

As amplitudes (Figura 119), nos dois andamentos, revelam uma divisão consistente entre os participantes: M1 e M2 apresentam intensidades menores, enquanto os demais

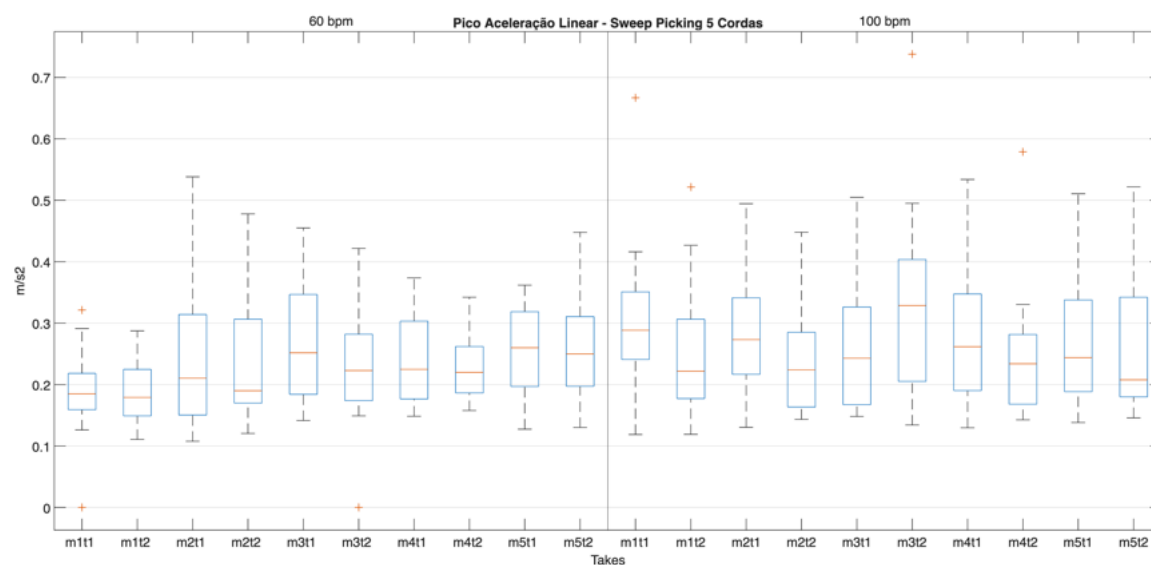


Figura 117: Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de *sweep picking* com cinco cordas.

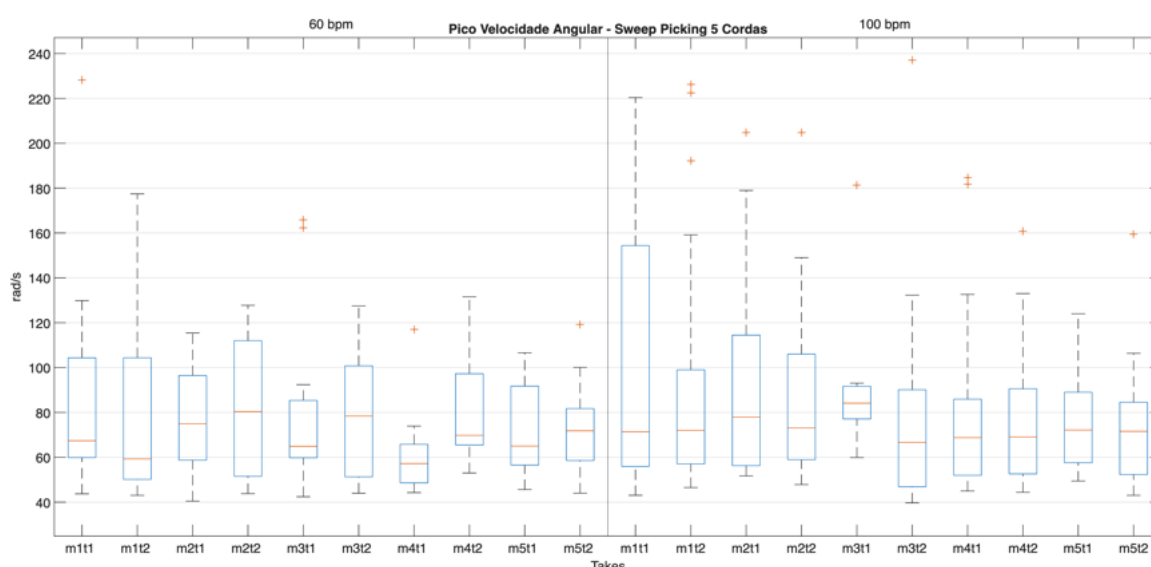


Figura 118: Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de *sweep picking* com cinco cordas.

músicos exibem valores mais elevados. A mudança de andamento produz efeitos distintos entre os performers: M3 apresenta uma inversão na distribuição dos valores, que passam a concentrar-se acima da mediana, ao passo que M4 evidencia um aumento geral da variabilidade, indicando maior instabilidade dinâmica na execução em 100 bpm.

Considerando as questões rítmicas (Figura 120), observa-se que, de modo geral, os músicos apresentam IOIs próximos aos valores de referência, com uma variabilidade que não se relaciona de forma direta ao aumento do andamento — M5, por exemplo,

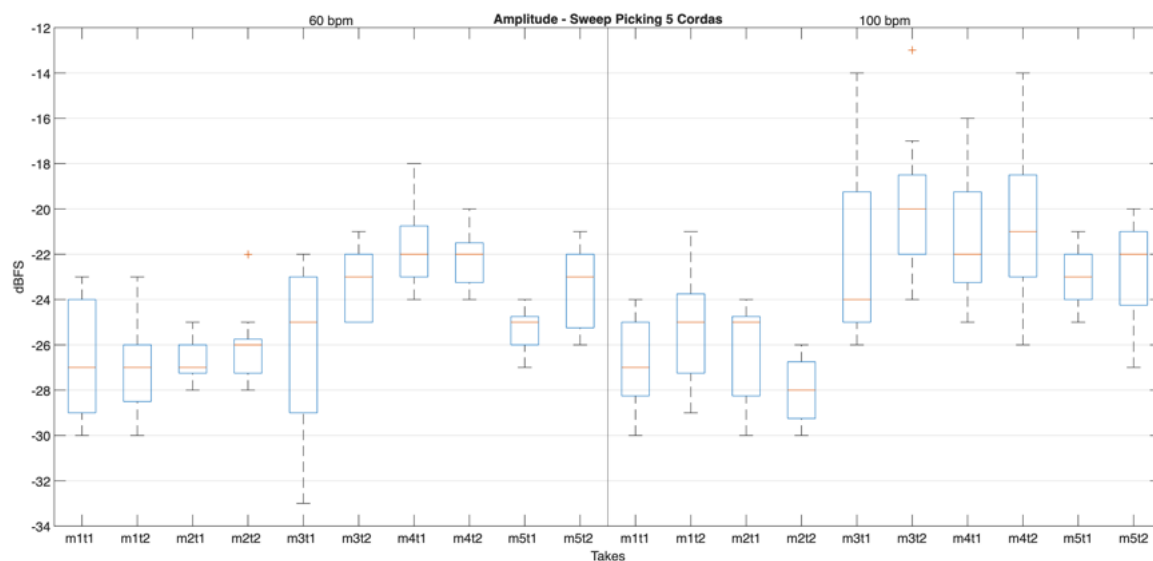


Figura 119: Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de *sweep picking* com cinco cordas.

reduz sua variabilidade em 100 bpm em comparação a 60 bpm. No que diz respeito à precisão metronômica, M2 e M5 apresentam adiantamento dos onsets no andamento de 60 bpm, enquanto os demais participantes tendem ao atraso. Em 100 bpm, prevalece um padrão de atrasos em relação ao pulso, embora com particularidades relevantes: M4 e M5 exibem mudanças expressivas entre seus takes, alternando entre antecipações e atrasos, o que evidencia resultados temporais menos estáveis entre os takes.

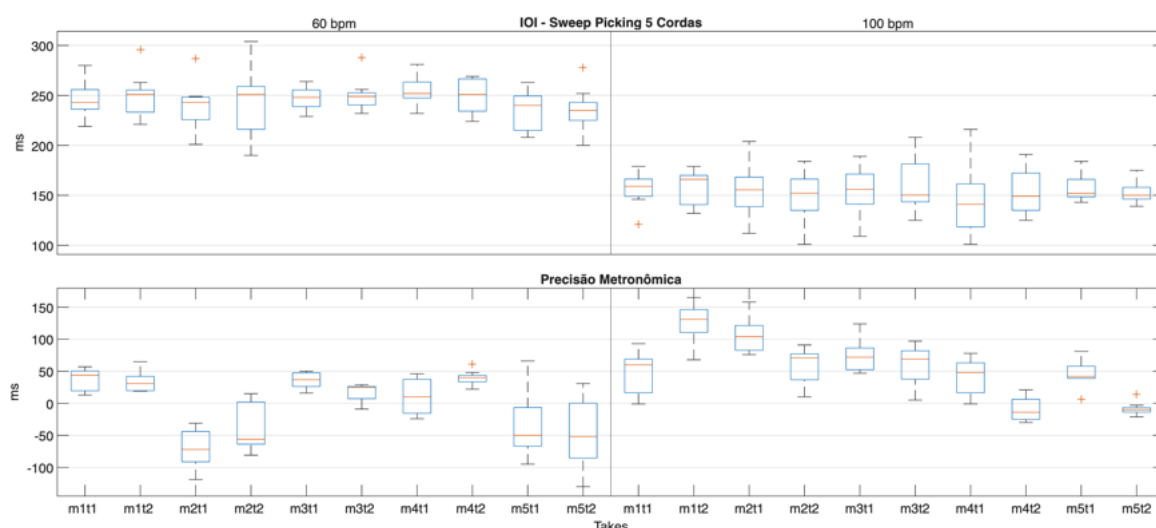


Figura 120: Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de *sweep picking* com cinco cordas.

A execução do *sweep picking* com cinco cordas apresenta um conjunto de desafios

específicos, sobretudo pela necessidade de coordenar um gesto contínuo de descida e subida sem interrupções, mantendo regularidade temporal, controle dinâmico e estabilidade gestual na mudança de direção. No conjunto dos performers, a dificuldade mais evidente concentra-se justamente nesse ponto de inflexão — o momento em que o gesto deixa a trajetória descendente e inicia a ascendente —, onde se observam as maiores irregularidades de IOI, instabilidades rítmicas e adaptações gestuais.

O músico M1 apresenta uma abordagem bastante estável entre andamentos, mantendo dinâmicas com formato característico (crescendo em direção às cordas agudas e decrescendo na volta), atrasos sistemáticos em relação ao pulso e estratégias de força dependentes da direção da palhetada. Do ponto de vista gestual, preserva a organização espacial dos movimentos, alterando apenas a intensidade das rotações em maior velocidade.

O músico M2 demonstra maior fragilidade na mudança de direção da palheta, alternando entre atrasos e adiantamentos conforme a fase do gesto. Embora mantenha amplitudes estáveis, apresenta IOIs distantes da referência e ajustes gestuais mais evidentes em 100 bpm, com incremento da participação dos eixos z nas translações e rotações, indicando estratégias específicas para lidar com a maior velocidade.

O músico M3 é o que mais varia entre os takes: em 60 bpm alterna entre um perfil dinâmico crescente e outro praticamente plano, com alterações temporais marcantes e adaptações gestuais que incluem mudança do eixo dominante em translação e redistribuição das rotações entre os eixos. Em 100 bpm, mantém amplitudes altas e grande dispersão dos IOIs, sempre com atrasos ao pulso, mas reorganizando a rotação da mão para uma participação mais equilibrada dos três eixos.

O músico M4 apresenta gestos consistentes e forças estáveis, mas mantém atrasos sistemáticos em relação ao metrônomo nos dois andamentos. Sua translação alterna entre eixos y e x em 60 bpm e incorpora o eixo z em 100 bpm, sugerindo ajustes finos para lidar com a maior velocidade. A dispersão dos IOIs cresce em 100 bpm, especialmente no momento de inversão do gesto.

O músico M5 mostra grande constância dinâmica e força relativamente estável, mas oscila temporalmente entre IOIs abaixo da referência em 60 bpm e acima em 100 bpm. Sua estratégia gestual muda de forma marcada entre andamentos, invertendo os sinais dos eixos dominantes na translação e aumentando a participação do eixo z em 100

bpm, revelando adaptações expressivas à exigência técnica.

Na análise coletiva, observa-se que a maioria dos músicos compartilha faixas comuns tanto nos picos de aceleração linear quanto nas velocidades angulares, com aumentos de variabilidade em casos isolados no andamento rápido. As amplitudes dividem o conjunto em dois grupos (M1–M2 e M3–M4–M5), e o aumento de andamento impacta de modo individualizado principalmente M3 e M4. Ritmicamente, os IOIs mantêm-se próximos à referência, enquanto a precisão metronômica revela perfis distintos em 60 bpm e maior convergência para atrasos em 100 bpm — embora com instabilidade específica em M4 e M5.

Em síntese, apesar de diferenças expressivas nas estratégias gestuais e temporais entre músicos e entre andamentos, o conjunto dos performers revela padrões comuns de dificuldade típicos da técnica — especialmente na transição entre descida e subida —, o que reforça o caráter tecnicamente exigente do *sweep picking* com cinco cordas.

Seguiremos a análise da técnica de *sweep picking* com execuções utilizando as seis cordas do violão.

## 6 cordas

Na técnica de *sweep picking* envolvendo as seis cordas do violão, o músico M1 apresenta comportamentos bastante semelhantes entre os dois andamentos (Figura 121 e Figura 122). A principal diferença reside na mudança de direção da palhetada: em 60 bpm, esse ponto de inflexão mostra-se mais suscetível a variações de IOI, resultando em episódios alternados de antecipação e atraso dos onsets em relação ao pulso. Em 100 bpm, por outro lado, os ataques passam a ocorrer sistematicamente atrasados. No âmbito dinâmico, as amplitudes permanecem relativamente estáveis nos dois andamentos, enquanto as forças aplicadas à palheta modificam seu padrão no final do movimento descendente. Do ponto de vista gestual, observa-se predominância do eixo *y* nas translações da mão e do eixo *x* nas rotações, configuração que se mantém de forma consistente independentemente do andamento.

Para o músico M2, a mudança de direção da palhetada exerce influência distinta dependendo do andamento. Em 60 bpm (Figura 123), esse ponto de inflexão não afeta de forma significativa nem os IOIs nem a relação dos ataques com o pulso: os onsets tendem a ocorrer adiantados, e apenas no trecho final — após a inversão do gesto — observa-se uma variação mais acentuada dos IOIs. Em 100 bpm (Figura 124), entretanto, o impacto da

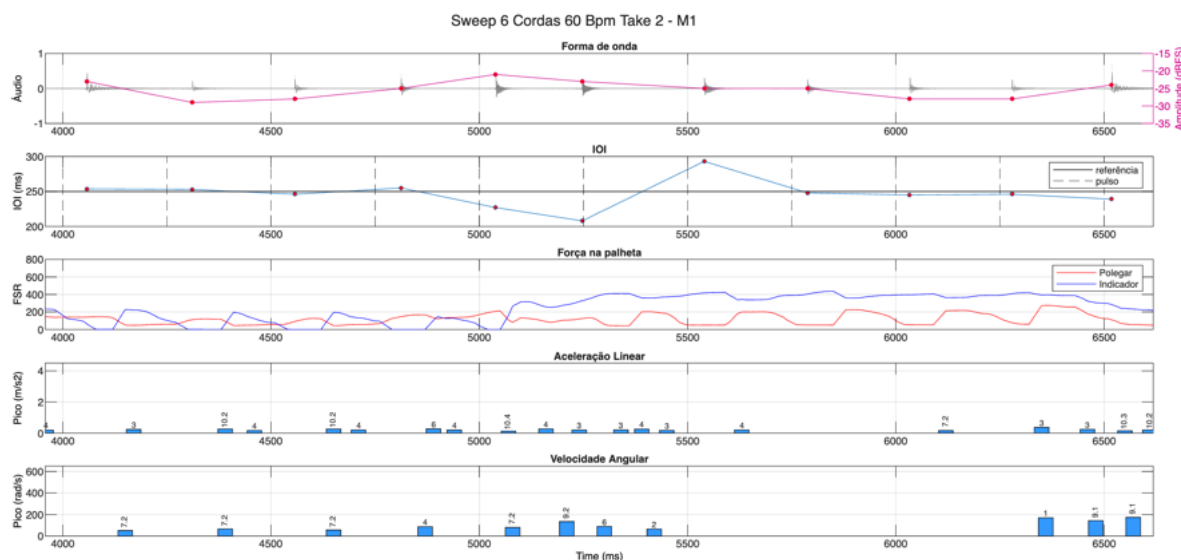


Figura 121: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.

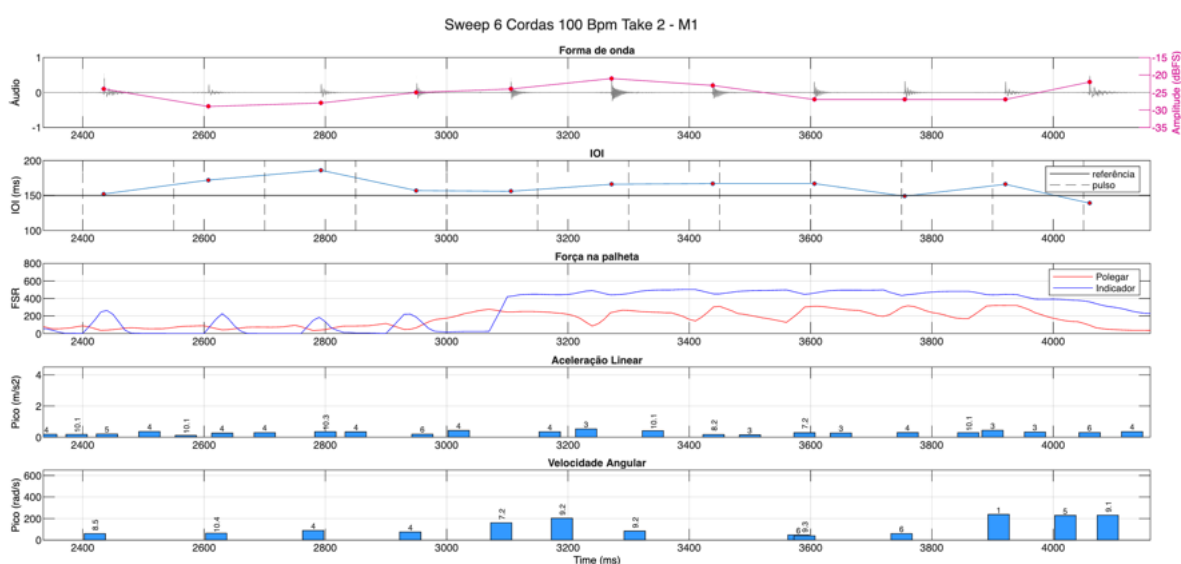


Figura 122: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

mudança de direção torna-se mais evidente: os IOIs se afastam mais da referência temporal e os ataques mostram maior instabilidade em relação ao metrônomo. As amplitudes apresentam baixa variação nos dois andamentos, enquanto as forças aplicadas à palheta sofrem alterações nas proximidades do ponto de inversão da palhetada. No domínio gestual, as intensidades dos picos de aceleração linear revelam predominância do eixo y nos dois andamentos. Nas velocidades angulares, o eixo x permanece dominante, embora

o eixo z apresente participação mais expressiva no andamento rápido.

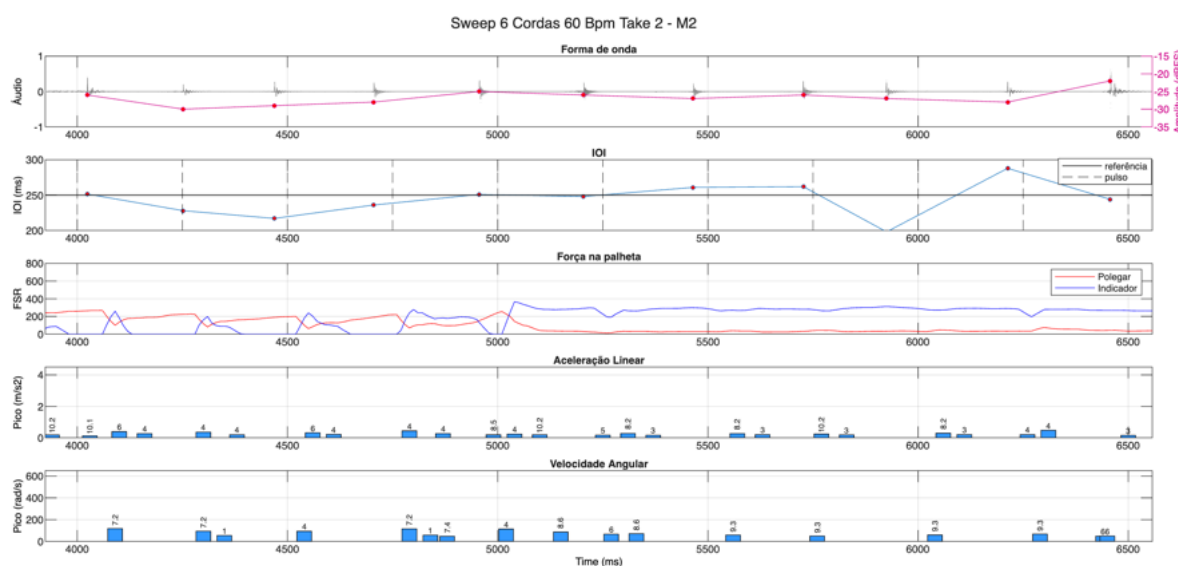


Figura 123: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.

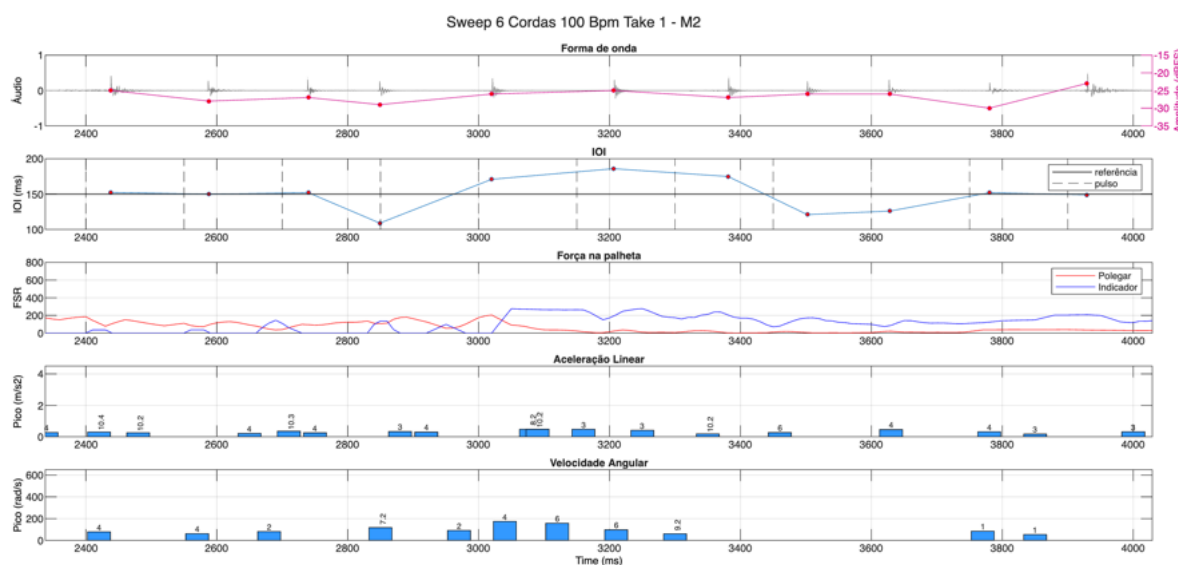


Figura 124: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.

No âmbito gestual, o músico M3 apresenta estratégias distintas entre os dois takes realizados em 60 bpm (Figura 125 e Figura 126). No take 1, a translação da mão combina contribuições de x negativo, y positivo — eixo predominante — e z positivo, enquanto a rotação distribui-se entre x e z, ambos positivos e com predomínio compartilhado. Já no

take 2, observa-se uma mudança clara: o componente de z na translação inverte seu sentido, passando a atuar de forma negativa, e, na rotação, o eixo x deixa de atuar, fazendo com que o eixo z se torne o único predominante. No domínio temporal, ambos os takes apresentam pontos de grande variação dos IOIs. No take 1, ocorre alternância entre antecipações e atrasos dos onsets em relação ao pulso, enquanto no take 2 essa irregularidade se manifesta sobretudo como atraso consistente. Em nenhum dos registros se observa impacto expressivo associado ao ponto de mudança de direção do *sweep*, sugerindo que as instabilidades temporais estão mais relacionadas ao controle interno do gesto do que ao momento de inversão da palhetada.

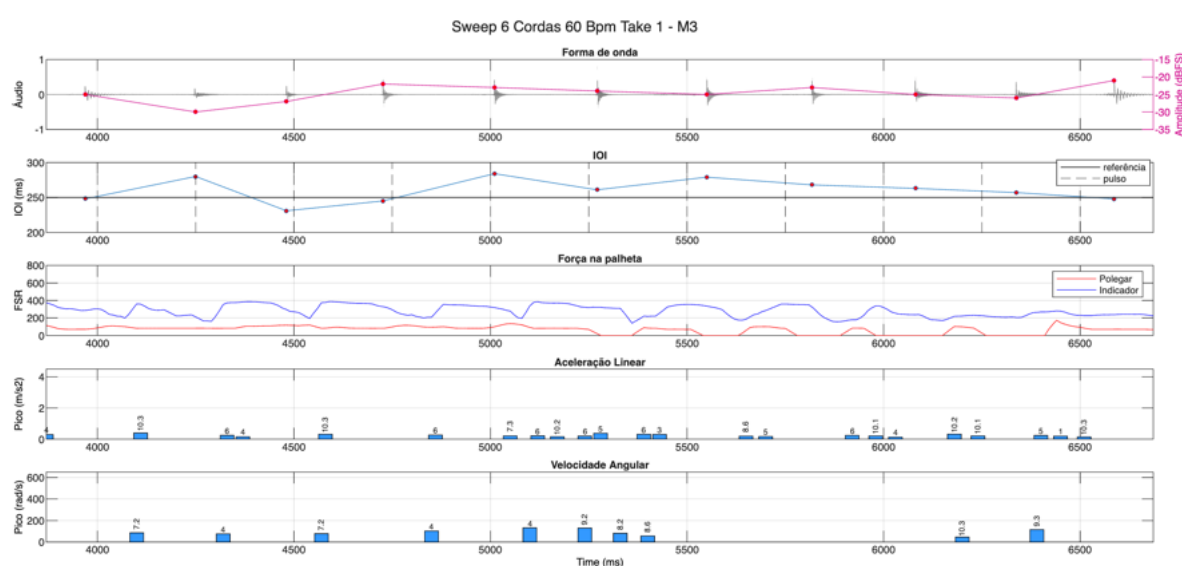


Figura 125: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.

No andamento mais rápido de M3 (Figura 127), observam-se variações expressivas tanto nas amplitudes quanto nos IOIs, acompanhadas de uma alternância constante entre antecipações e atrasos dos onsets em relação ao pulso, indicando menor estabilidade temporal sob maior demanda técnica. Do ponto de vista gestual, a translação da mão ocorre majoritariamente no eixo y, enquanto as rotações passam a envolver os três eixos, com leve predominância do eixo x sobre os demais. No comportamento das forças aplicadas à palheta, destaca-se uma redução da contribuição do polegar no sentido ascendente da palhetada.

Para o músico M4, o segundo take em 100 bpm foi desconsiderado devido a falhas na captação de áudio. Considerando os registros válidos, observa-se que, em ambos

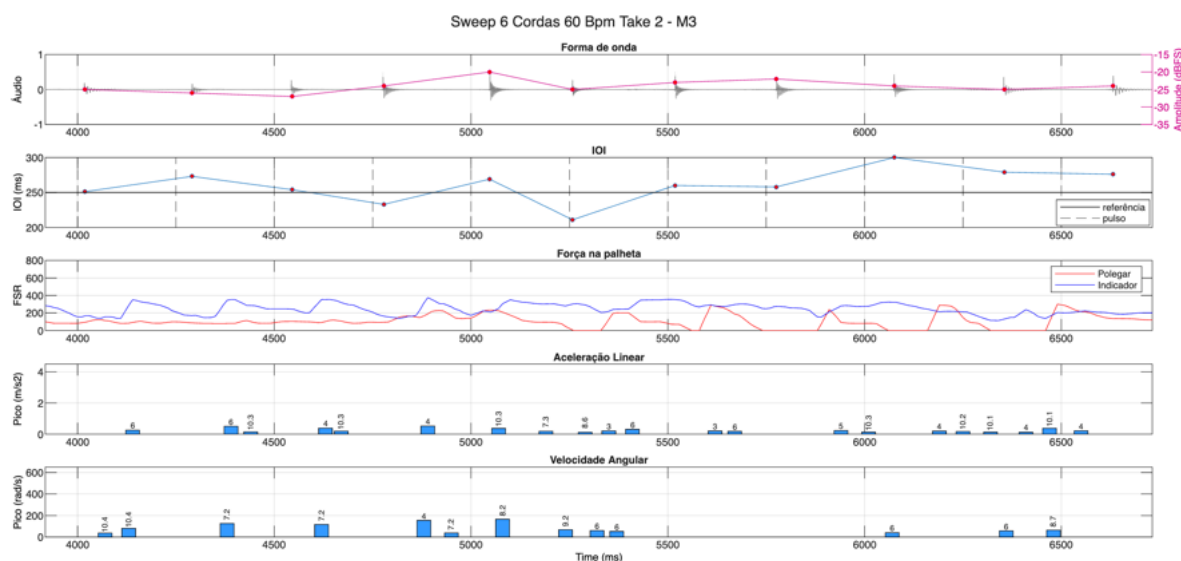


Figura 126: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.

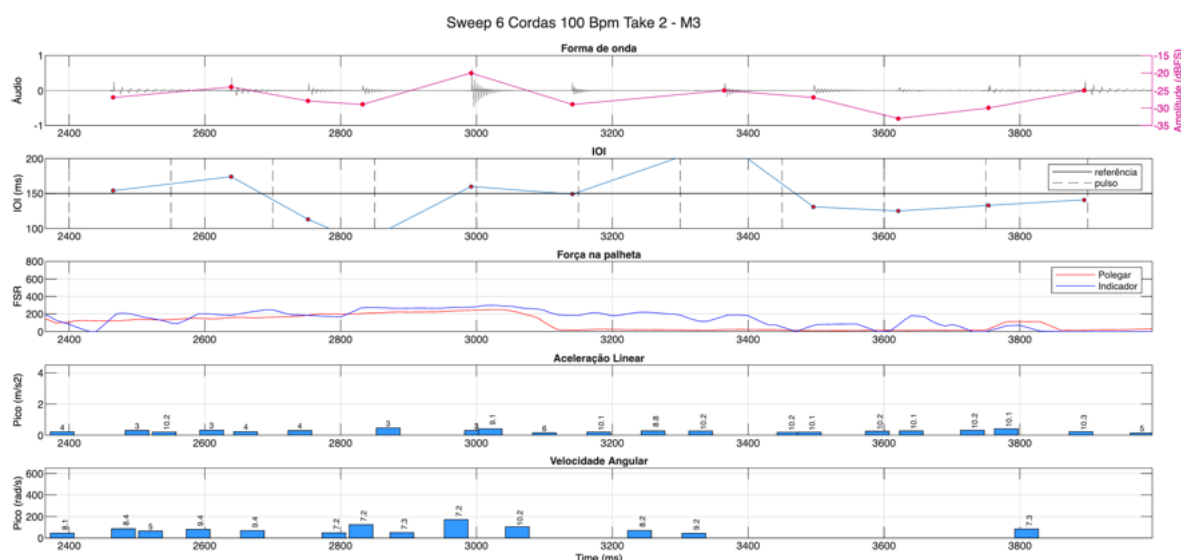


Figura 127: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.

os andamentos, os gestos de translação da mão apresentam predominância do eixo y, enquanto a rotação distribui-se de forma mais equilibrada entre os três eixos. O perfil dinâmico também se mantém relativamente constante. No andamento mais lento (Figura 128 e Figura 129), há boa correspondência dos IOIs com a referência temporal e onsets alinhados ao pulso, além de forças na palheta simétricas entre os dedos, ainda que com a ocorrência de vales pontuais. Já no andamento mais rápido (Figura 130), verifica-se

maior dispersão dos IOIs em relação ao valor de referência e ataques sistematicamente atrasados em relação ao metrônomo.

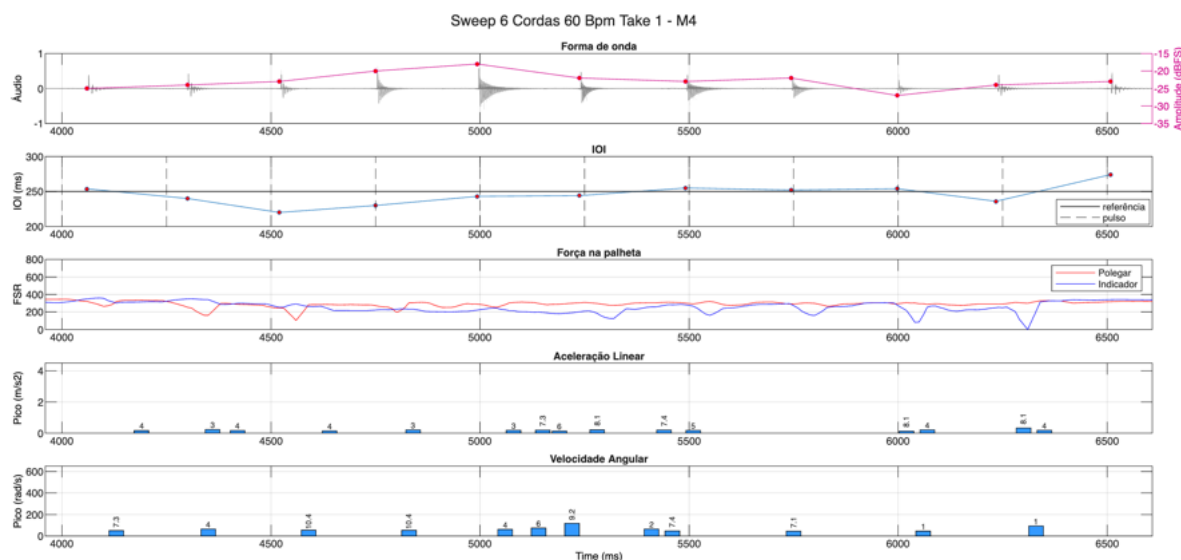


Figura 128: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.

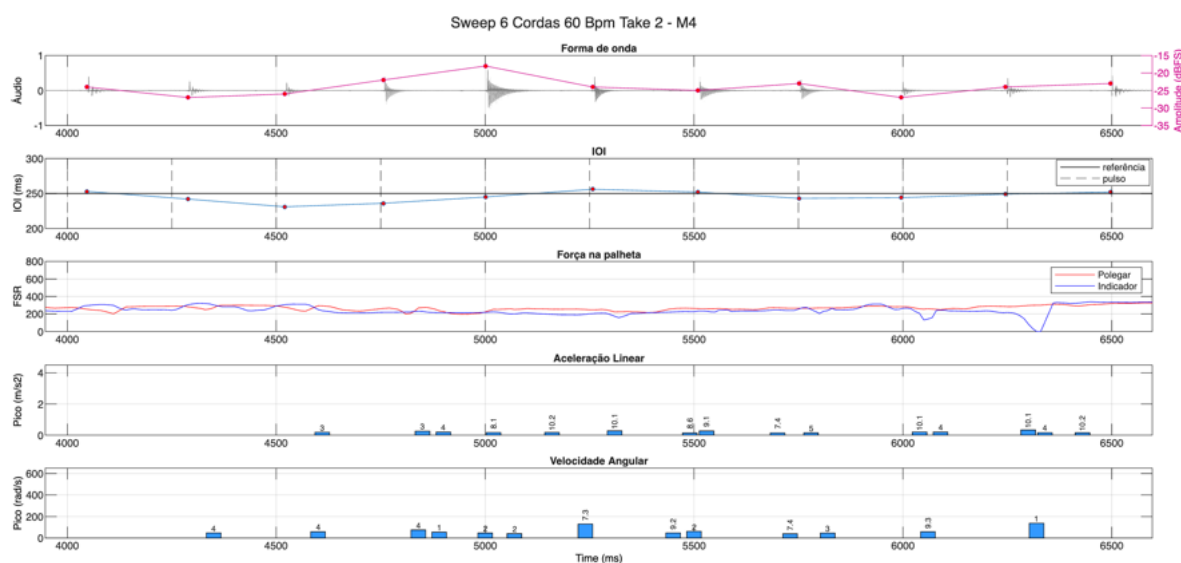


Figura 129: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.

O músico M5 apresenta boa regularidade interna entre os takes de um mesmo andamento. Em 60 bpm (Figura 131), observa-se controle dinâmico estável, com amplitudes relativamente homogêneas ao longo do trecho. Os ataques tendem a ocorrer adiantados em relação ao pulso, enquanto os IOIs permanecem mais concentrados abaixo da referência

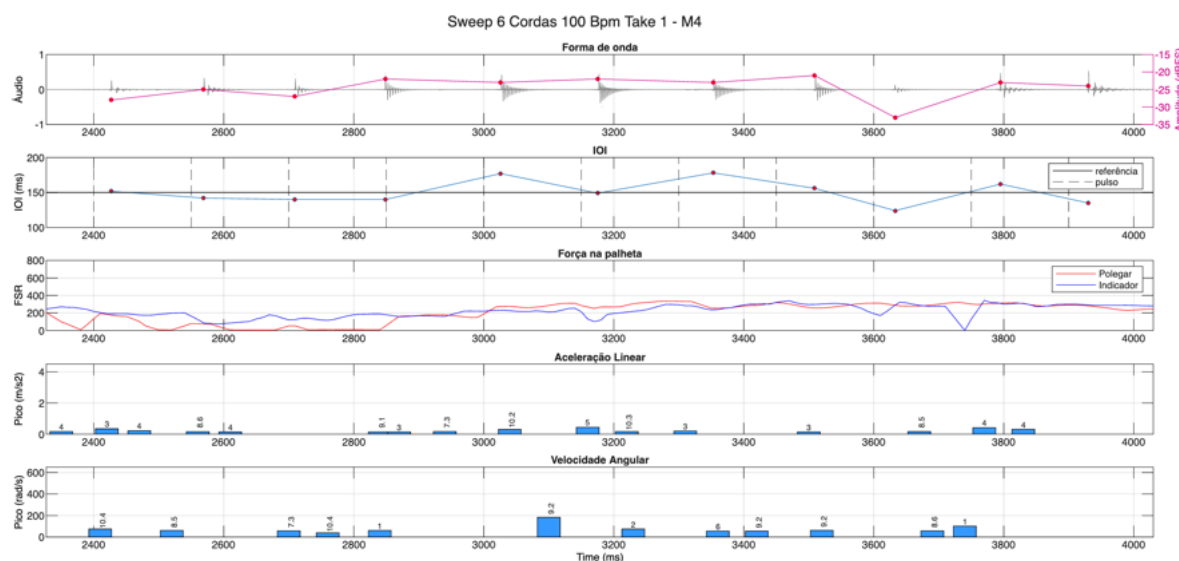


Figura 130: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.

temporal, indicando intervalos ligeiramente comprimidos. No que se refere às forças aplicadas à palheta, nota-se uma distinção entre os dedos conforme a direção do gesto, com picos mais pronunciados do indicador na trajetória ascendente. Nos gestos, os picos de translação distribuem-se entre os eixos, embora com predominância do eixo y, ao passo que, na rotação da mão, o eixo x se destaca como principal componente. No andamento de 100 bpm (Figura 132), o perfil dinâmico torna-se mais variável, acompanhado de IOIs que se dispersam tanto acima quanto abaixo da referência temporal. Os ataques, por sua vez, passam a ocorrer sistematicamente atrasados em relação ao pulso. As forças aplicadas pelos dedos sofrem leve alteração na mudança de direção da palhetada, mas sem picos ou vales particularmente evidentes. Em termos gestuais, as rotações mantêm o mesmo padrão observado em 60 bpm; contudo, a translação da mão revela uma reorganização completa, com inversão da direção dos picos em todos os eixos e predominância do eixo z na execução em maior velocidade.

Iniciaremos a análise comparativa entre todos os músicos a partir do comportamento dos IOIs e da precisão metronômica. A Figura 133 evidencia que, no andamento mais rápido, ocorre maior dispersão dos IOIs, acompanhada de assimetrias pontuais acentuadas, indicando maior instabilidade temporal na execução em 100 bpm. No que se refere à precisão metronômica, apenas o músico M4 em 60 bpm apresenta menor variabilidade e medianas mais próximas entre os takes, ao passo que os demais intérpretes exibem di-

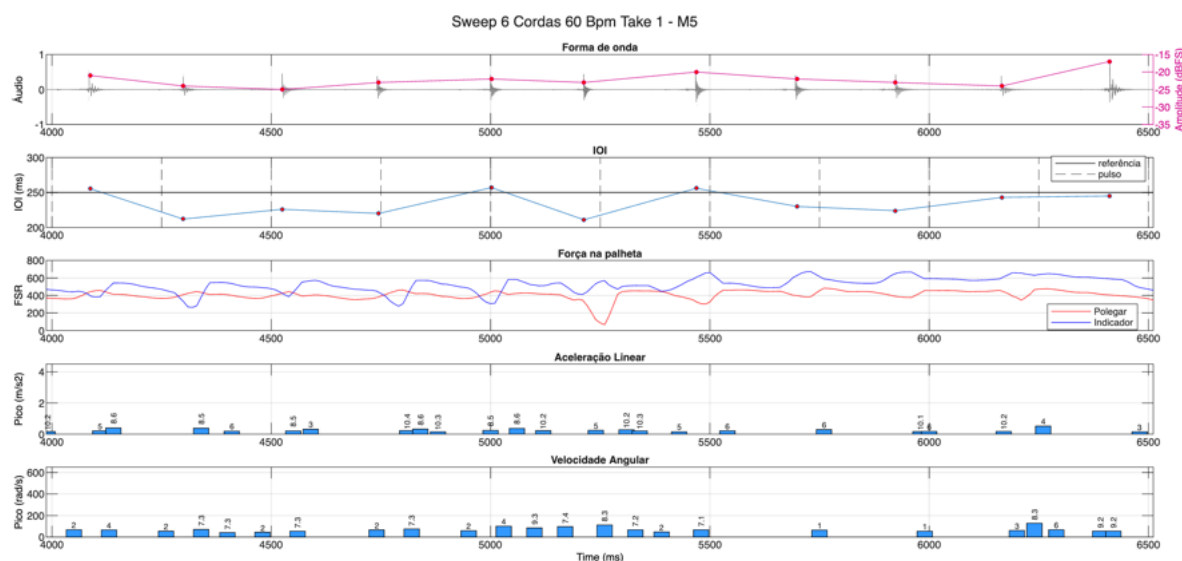


Figura 131: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.

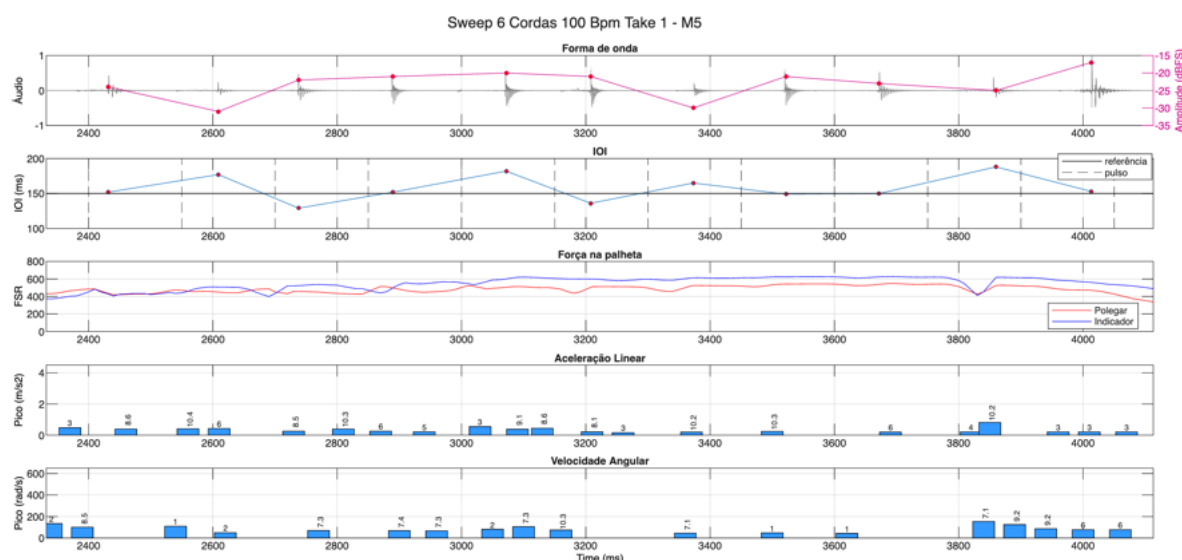


Figura 132: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.

ferenças significativas entre as duas amostras. Em 100 bpm, observa-se uma tendência generalizada ao atraso dos ataques em relação ao pulso, com destaque para M5, que no andamento lento havia demonstrado antecipação sistemática dos onsets em ambos os takes.

O comportamento geral do movimento de translação da mão pode ser observado em Figura 134. As intensidades dos picos de aceleração linear permanecem, de modo

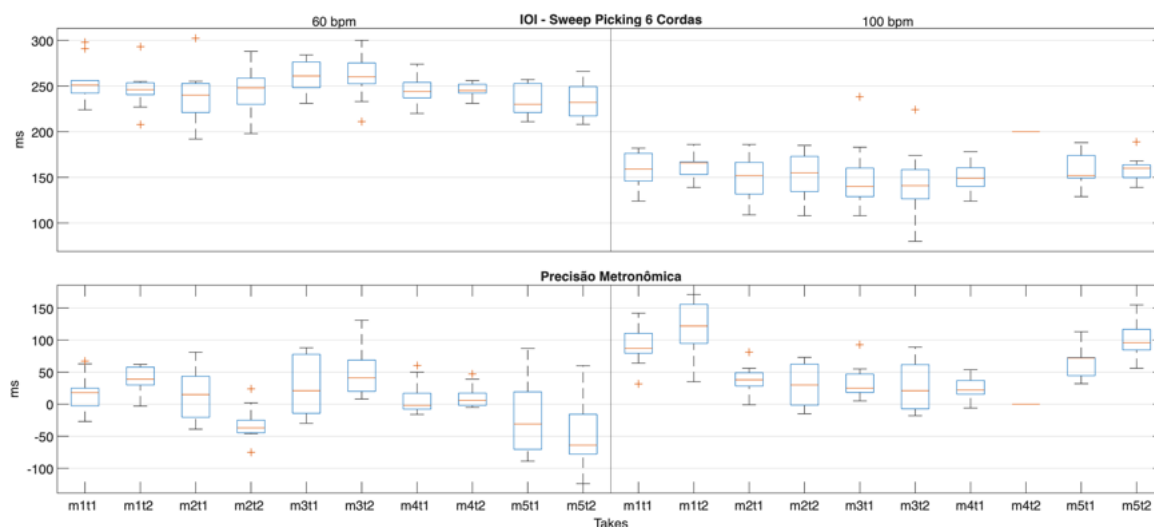


Figura 133: Comparativo dos valores de IOI e a precisão metronômica dos onsets em relação ao pulso entre todos os músicos na técnica de *sweep picking* com seis cordas.

geral, dentro de uma faixa semelhante nos dois andamentos, sem alterações acentuadas entre 60 e 100 bpm. Contudo, no andamento mais rápido verifica-se um aumento da variabilidade, acompanhado pela presença de *outliers* mais distantes da região de dispersão típica, indicando episódios gestuais pontuais de maior intensidade sob maior demanda técnica.

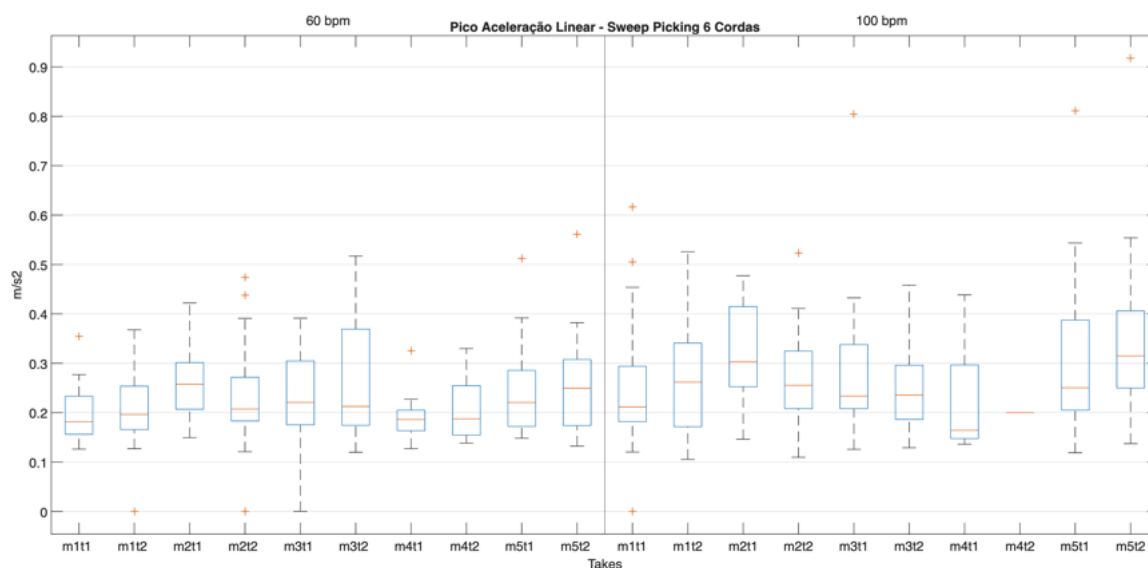


Figura 134: Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de *sweep picking* com seis cordas.

A rotação da mão (Figura 135) apresenta um comportamento semelhante ao observado na translação: os picos de velocidade angular permanecem dentro de uma mesma

faixa de intensidade nos dois andamentos, e a dispersão geral dos valores não mostra relação direta com o aumento da velocidade. A principal exceção é o músico M5, que em 100 bpm evidencia maior variabilidade nas rotações da mão.

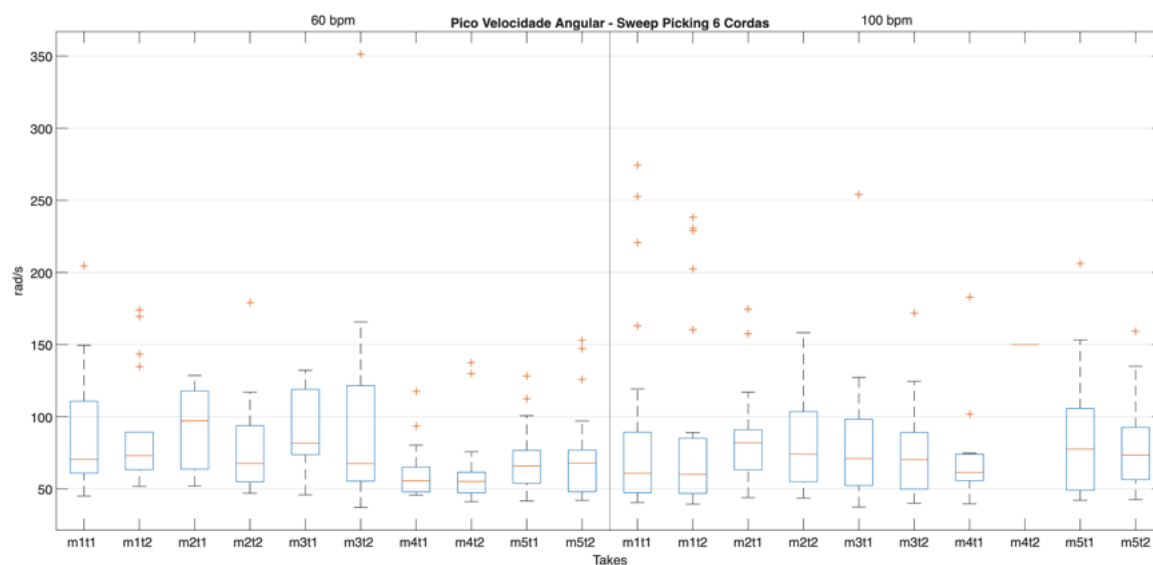


Figura 135: Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de de *sweep picking* com seis cordas.

Como última análise geral, a Figura 136 sintetiza o perfil dinâmico dos músicos na técnica de *sweep picking* com seis cordas. Observa-se que, para M1 e M2, há maior regularidade entre os takes no andamento de 100 bpm em comparação a 60 bpm, sugerindo maior estabilização das dinâmicas sob maior velocidade. De modo geral, as amplitudes tendem a apresentar maior variabilidade em 100 bpm, indicando um controle dinâmico mais desafiador no andamento rápido. Entre os participantes, destaca-se M5, que exibe amplitudes consistentemente mais altas em ambos os andamentos, caracterizando um padrão dinâmico mais intenso em sua execução.

A análise integrada da técnica de *sweep picking* envolvendo as seis cordas evidencia comportamentos diversos entre os músicos, embora algumas regularidades se destaquem. De modo geral, a mudança de andamento não altera profundamente o padrão geral de execução, mas tende a amplificar variações já presentes — sobretudo nos parâmetros temporais e na estabilidade gestual.

O músico M1 apresenta execuções bastante homogêneas entre 60 e 100 bpm, com amplitudes estáveis e gestos consistentes, caracterizados pela predominância do eixo y na translação e do eixo x na rotação da mão. Sua principal sensibilidade ocorre no ponto de

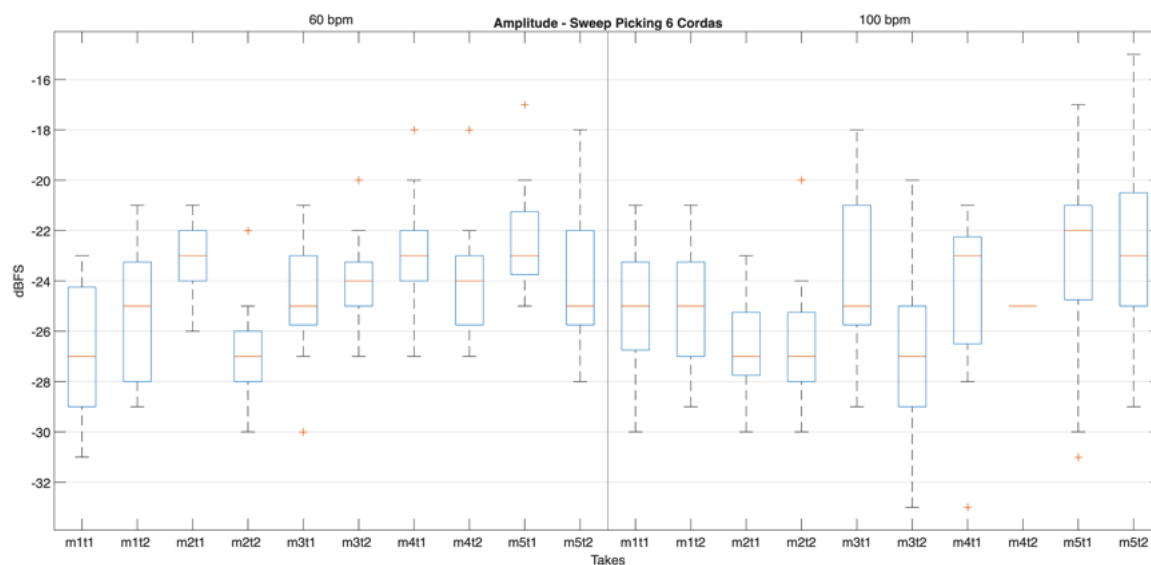


Figura 136: Comparativo das amplitudes entre todos os músicos na técnica de *sweep picking* com seis cordas.

mudança de direção da palhetada, que em 60 bpm gera maior oscilação de IOIs, enquanto em 100 bpm os ataques tornam-se sistematicamente atrasados.

O músico M2 mantém amplitudes pouco variáveis nos dois andamentos, diferindo principalmente na forma como o ponto de inflexão afeta o ritmo: em 60 bpm, essa região exerce impacto mínimo, mas em 100 bpm provoca maior dispersão dos IOIs e atrasos mais evidentes. Gestualmente, predomina o eixo y na translação e o eixo x na rotação, com maior participação do eixo z em velocidades mais altas.

O músico M3 demonstra ser o mais instável gestualmente nos registros, sobretudo a 60 bpm, apresentando estratégias distintas entre os dois takes — tanto na direção dominante das acelerações quanto no comportamento das rotações. Em 100 bpm, emergem grandes variações de amplitude, IOIs dispersos e alternância constante entre atrasos e antecipações, acompanhados de maior envolvimento dos três eixos nas rotações.

O músico M4 mantém gestos relativamente estáveis entre os andamentos, com predominância clara do eixo y na translação e rotações distribuídas entre os três eixos. Em 60 bpm, apresenta boa estabilidade temporal e IOIs próximos da referência; já em 100 bpm, surgem atrasos sistemáticos e maior dispersão temporal, refletindo maior exigência técnica.

O músico M5 exibe forte regularidade interna, com amplitudes mais altas em ambos os andamentos e distinção clara entre as forças aplicadas em cada direção da palhe-

tada. Em 60 bpm tende ao adiantamento dos ataques, ao passo que em 100 bpm passa a atrasá-los. Gestualmente, mantém rotações semelhantes entre os andamentos, mas altera completamente a direção das translações em 100 bpm, passando a utilizar predominantemente o eixo z.

Na análise comparativa entre todos os participantes, observa-se que os IOIs se tornam mais dispersos em 100 bpm, especialmente em pontos de mudança de direção, e que a precisão metronômica tende a se deslocar para atrasos em andamento rápido. No âmbito gestual, tanto as acelerações lineares quanto as velocidades angulares se distribuem em faixas semelhantes para ambos os andamentos, embora mostrem maior variabilidade e ocorrência de *outliers* em 100 bpm. Por fim, o perfil dinâmico revela maior heterogeneidade a velocidades mais altas, com M5 destacando-se por amplitudes consistentemente mais elevadas.

Em conjunto, esses resultados indicam que, embora cada músico adote estratégias próprias para lidar com a complexidade do *sweep picking*, o aumento do andamento tende a intensificar irregularidades temporais e aumentar a variabilidade gestual, ao passo que alguns aspectos — como os perfis de amplitude e as direções dominantes das acelerações e rotações — se mantêm relativamente estáveis entre as velocidades.

#### 4.1.2.3 *Strumming*

A técnica de *strumming* baseia-se na realização de ataques amplos da palheta, que percorre múltiplas cordas em sequência, produzindo efeitos sonoros caracterizados por sustentação coletiva e ênfase rítmica. Diferentemente de técnicas orientadas à articulação nota a nota — como a palhetada alternada ou o *sweep picking* —, o *strumming* privilegia o gesto amplo, no qual o movimento da mão direita atua como uma unidade motora integrada, articulando padrões rítmicos. Nessa técnica, a relação entre movimento, ritmo e dinâmica é central, influenciando diretamente a expressividade do trecho executado.

No contexto deste estudo, o *strumming* apresenta especificidades. Ao contrário do uso tradicional — geralmente contínuo e associado a progressões harmônicas completas —, aqui a técnica é aplicada a trechos curtos e de caráter experimental, com o abafamento das cordas pela mão esquerda. Diante disso, a análise das amplitudes de onsets individuais torna-se pouco confiável: além de os ataques terem sido executados de forma abafada, os

efeitos de *loudness*<sup>16</sup> característicos do strumming — resultantes da sobreposição espectral e da excitação conjunta das cordas — tendem a mascarar diferenças sutis entre eventos isolados. Assim, optamos por não incluir o perfil dinâmico na análise desta técnica, concentrando-se apenas nos parâmetros temporais, de força e gestuais, que oferecem um retrato mais consistente do comportamento performático.

Em síntese, o *strumming* combina amplitude gestual, consistência rítmica e controle dinâmico, configurando uma técnica cujo domínio envolve tanto aspectos expressivos quanto gestuais. A seguir, examinaremos o comportamento dos músicos frente a esses desafios específicos, buscando compreender como se articulam os elementos sonoros e gestuais na execução desta técnica em dois andamentos distintos.

O músico M1 apresenta um comportamento altamente consistente entre todos os takes, independentemente do andamento. A execução em 60 bpm é ilustrada na Figura 137, enquanto a realização em 100 bpm aparece na Figura 138. Em ambos os registros, observa-se uma separação clara entre os planos grave e agudo: a corda 6 é utilizada sistematicamente para marcar o tempo forte, ao passo que os demais ataques recorrem apenas às cordas agudas (1 a 3). Temporalmente, os onsets ocorrem após os pulsos, configurando uma tendência ao atraso metronômico. No que se refere às forças aplicadas à palheta, nota-se a presença de vales acentuados no dedo indicador, compondo um perfil que sugere uma oscilação cíclica ao longo do gesto. Do ponto de vista gestual, as translações da mão priorizam o eixo y com contribuição de z, e as rotações apresentam protagonismo do eixo z, com parcelas de x e y negativos. Tanto as acelerações lineares quanto as velocidades angulares exibem picos em momentos sem produção sonora, indicando que o performer mantém a mão em movimento contínuo para preservar a fluidez e regularidade do ciclo gestual.

O músico M2 apresenta distinções marcantes de ritmo entre os andamentos. Em 60 bpm (Figura 139), os ataques tendem a se antecipar ao pulso, enquanto em 100 bpm (Figura 140) observa-se o padrão oposto, com atrasos sistemáticos em relação ao metrônomo. A divisão entre planos graves e agudos também é evidente para esse performer. As forças aplicadas pelos dedos na palheta mostram-se relativamente sincronizadas, concentrando-se em uma faixa central de intensidades. No domínio gestual, verificam-se padrões semelhantes entre os dois andamentos: na aceleração linear, predomina o eixo y, acompanhado do

---

<sup>16</sup>*Loudness* é a percepção subjetiva de intensidade do som, dependente do nível de pressão sonora, do espectro e da duração do estímulo (ZWICKER; FASTL, 1999).

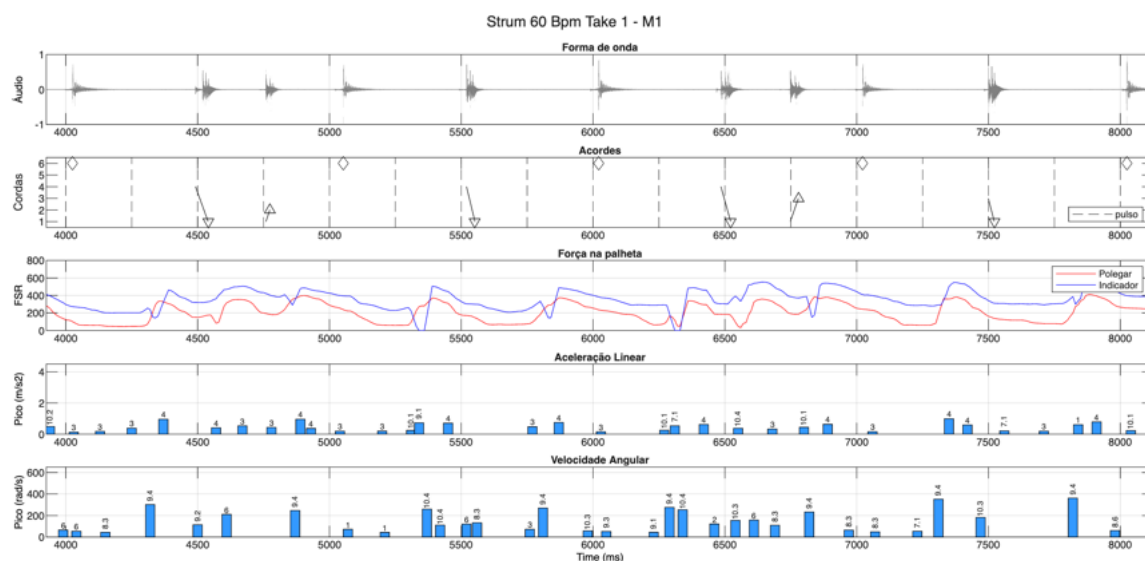


Figura 137: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.

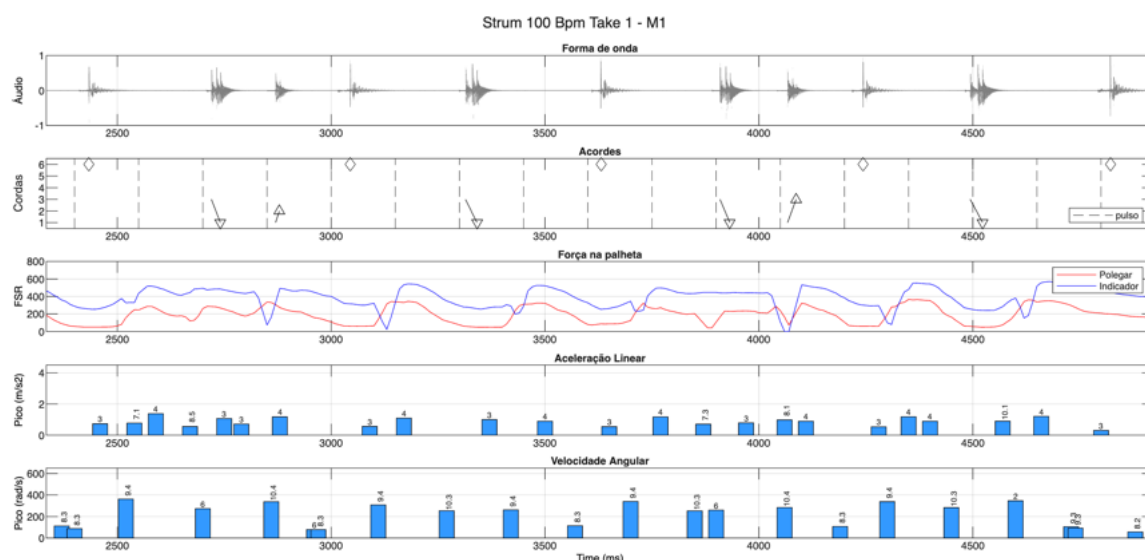


Figura 138: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.

eixo z; já na velocidade angular, a distribuição entre os três eixos é mais equilibrada, embora com leve predominância do eixo x. É importante destacar a intensidade da rotação da mão, que mostra picos bem elevados, assim como a presença de picos em momentos sem onsets. Esses resultados sugerem que, apesar das diferenças temporais entre os andamentos, a estratégia gestual de M2 permanece estruturalmente estável.

O músico M3 não apresenta distinção entre cordas graves e agudas em nenhum dos andamentos analisados (Figura 141 e Figura 142), mantendo um atraso constante dos

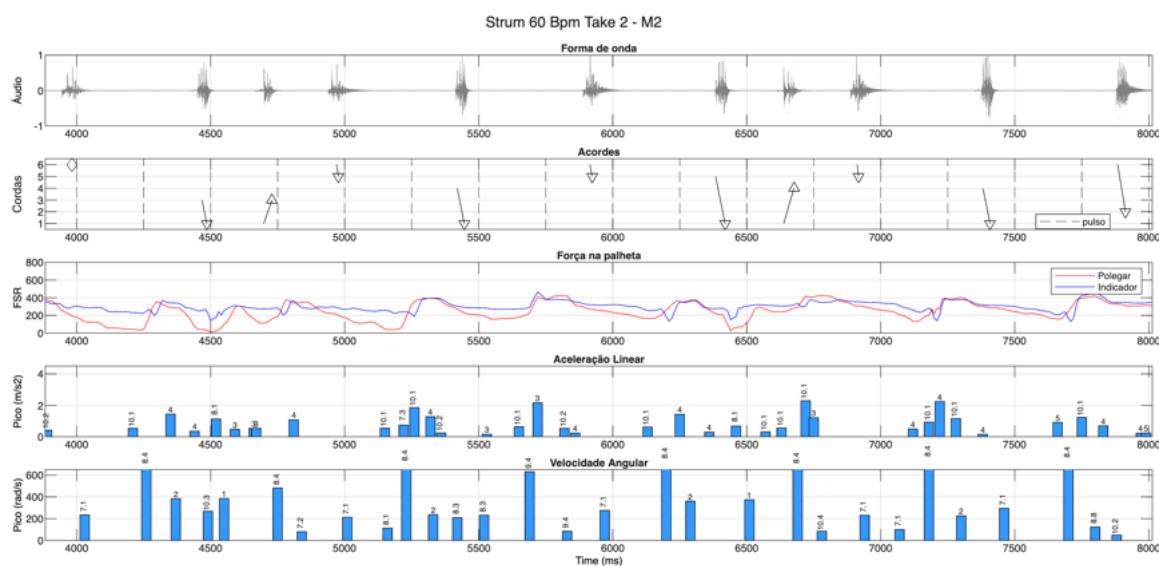


Figura 139: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 2 por M2.

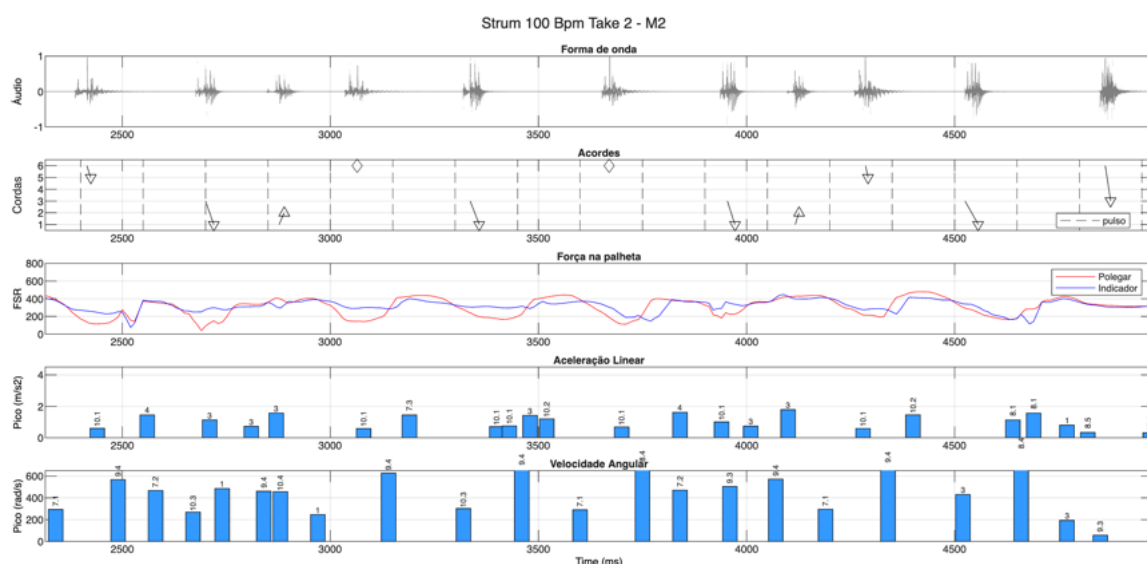


Figura 140: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.

ataques em relação ao pulso. As forças aplicadas à palheta situam-se em níveis baixos, com picos mais pronunciados no polegar no andamento mais lento. Do ponto de vista gestual, a mudança de andamento não produz interferências relevantes: observa-se predominância dos eixos y e z positivos na aceleração linear, e dos eixos x e y positivos, com z negativo, na velocidade angular. Em ambos os andamentos o eixo y se destaca como componente dominante, acompanhado de rotações da mão de alta intensidade e ocorrência de picos gestuais em momentos sem ataque às cordas.

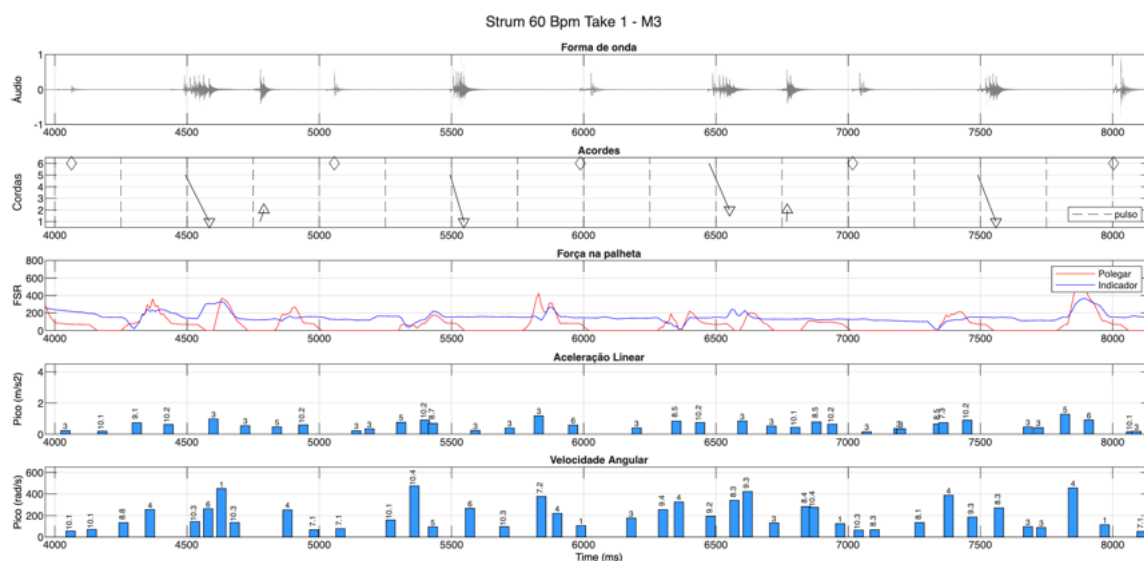


Figura 141: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 1 por M3.

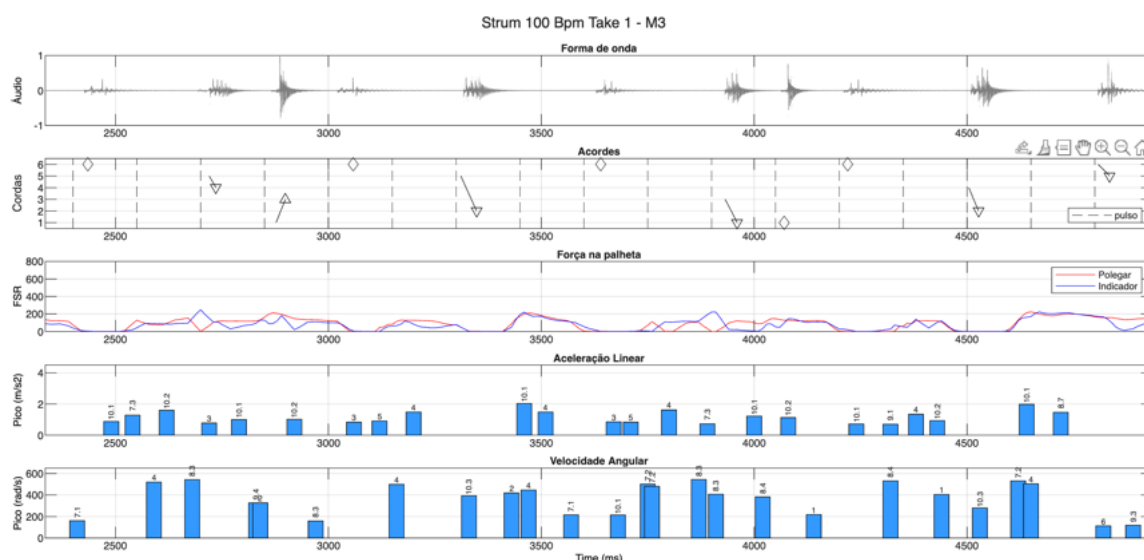


Figura 142: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.

O músico M4 apresenta uma estratégia gestual contrastante entre os dois andamentos. Em 60 bpm (Figura 143), observa-se predominância do eixo y e negativo na translação da mão, enquanto em 100 bpm esse componente praticamente desaparece — característica única entre os participantes no que se refere à aceleração linear. Por outro lado, o padrão de rotação da mão permanece semelhante nos dois andamentos, com predominância do eixo y, especialmente no andamento rápido. No âmbito sonoro, percebe-se o uso de poucos grupos de cordas por ataque (uma ou duas cordas), com uma separação clara entre planos

grave e agudo. Temporalmente, os ataques alinham-se ao pulso em 60 bpm, mas passam a ocorrer atrasados no andamento de 100 bpm. As forças na palheta apresentam medidas baixas.

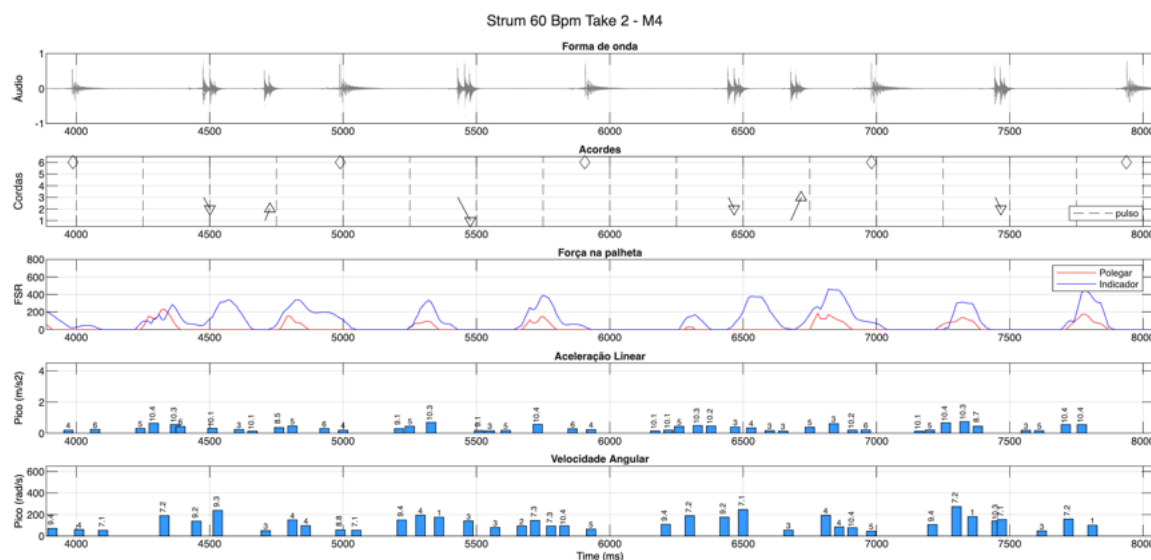


Figura 143: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.

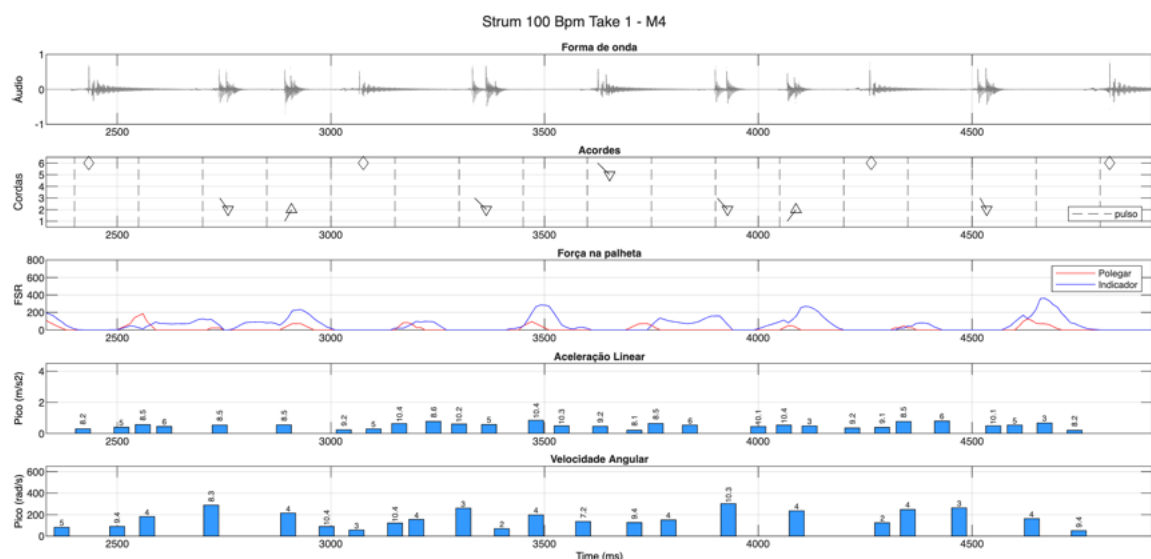


Figura 144: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.

O músico M5 utiliza praticamente todas as cordas em cada ataque, independentemente do andamento (Figura 145 e Figura 146), o que indica ausência de separação entre planos graves e agudos. As forças aplicadas à palheta apresentam comportamento

sincronizado entre os dedos, embora com variações mais amplas no andamento rápido. Gestualmente, observam-se velocidades angulares elevadas, com destaque para o aumento da aceleração linear em 100 bpm em comparação ao andamento mais lento. A composição dos eixos envolvidos nos movimentos de translação e rotação permanece praticamente inalterada entre os dois andamentos, sugerindo estabilidade da estratégia gestual adotada pelo performer.

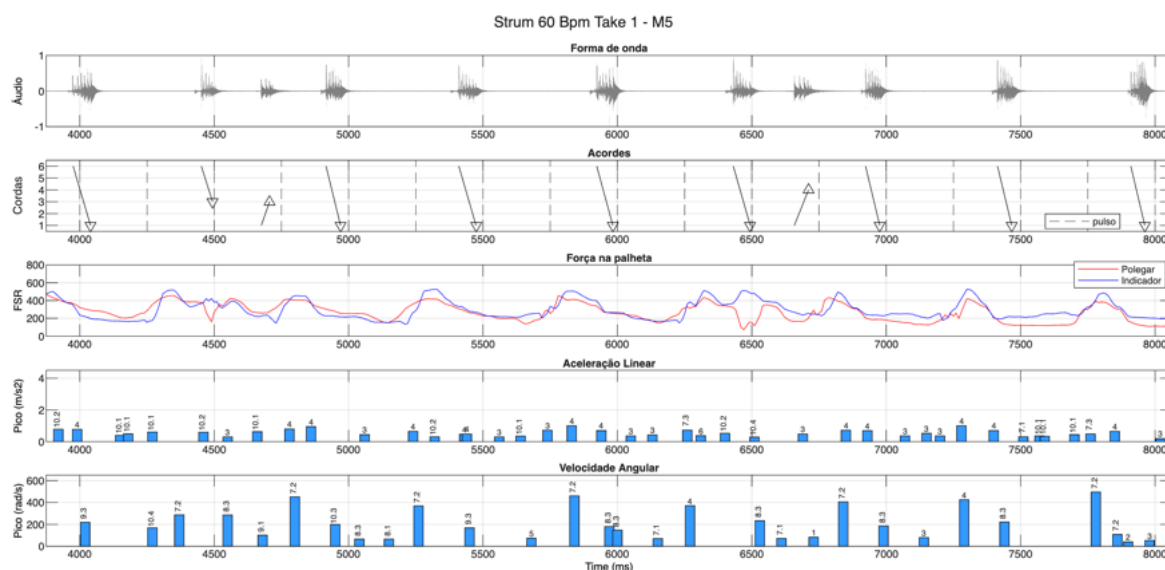


Figura 145: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 1 por M5.

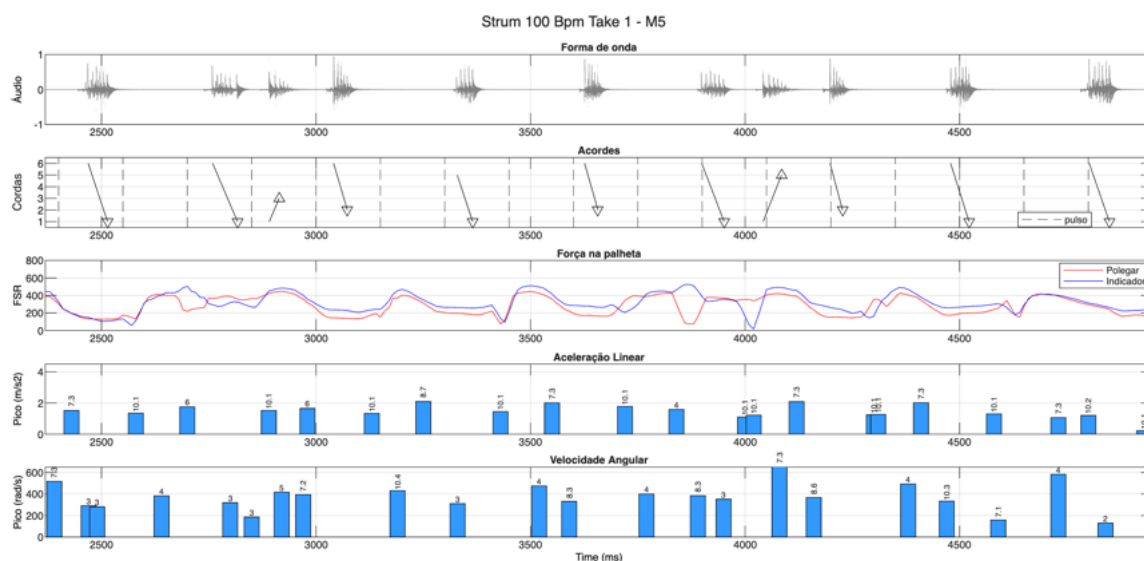


Figura 146: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 1 por M5.

Diferentemente das demais técnicas examinadas no Experimento 1, a análise global da técnica de *strumming* não contempla os dados de amplitude — conforme justificado anteriormente — nem os parâmetros rítmicos. Nesse caso, o foco recai exclusivamente sobre os aspectos gestuais da execução, permitindo observar como cada performer organiza e articula os movimentos da mão direita ao longo da técnica.

A Figura 147 apresenta o comportamento integrado das acelerações lineares de todos os músicos. De modo geral, observa-se um incremento das intensidades com o aumento do andamento, indicando maior demanda gestual em 100 bpm. Destacam-se dois casos específicos: M2, que em 60 bpm apresenta variabilidade consideravelmente maior que os demais participantes, e M5, cuja dispersão, inicialmente mais concentrada no andamento lento, torna-se amplamente distribuída em 100 bpm, evidenciando um aumento expressivo da instabilidade gestual na velocidade mais alta.

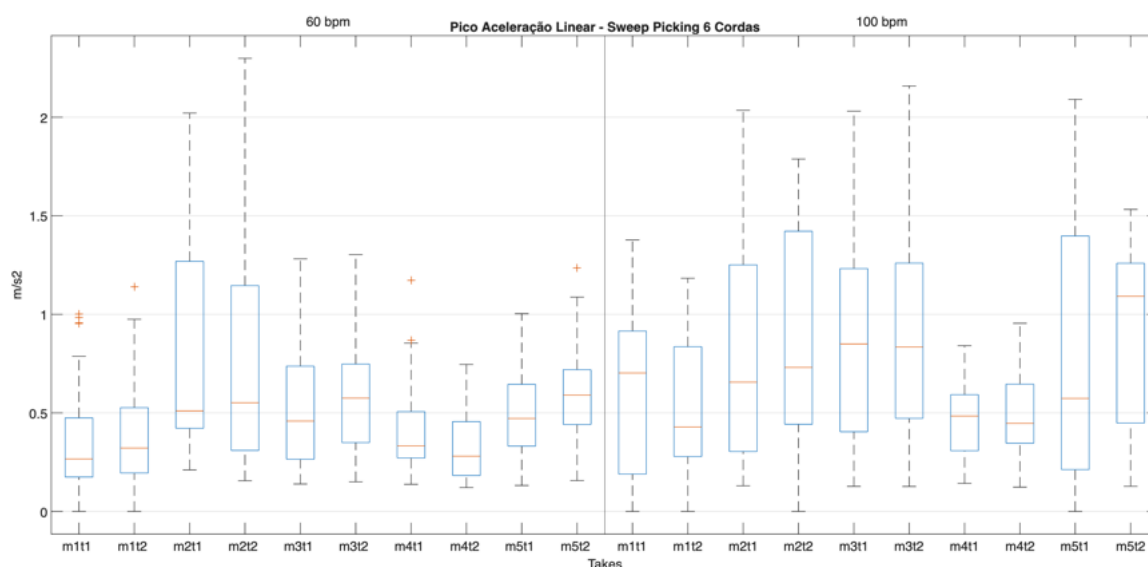


Figura 147: Comparativo entre valores de pico de aceleração linear entre todos os músicos na técnica de *strumming*.

A mudança de andamento afeta de maneira diferenciada os músicos no comportamento das velocidades angulares (Figura 148). Enquanto M1, M4 e M5 exibem alterações mais discretas entre 60 e 100 bpm, os músicos M2 e M3 apresentam contrastes marcantes entre os dois andamentos: em 60 bpm, ambos registram valores mais baixos e variabilidade concentrada — especialmente no caso de M3 —, ao passo que, em 100 bpm, observa-se um aumento expressivo nas intensidades dos picos de rotação. Destaca-se M2, cuja dispersão se amplia substancialmente no andamento mais rápido, indicando maior

instabilidade gestual sob maior demanda temporal.

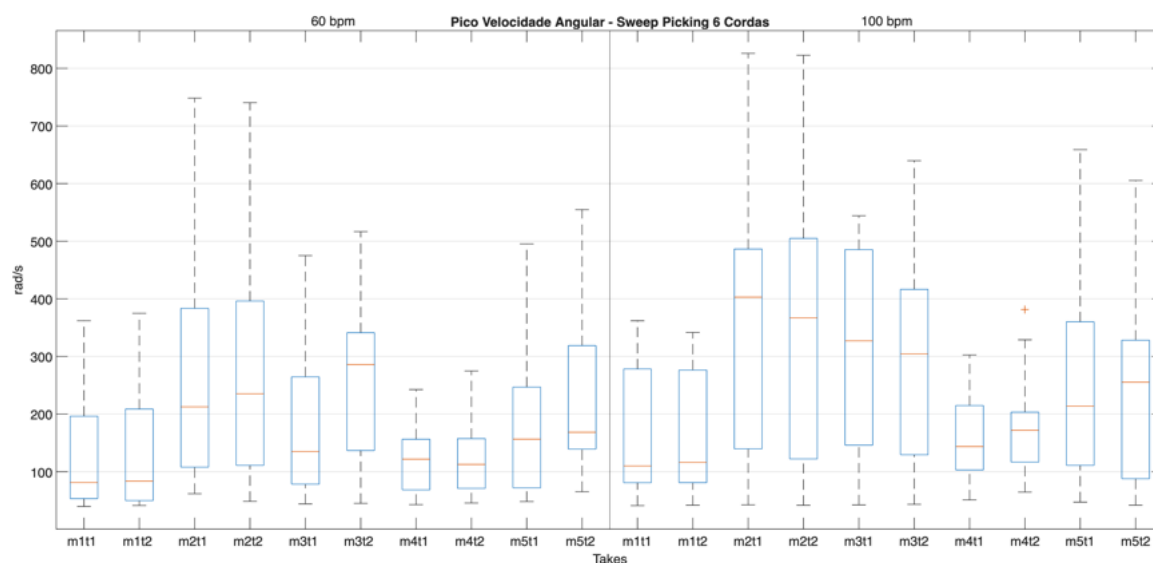


Figura 148: Comparativo entre valores de pico de velocidade angular entre todos os músicos na técnica de *strumming*.

A análise da técnica de *strumming* evidencia que, embora os cinco músicos apresentem estratégias gestuais particulares, emergem entre eles padrões comuns que ajudam a caracterizar o comportamento típico dessa técnica contínua e cíclica. A ausência de análise dinâmica e rítmica nesta seção — justificada pela natureza abafada dos ataques e pelos efeitos de loudness inerentes ao gesto — permite concentrar a interpretação nos modos como cada performer organiza o movimento da mão direita, especialmente no uso dos eixos de aceleração e rotação, na distribuição das cordas acionadas e nas forças aplicadas à palheta.

O músico M1 demonstra uma execução altamente regular e consistente entre os dois andamentos, caracterizada por clara separação entre planos grave e agudo e manutenção de um ciclo gestual contínuo, evidenciado por picos de aceleração e rotação mesmo em momentos sem ataque. M2, por sua vez, diferencia-se não pela estrutura gestual — que permanece bastante estável nos dois andamentos —, mas pelo comportamento temporal observado individualmente: embora não seja foco desta síntese, essa relação reforça a independência relativa entre gesto e tempo na sua execução. Gestualmente, é marcado por rotações intensas e uso predominante do eixo *y* na translação, além de picos gestuais fora dos ataques, característica compartilhada com M1.

M3 apresenta uma abordagem distinta ao não separar planos graves e agudos e ao

manter um gesto mais concentrado e de força reduzida, mas ainda assim com rotações intensas e sem impacto expressivo do andamento na estrutura dos eixos de movimento. Já M4 revela uma das estratégias mais contrastantes entre andamentos: em 60 bpm utiliza fortemente o eixo y negativo na translação, enquanto em 100 bpm esse componente praticamente desaparece — um padrão exclusivo entre os músicos. Ainda assim, a organização rotacional permanece estável, com protagonismo do eixo y. No âmbito sonoro, recorre majoritariamente a pequenos grupos de cordas, com clara distinção entre planos.

M5 representa o outro extremo da técnica, utilizando quase sempre todas as cordas em cada ataque, com forças sincronizadas e maiores variações no andamento rápido. Gestualmente, caracteriza-se por altas velocidades angulares e crescimento expressivo da aceleração linear em 100 bpm, embora sem alterações relevantes na composição dos eixos, demonstrando estabilidade estratégica mesmo sob maior demanda temporal.

Na análise integrada dos dados gestuais, observa-se que o aumento do andamento intensifica, em maior ou menor grau, as exigências sobre o gesto de todos os participantes. Nas acelerações lineares, o grupo tende a ampliar as intensidades em 100 bpm, com casos específicos de maior instabilidade, como M2 em 60 bpm e M5 no andamento rápido. Quanto às velocidades angulares, a mudança de andamento produz efeitos diferenciados: enquanto M1, M4 e M5 exibem variações discretas, M2 e M3 apresentam contrastes marcantes, com aumentos notáveis de intensidade e dispersão em 100 bpm — especialmente M2, que mostra ampla variabilidade gestual sob maior velocidade.

Em conjunto, os resultados sugerem que, embora os músicos adotem soluções gestuais diversas para lidar com a técnica de *strumming*, o grupo tende a convergir quanto ao aumento da demanda gestual em velocidades mais altas, especialmente na intensidade das rotações. Ao mesmo tempo, preservam-se particularidades claras entre performers, revelando que a técnica, apesar de seu caráter cíclico e contínuo, oferece espaço para estratégias altamente individualizadas.

## 4.2 Discussão

A análise dos resultados referentes à palhetada alternada revela um conjunto de padrões que se distribuem entre características individuais dos participantes e especificidades intrínsecas à técnica. Em termos de organização temporal, observam-se trechos em que os IOIs se aproximam da referência e outros em que valores afastados indicam

momentos de maior instabilidade ou reorientação do gesto, sobretudo em regiões agudas do instrumento. Os dados de força na palheta corroboram essa hipótese, sugerindo que o músico modula a pressão dos dedos para manter a fluidez da alternância entre ataques ascendentes e descendentes. Paralelamente, os dados gestuais mostram participação mais focalizada de eixos específicos da translação, indicando que a alternada tende a mobilizar um gesto mais compacto e eficiente em andamentos elevados.

A técnica de *sweep picking* apresenta características distintas por se tratar de um gesto que, embora produza uma sucessão de ataques sonoros, é executado como um movimento contínuo. Essa particularidade se expressa tanto nos dados temporais quanto nos gestuais. Diferentemente da alternada, em que cada ataque exige reposicionamento da palheta, o *sweep* implica um movimento unidirecional suave, no qual irregularidades nos IOIs podem estar mais associadas às transições entre cordas do que à intenção de controle temporal sobre cada ataque individual. Assim, eventuais dispersões temporais não necessariamente representam imprecisão, mas sim propriedades do gesto contínuo. Os dados de força tendem a indicar pressões ligeiramente menores do que nas outras técnicas, em razão de o *sweep* demandar relaxamento controlado para que o movimento se mantenha fluido. No âmbito gestual, a continuidade do movimento aparece em curvas mais suaves de aceleração e velocidade angular, com picos mais baixos e reorganização gradual entre cordas. Esse perfil gestual reforça a interpretação da técnica como uma trajetória única, cuja principal exigência é a coordenação fluida do deslocamento, mais do que a precisão isolada de cada ataque.

Já a técnica de *strumming* evidencia um conjunto distinto de comportamentos, resultantes do gesto amplo característico e do envolvimento simultâneo de diversas cordas. Os dados temporais mostram tendências claras de antecipação ou atraso do pulso, que se mantêm de forma relativamente consistente entre andamentos. Essa estabilidade sugere que tais tendências fazem parte da assinatura temporal individual de cada participante e não apenas de ajustes momentâneos. Em 60 bpm, alguns músicos exibem ataques levemente antecipados, enquanto em 100 bpm observa-se, em certos casos, predominância de atrasos, comportamento possivelmente associado à inércia do arco do movimento e à reorganização necessária para manter o gesto amplo em velocidades maiores. Nos sensores FSR, observa-se uma relação estreita entre pressão no polegar e no indicador, muitas vezes sincronizadas e ocupando faixas médias de intensidade, com variações sistemáticas entre

ataques ascendentes e descendentes. Os dados gestuais exibem maior participação combinada dos eixos, refletindo a complexidade espacial do movimento, ainda que mantenham certa regularidade de padrões entre andamentos.

Do ponto de vista comparativo, as três técnicas apresentam diferenças substanciais tanto nos indicadores sonoros quanto nos gestuais e de força, sugerindo que cada uma mobiliza um conjunto específico de estratégias motoras e de produção sonora. Em termos temporais, a palhetada alternada apresenta maior sensibilidade ao contexto local das cordas e aos ajustes finos da mão, resultando em flutuações pontuais que refletem diretamente a precisão do ataque individual. O *sweep picking*, ao contrário, manifesta irregularidades temporais que se relacionam mais com a estrutura contínua do gesto do que com precisão rítmica propriamente dita, o que reforça sua natureza híbrida entre gesto único e sucessão sonora. O *strumming*, por sua vez, apresenta uma temporalidade marcada por tendências individuais de antecipação ou atraso, moduladas pelo gesto largo e pelos desafios mecânicos impostos pelo movimento de grande arco.

A comparação gestual evidencia que a alternada privilegia gestos compactos e focados; o sweep se caracteriza por continuidade e suavidade, com menor variação de força e picos de aceleração mais homogêneos; e o strumming utiliza maior combinação de eixos, refletindo um gesto espacialmente amplo. No âmbito da força, a alternada e o strumming apresentam variações relacionadas ao impacto bidirecional da palheta, enquanto o sweep tende a operar com pressões mais estáveis e baixas, coerentes com a fluidez desejada. Em síntese, a integração dos dados multimodais demonstra que essas três técnicas, embora compartilhem o uso da palheta como mediadora entre gesto e som, configuram-se como fenômenos motores e sonoros profundamente distintos. As regularidades e variabilidades observadas revelam não apenas as propriedades técnicas de cada abordagem, mas também padrões individuais de execução que se mantêm entre andamentos e condições, reforçando a importância de compreender a palhetada como um fenômeno multidimensional, no qual gesto, força e temporalidade se articulam de maneiras específicas e não intercambiáveis entre técnicas.

Os resultados gerais deste primeiro experimento parecem corroborar o senso comum, ao associar uma maior dificuldade técnica (seja por quantidade ou momento de trocas de corda ou por andamento) com imprecisão rítmica, uma constante para todos os músicos. Por outro lado, eles apontam também para uma falta de padronização gestual,

devido à formação auto-didata ou, pelo menos, a um estudo não sistematizado da técnica de palhetada em suas diferentes nuances.

Chama a atenção a variedade de forças no uso da palheta, tópico pouco abordado na literatura e em ambientes mais informais de ensino. Embora suas implicações sobre a precisão não estejam claras (e nem fazem parte do escopo desta pesquisa), é um fator a ser considerado de forma mais consciente pelos músicos.

Não conseguimos observar uma relação direta entre a intensidade dos gestos, a força na palheta e o nível sonoro produzido. Apenas no caso de M5 nota-se a relação entre uma palheta segura sempre com bastante força e dinâmica alta. Embora essas medidas sejam importantes, elas não detalham o tipo de contato (ângulo e profundidade) entre a palheta e a corda, que acreditamos ser um fator primordial na intensidade e qualidade do som.

Na palhetada alternada, pode-se observar comportamentos gestuais distintos em relação aos andamentos. A maioria dos músicos mantém a translação no eixo y, embora um deles a utilize pouco, devido ao posicionamento da mão e do pulso. Quanto à rotação, alguns músicos mantém a predominância do eixo x nos dois andamentos, enquanto outros trazem mais contribuições do eixo z nas amostras mais rápidas. O segundo experimento, discutido a seguir, teve a intenção de analisar uma transição contínua entre ataques mais lentos e mais rápidos, além de verificar a estabilidade de padrões gestuais e rítmicos em notas repetidas tocadas o mais rapidamente possível.

## 5 SEGUNDO EXPERIMENTO

O segundo experimento deste estudo tem como foco a análise da técnica de tremolo. Diferentemente das três técnicas investigadas no Experimento 1 — que envolviam execuções em múltiplas cordas —, o tremolo é aqui executado em uma única corda, o que elimina a necessidade de ajustes de posição e deslocamento da mão direita entre cordas. Essa configuração reduz a complexidade espacial da execução, permitindo observar com maior precisão os gestos e forças aplicadas em um contexto motor mais restrito, porém que demanda elevado controle local e regularidade temporal.

Foram consideradas duas situações distintas de aplicação da técnica: tremolo direto, iniciado no limite máximo de velocidade do músico; tremolo com aceleração progressiva até o ponto máximo. Essas duas condições foram concebidas para identificar características individuais de execução e verificar possíveis convergências entre os intérpretes. No tremolo direto, o objetivo foi observar o regime máximo de velocidade atingido e a regularidade mantida ao longo do trecho. Já no tremolo progressivo, buscou-se detectar intervalos de transição entre estratégias motoras decorrentes do aumento gradual da velocidade.

O experimento foi realizado em duas cordas distintas, a fim de avaliar a influência da posição e do material das cordas selecionadas sobre a execução:

- corda 1: localizada na parte inferior do braço do instrumento, de nylon, com o menor diâmetro e sem corda adjacente inferior;
- corda 4: situada na região intermediária, com revestimento metálico, diâmetro médio e cordas vizinhas em ambos os lados.

Optou-se, neste experimento, pelo uso de notas sustentadas, em vez de ataques em cordas abafadas, como realizado nas etapas anteriores. Essa escolha se justifica pelo fato de que, na técnica de tremolo, a tensão da corda exerce papel determinante tanto no desempenho técnico quanto no resultado sonoro da execução. Além disso, o uso de notas plenas possibilita uma análise mais aprofundada do timbre, especialmente por meio da observação do centroide espectral. Para padronizar as execuções, definiu-se a fixação da mão esquerda na sétima casa do instrumento, correspondendo à nota Si (B) na corda 1 e à nota Lá (A) na corda 4.

O protocolo de execução adotado para padronizar os takes foi o seguinte: com o metrônomo ajustado a 60 bpm, o músico aguardava um compasso de quatro tempos antes de iniciar a execução. Após o início, o metrônomo era silenciado por 6 tempos, retornando apenas nos dois tempos finais para indicar o encerramento na batida treze. Assim, cada registro contém dois compassos de execução efetiva precedidos por um compasso preparatório. O mesmo procedimento foi aplicado tanto ao tremolo direto quanto ao tremolo progressivo.

Participaram deste experimento os mesmos músicos do Experimento 1, com exceção do Músico 5, com viagem agendada nas datas da coleta. Para manter o número de participantes, foi incluído um novo intérprete, M6, guitarrista autodidata com experiência em música popular, formado em Licenciatura em Música pelo Instituto Metodista Izabela Hendrix e mestre em Música pela UFMG. Em relação à utilização do metrônomo, faz o seu uso apenas para gravações. A Figura 149 ilustra sua pegada da palheta, destacando o apoio do dedo anelar no tampo do violão, os demais dedos abertos, a inclinação da palheta em relação à corda e a região de ataque levemente deslocada para o lado do cavalete.



Figura 149: Pegada da palheta do Músico 6.

Foram realizados um total de 40 amostras<sup>17</sup>, com 8 registros por músico distribuídos da seguinte forma:

- 2 takes de tremolo direto na corda 1;
- 2 takes de tremolo direto na corda 4;

<sup>17</sup>Todos os takes, com marcação nos comentários, podem ser observados em <https://www.youtube.com/watch?v=l8q7pIJsUw8>

- 2 takes de tremolo progressivo na corda 1;
- 2 takes de tremolo progressivo na corda 4.

Nas seções seguintes serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nesse experimento.

## 5.1 Resultados

Seguindo o modelo de exposição e análise adotado no experimento anterior, iniciamos a apresentação dos resultados com um panorama geral dos dados gestuais referentes a todos os takes de tremolo, observados de forma integrada. Essa abordagem inicial tem como objetivo identificar padrões, semelhanças e diferenças nos movimentos da mão direita entre os músicos participantes.

Em seguida, procedemos à análise detalhada de cada condição experimental, integrando as informações extraídas da forma de onda (amplitudes), dos IOIs, das medições de força na palheta, dos picos de aceleração linear e da velocidade angular.

Por fim, apresentamos as estatísticas gerais organizadas por variável de interesse — IOI, amplitude, força no polegar, força no indicador, centroide espectral, pico de aceleração linear e pico de velocidade angular —, sintetizando os resultados de cada situação experimental.

### 5.1.1 Análise Gestual Global

A Figura 150 nos mostra a dimensão da variação dos ângulos de Euler na execução da técnica de tremolo. No geral todos os músicos demonstram uma predominância de variações maiores em *roll* (rotação em torno do eixo x), com exceção de M2 na corda 1, que tem mais variação de *yaw* (rotação em torno do eixo z) e *pitch* (rotação em torno do eixo y). Esse músico utiliza um posicionamento diferente da mão para tocar em cada corda, fato que não é observado nos demais participantes, além de apresentar os maiores valores de variação.

Em relação à média dos valores positivos e negativos da aceleração linear, a variação no eixo y é maior em todos os músicos, com o tremolo direto apresentando valores maiores. Pode-se observar que M4 mantém variações parecidas independentes da situação, e que M6 apresenta pequena assimetria entre os valores positivos e negativos (Figura 151).

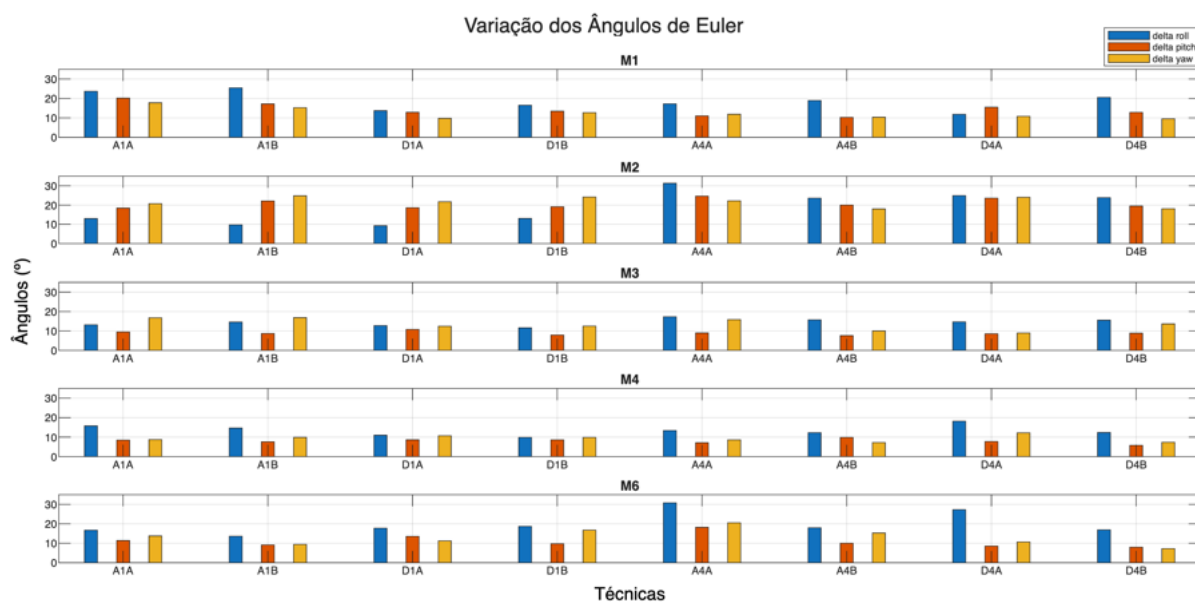


Figura 150: Valor de variação dos ângulos de Euler por eixo, de todos os músicos na técnica de tremolo.

Destacamos ainda M3, que tem valores baixos de aceleração linear, independente do eixo, ao tocar na corda 4.

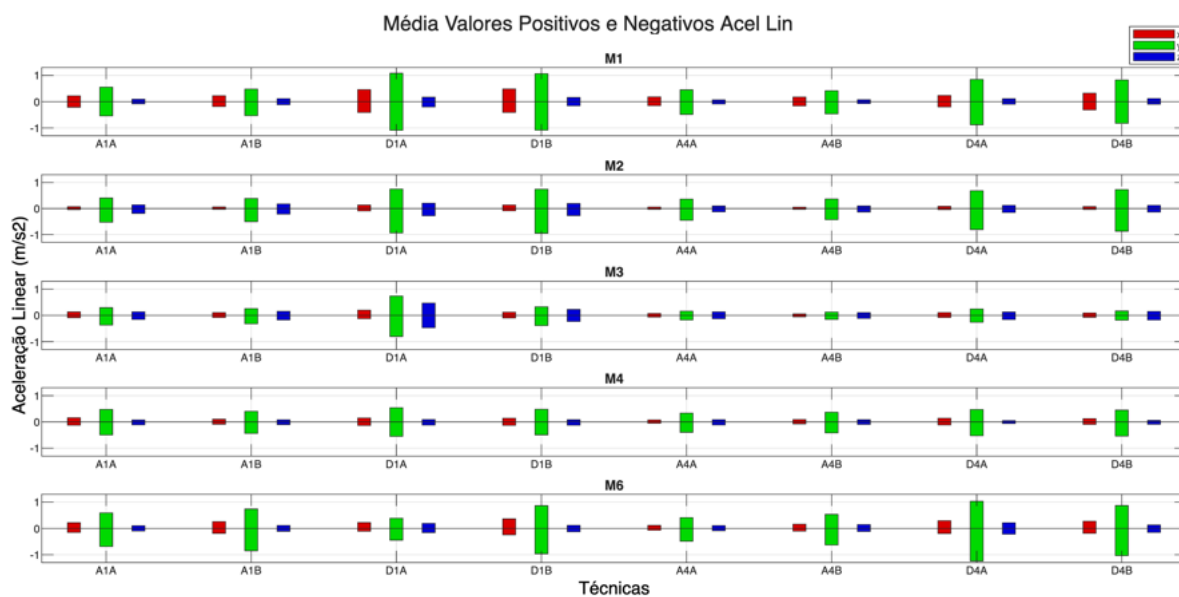


Figura 151: Média dos valores positivos e negativos de aceleração linear de todos os músicos na técnica de tremolo.

Já a média dos valores positivos e negativos da velocidade angular, observados na Figura 152, demonstram que a maioria dos músicos possuem médias maiores no eixo z e pequenas diferenças entre a execução direta e em progressão. Apenas o músico M3 se distingue dos demais, apresentando médias mais elevadas no eixo x na corda 4 e aumento

do eixo y no segundo take do tremolo direto na corda 1. Além disso, evidencia diferenças mais marcantes entre os tremolos direto e progressivo do que as observadas nos outros participantes. Associando ao gráfico anterior, pode-se inferir que este músico prioriza movimentos de rotação em relação aos de translação da mão.

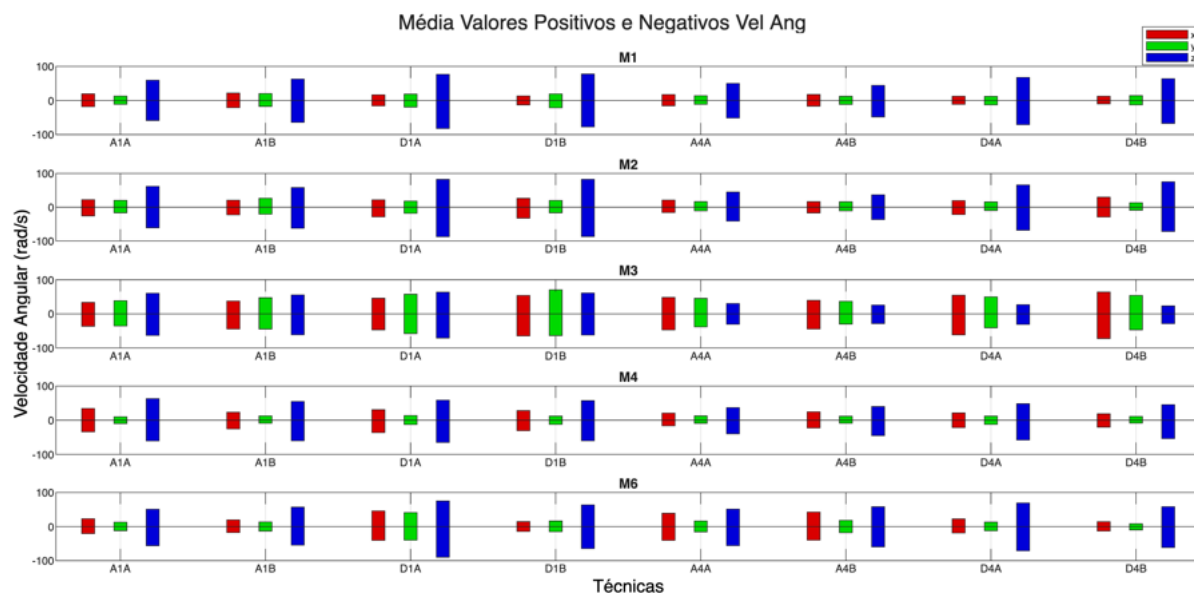


Figura 152: Média valores positivos e negativos de velocidade angular de todos os músicos na técnica de tremolo.

A PCA de aceleração linear (Figura 153) apresenta a porcentagem do primeiro componente muito próxima a 100% para todos os músicos (exceto M3), indicando uma linearidade da translação da mão, onde a direção do eixo y predomina (movimentação para cima e para baixo em relação às cordas). Este primeiro componente de M1 praticamente não tem contribuições do eixo z (ligado ao afastamento da mão do tampo do instrumento); já em M2 não há contribuições do eixo x (movimentação para a esquerda e direita das cordas). M3, por sua vez, apresenta valores mais significativos do eixo z; na corda 4 observamos também uma queda considerável na explicação do primeiro componente, o que corrobora os baixos valores de média presentes na Figura 151.

Finalizando essa abordagem gestual geral, no primeiro componente da PCA de velocidade angular predomina o eixo z, salvo M3 na corda 4 e no segundo take do tremolo direto na corda 1, onde os eixos x e y predominam. As porcentagens do primeiro componente variam mais que nas acelerações, mas se mantêm próximos a 100% de explicação.

Em resumo, o panorama geral dos dados gestuais ligados aos tremolos indica tendências consistentes entre os músicos, com maiores amplitudes de rotação no eixo x,

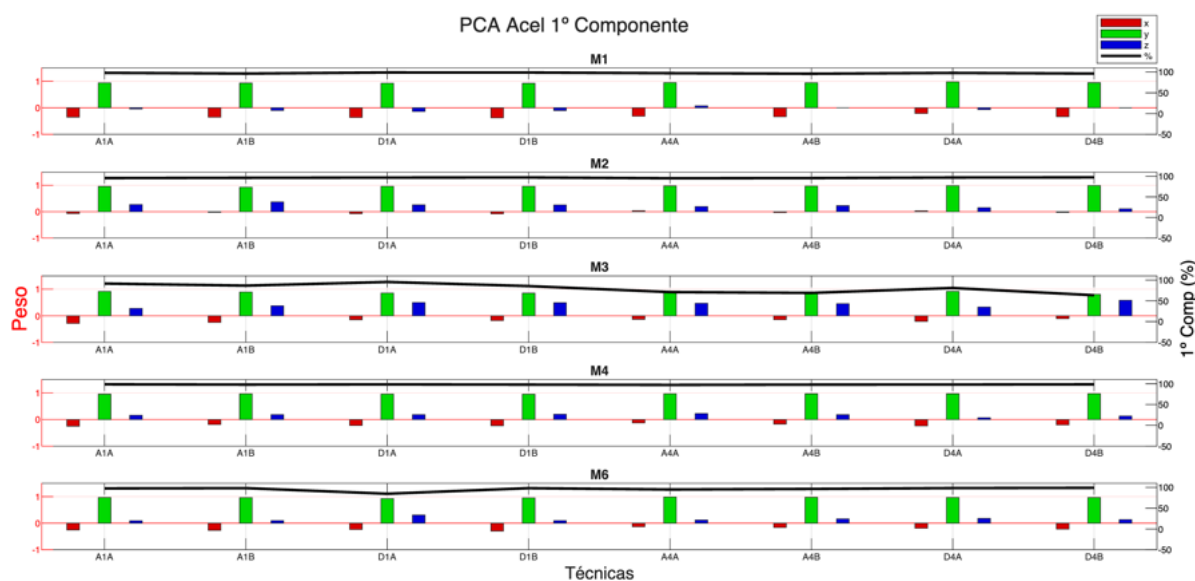


Figura 153: PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das acelerações lineares da técnica de tremolo, por todos os músicos.

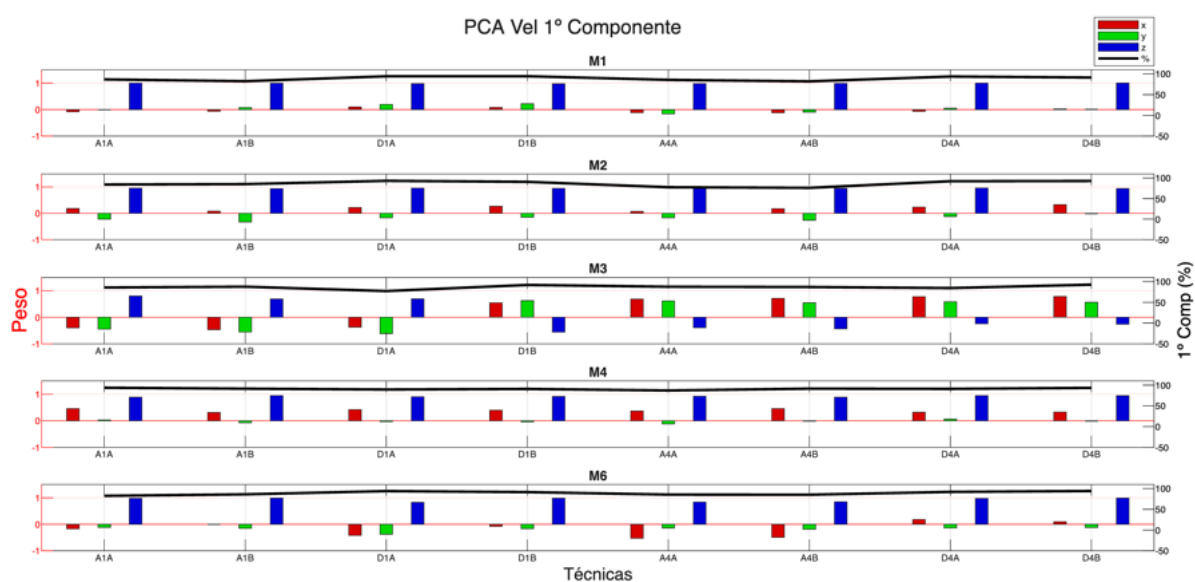


Figura 154: PCA com pesos por eixo e fator do primeiro componente das velocidades angulares da técnica de tremolo, por todos os músicos.

acelerações lineares mais expressivas no eixo y, e velocidades angulares no eixo z. Como já mencionado anteriormente, é importante salientar que esses movimentos da mão são feitos de forma conjunta e integrada, com influências da rotação na translação e vice-versa. Assim, uma maior variação de rotação em relação ao eixo x não implica em uma maior velocidade angular nesse mesmo eixo; esta variação pode ser consequência das forças de translação e rotação aplicadas aos outros eixos. No conjunto, o PCA de aceleração linear revela predomínio do eixo y e altas porcentagens no primeiro componente, indicando

coerência gestual entre participantes, enquanto o PCA de velocidade angular aponta predominância do eixo z e variações discretas entre condições, confirmando a estabilidade global das estratégias motoras na execução do tremolo. Nesse contexto, M3 destaca-se por fugir à essa regra, com padrões divergentes dos demais e entre si em quase todas as medidas.

Seguiremos com os resultados individuais por corda.

### 5.1.2 Análise Por Corda

As análises por corda foram realizadas a partir dos intervalos delimitados entre o primeiro e o último onset detectado, considerando uma margem de  $\pm 10$  ms para exclusão de gestos e forças não pertencentes ao trecho de interesse. O foco da investigação é a identificação de padrões na execução da técnica de forma direta e as mudanças de gesto e força ao longo do acelerando, bem como a comparação entre os diferentes instrumentistas.

Dividiremos o estudo em quatro situações:

- tremolo direto corda 1;
- tremolo direto corda 4;
- tremolo progressivo corda 1;
- tremolo progressivo corda 4;

#### 5.1.2.1 Tremolo Direto

Na técnica de tremolo direto o músico inicia imediatamente no regime máximo de velocidade, sem um período de preparação ou aceleração gradual. Essa característica torna o tremolo direto especialmente relevante do ponto de vista gestual: desde o primeiro ataque, o intérprete precisa estabilizar o movimento alternado de ataques, manter regularidade temporal e sustentar um fluxo contínuo de onsets com mínima variabilidade.

Ao eliminar a etapa de “arranque” gestual, o tremolo direto evidencia de maneira particularmente clara as estratégias individuais de controle. Pequenas assimetrias de força, flutuações dos IOIs, reorganizações gestuais nos primeiros ciclos, ou mesmo oscilações nas direções de aceleração e velocidade angular, tornam-se imediatamente visíveis, pois não há tempo de acomodação progressiva. A técnica, portanto, funciona como uma espécie

de “janela” para observar a capacidade do músico de atingir estabilidade rítmica, gestual e sonora sob alta demanda desde o instante inicial.

Nesta sessão, investigamos como cada performer responde a essas exigências, analisando regularidade temporal, distribuição das forças aplicadas à palheta, direções predominantes dos picos gestuais e padrões de estabilização ao longo do trecho. Essas observações permitirão compreender os limites, estratégias e soluções técnicas mobilizadas pelos músicos ao executar o tremolo diretamente em velocidade máxima — etapa fundamental para contextualizar, posteriormente, seu desempenho no tremolo progressivo. Iniciaremos as observações do estudo do tremolo direto realizado na corda 1.

### Tremolo Direto Corda 1

O desempenho de M1 revela um gesto equilibrado (Figura 155 e Figura 156), marcado por uma regularidade consistente entre os takes, tanto na quantidade de ataques quanto no comportamento geral do movimento. As amplitudes permanecem concentradas em uma mesma faixa, com leve predominância das palhetadas descendentes, mas sem comprometer a uniformidade global do trecho.

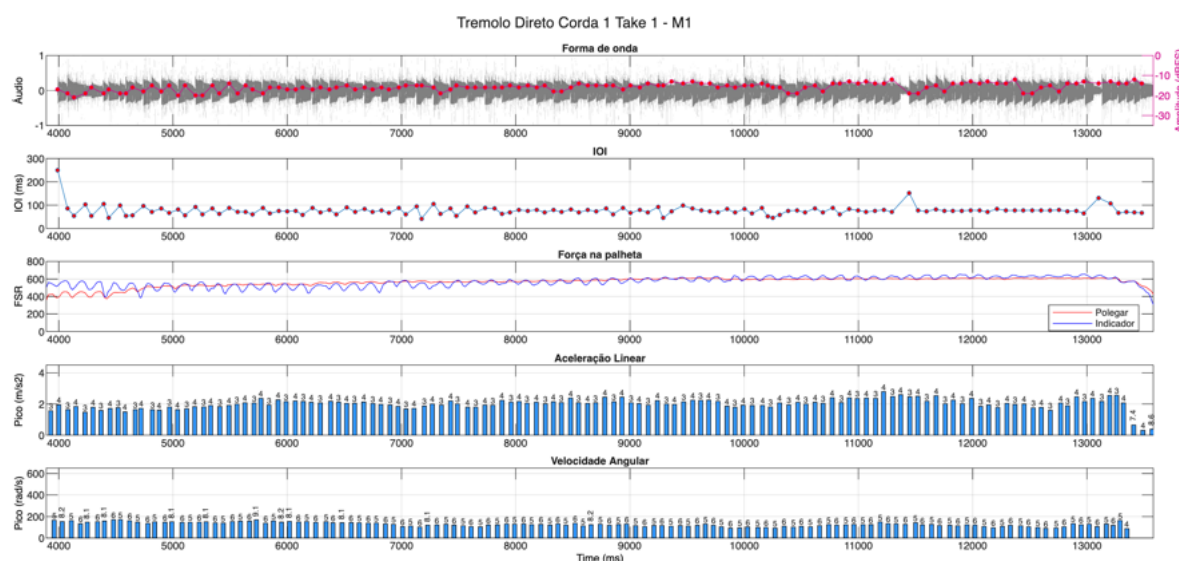


Figura 155: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M1.

Os IOIs situam-se na região de menor intervalo observada entre os participantes, indicando execução rápida acompanhada de boa estabilidade temporal. A distribuição desses valores mostra que M1 mantém o tremolo dentro de uma faixa estreita, mesmo em alta velocidade. As forças exercidas pelo polegar e pelo indicador apresentam padrões

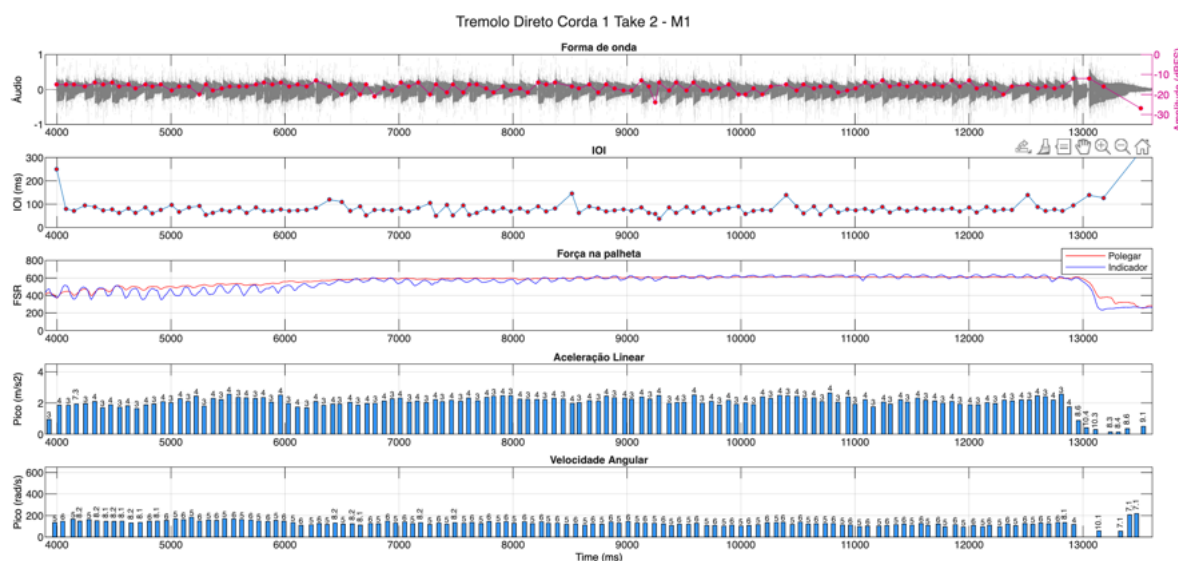


Figura 156: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M1.

muito próximos, com ausência de oscilações marcantes no controle da palheta. Nos picos gestuais, as direções predominantes confirmam uma estratégia consistente: a aceleração linear concentra-se no eixo y, enquanto a rotação ocorre de forma clara em torno do eixo z. A trajetória dos picos indica um impulso inicial mais acentuado na translação, seguido por uma evolução gradual e controlada até o final do trecho, ao passo que as velocidades angulares permanecem altamente estáveis ao longo da execução.

As Figura 157 e Figura 158 mostram os dois takes de M2, que apresenta um gesto mais contido, mas eficiente. A quantidade de notas é ligeiramente menor que a observada em M1, e as amplitudes permanecem concentradas em uma faixa reduzida, refletindo ataques controlados e sem variações dinâmicas excessivas.

Os IOIs distribuem-se de maneira estável nos dois takes, mas com diferenças perceptíveis entre eles: no take 1, a execução apresenta notas mais ligadas e maior participação do dedo indicador; no take 2, o gesto torna-se mais segmentado, acompanhado por um envolvimento menor desse dedo. No comportamento dos picos gestuais, as direções predominantes seguem o mesmo padrão observado em M1, com translação concentrada na direção principal correspondente ao eixo y e rotação em torno do eixo z. A aceleração linear apresenta variações discretas entre os takes, enquanto as velocidades angulares se mantêm bastante estáveis. No conjunto, o gesto de M2 caracteriza-se por amplitudes reduzidas, boa precisão temporal e baixa incidência de picos extremos.

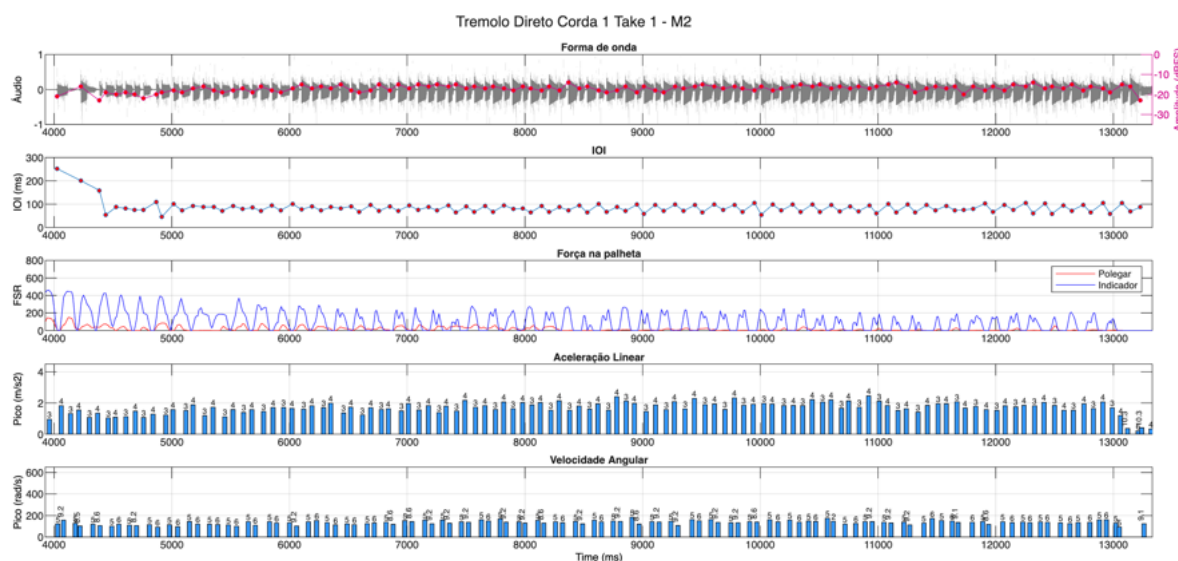


Figura 157: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M2.

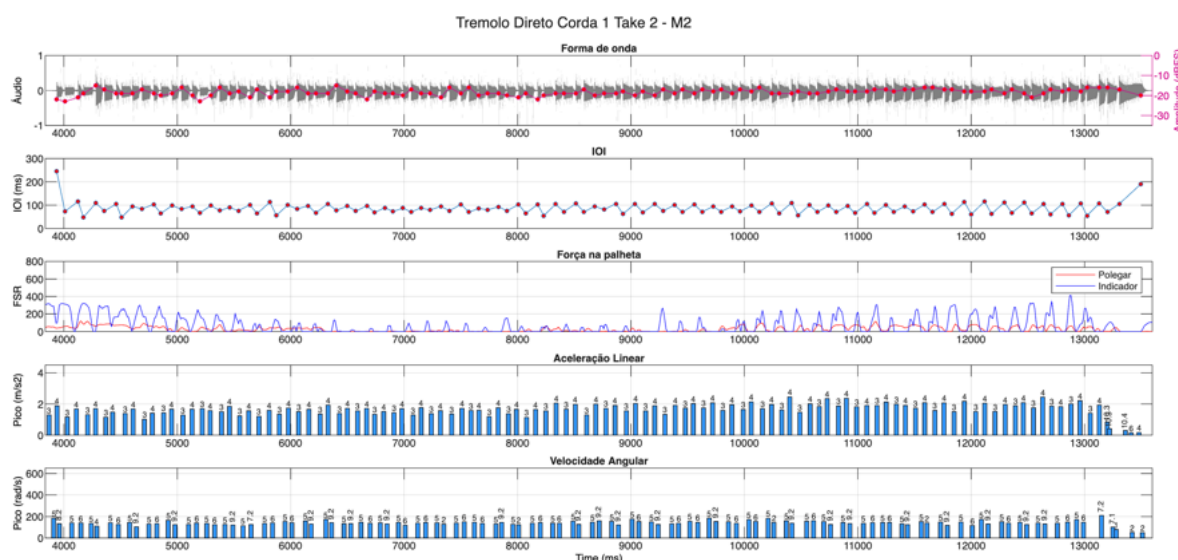


Figura 158: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M2.

O perfil de M3 é marcado por instabilidade direcional e grande variação gestual, como mostram a Figura 159 e Figura 160. Os dois takes apresentam amplitudes concentradas em uma faixa um pouco mais ampla que a observada nos demais músicos, indicando ataques que variam mais em intensidade. Da mesma forma, os IOIs situam-se dentro da faixa rápida do grupo, mas com dispersões consideráveis e diferenças visíveis entre os takes, refletindo um controle temporal menos estável. A distribuição das forças entre os dedos se inverte de um take para o outro: no primeiro, o indicador apresenta atuação

mais intensa, enquanto no segundo é o polegar que assume maior protagonismo. Os picos de aceleração linear e de velocidade angular apresentam direções bastante dispersas, com uso simultâneo de múltiplos eixos<sup>18</sup>. Essas flutuações indicam uma execução rica em microajustes contínuos. Apesar dessa irregularidade direcional, os picos gestuais revelam um gesto potente: a aceleração linear e, sobretudo, a velocidade angular aparecem entre as mais intensas da amostra.

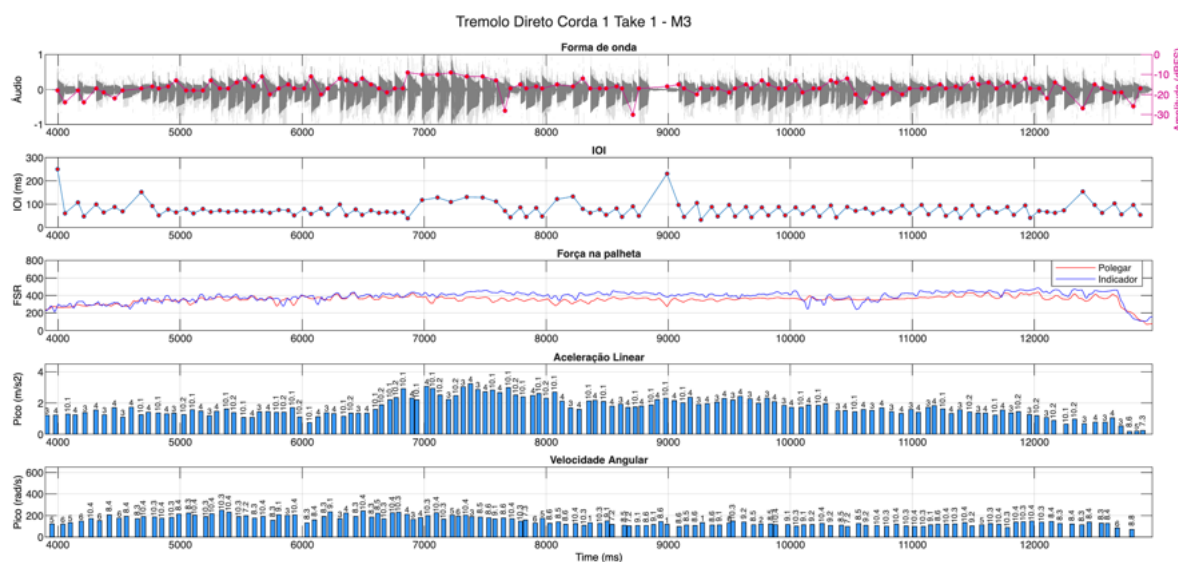


Figura 159: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M3.

O desempenho de M4 evidencia uma técnica equilibrada e contida, como mostram a Figura 161 e Figura 162. A sonoridade apresenta amplitudes mais discretas e homogêneas entre os takes, indicando um ataque controlado e voltado para uma execução mais reservada. No domínio temporal, os IOIs situam-se na faixa rápida observada entre os músicos, mantendo regularidade estável e pouco sujeito a variações abruptas.

Nas forças aplicadas à palheta, observa-se maior participação do indicador, que atua de forma consistente ao longo do gesto. O polegar, por sua vez, apresenta comportamento mais irregular e contribuições menores em trechos específicos, sugerindo um apoio menos ativo neste performer. Os parâmetros gestuais mostram direções bastante estáveis tanto na aceleração linear quanto na velocidade angular, com predominância recorrente dos mesmos eixos. Os picos de translação e rotação surgem de maneira regular, sem oscilações bruscas, caracterizando um tremolo tecnicamente consolidado, que se mantém

<sup>18</sup>Embora pareçam direções distintas, muitas dessas combinações representam apenas variações entre eixos já predominantes, refletindo gestos compostos em vez de mudanças estruturais.

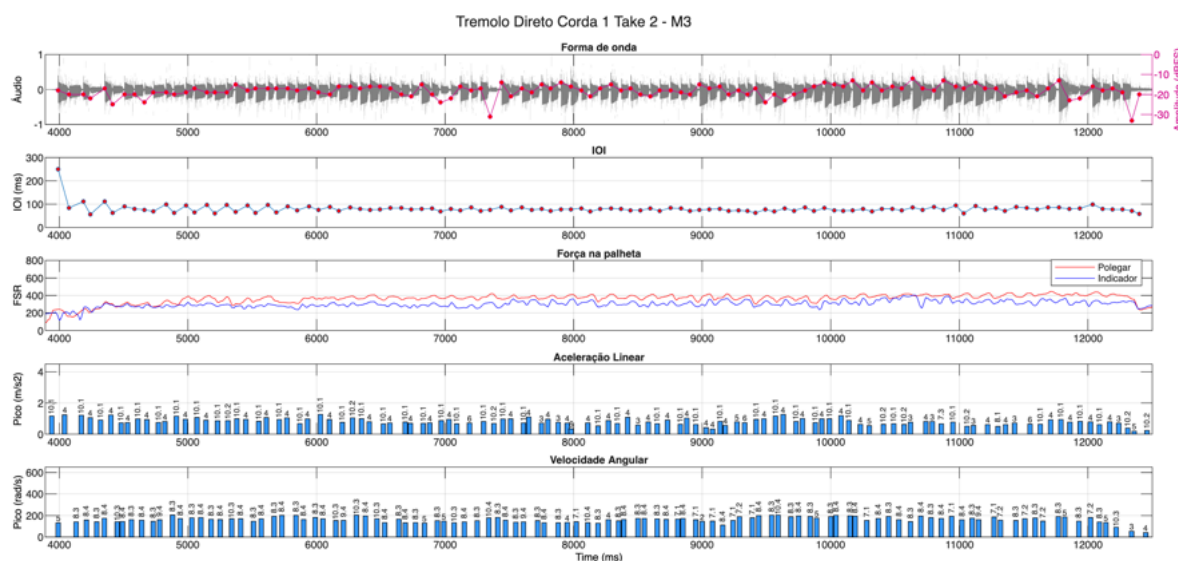


Figura 160: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M3.

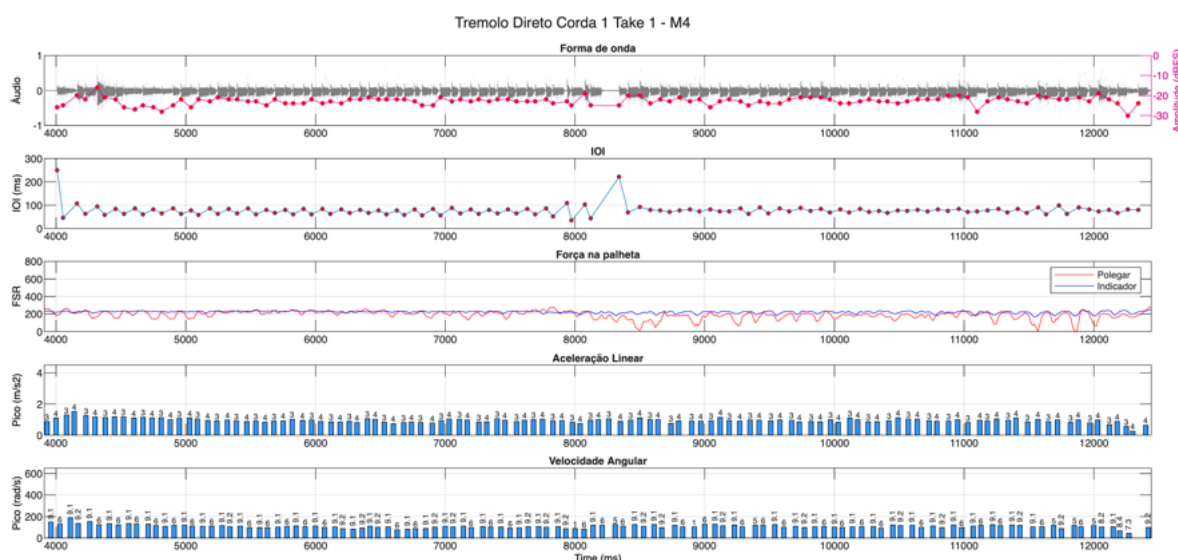


Figura 161: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M4.

consistente entre os takes.

O músico M6 (Figura 163 e Figura 164) apresenta a maior variação entre os takes, revelando um gesto flexível e instável. A produção sonora mantém amplitudes semelhantes entre os dois registros, mas com diferenças claras na forma como a energia é distribuída ao longo do gesto.

Os IOIs situam-se na faixa rápida observada no grupo, porém com flutuações temporais, indicando um tremolo veloz, mas sujeito a variações internas que diferenciam os

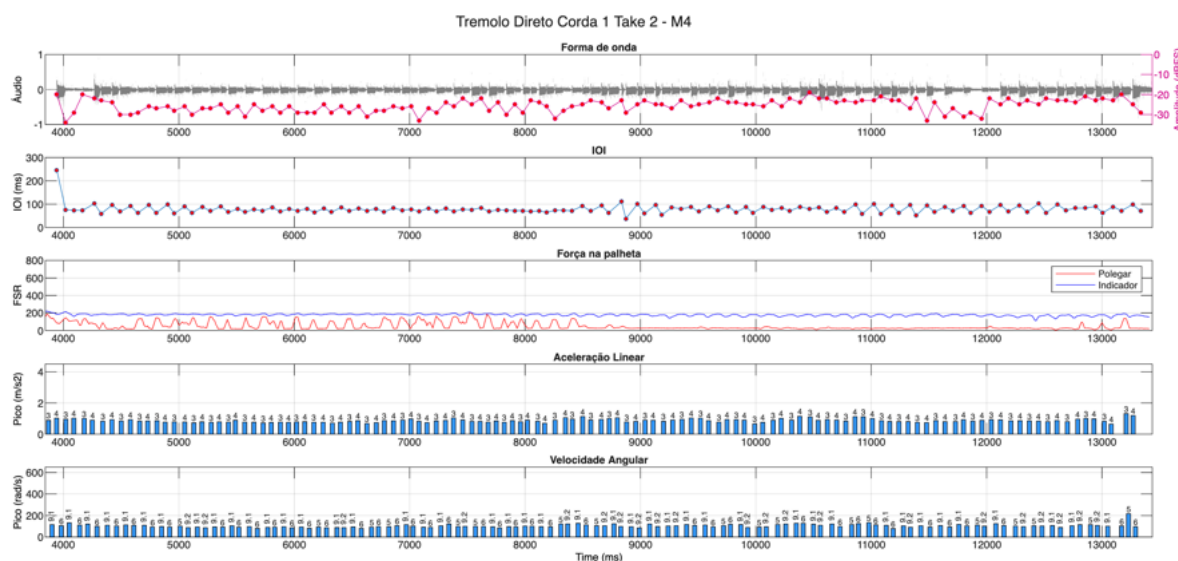


Figura 162: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M4.

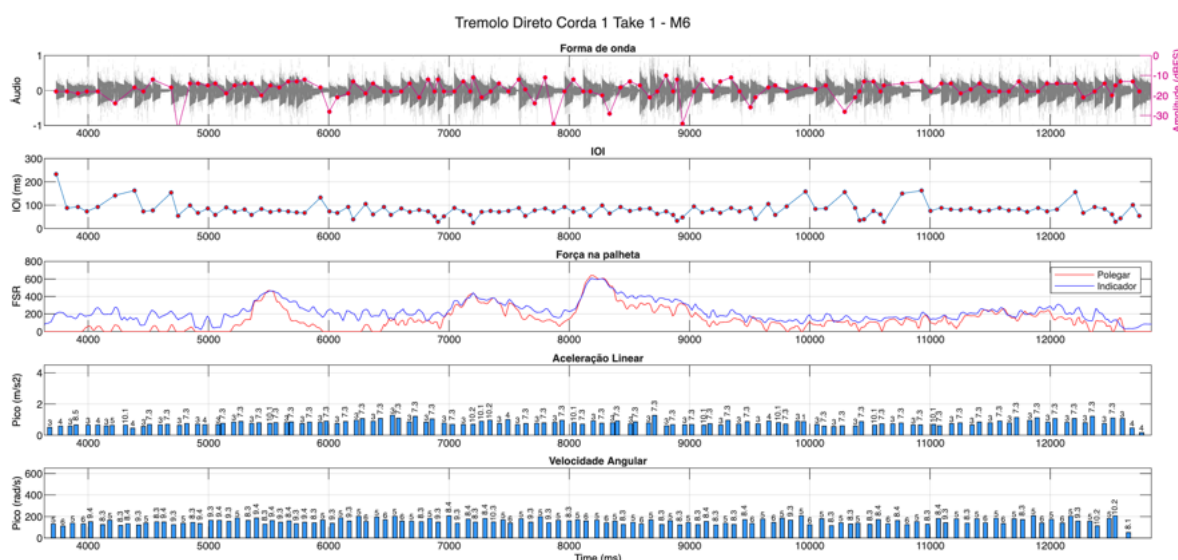


Figura 163: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 1, realizado pelo M6.

dois takes. As forças aplicadas à palheta mostram predominância evidente do indicador — de maneira ainda mais pronunciada no segundo take 2—, enquanto o polegar apresenta contribuições menores e irregulares. As direções dos picos gestuais, inicialmente mais dispersas no primeiro registro, tornam-se mais estáveis no segundo, convergindo para combinações típicas dos eixos predominantes na aceleração linear e na velocidade angular. Os picos de movimento mostram crescimento expressivo no segundo take, tanto em aceleração quanto em rotação, sugerindo aumento da energia gestual e maior engajamento.

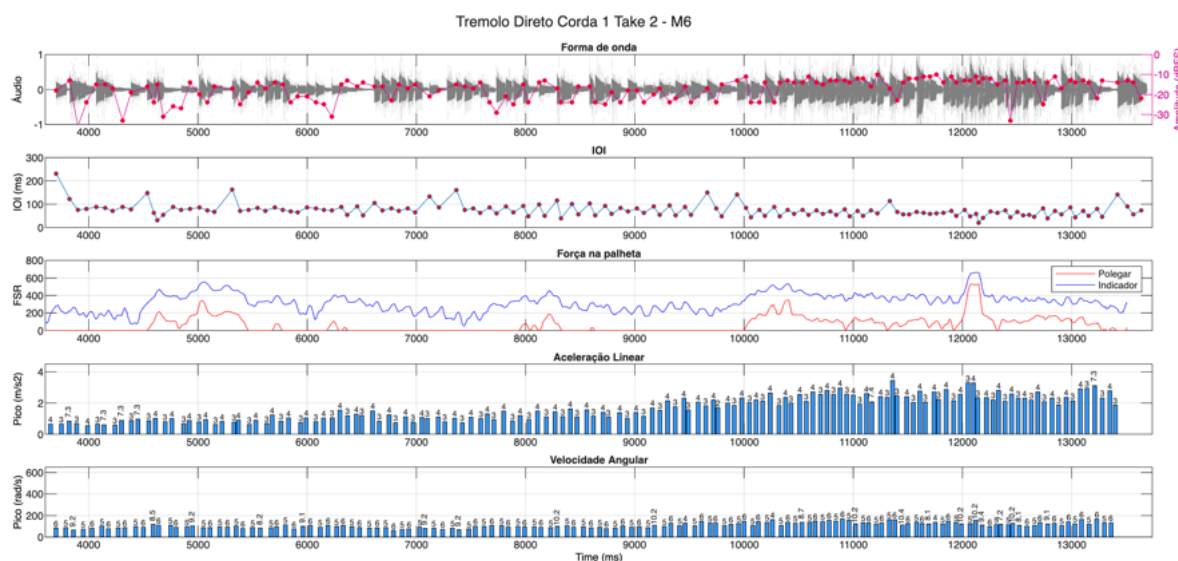


Figura 164: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 1 take 2, realizado pelo M6.

jamento muscular. Esses aspectos indicam um gesto em processo de estabilização, que ganha potência e organização ao longo das repetições.

Nos registros de tremolo direto na corda 1, o conjunto dos músicos apresenta convergência nos IOIs para um tempo médio comum (Figura 165), mantendo diferenças individuais na regularidade. Músicos como M1 e M4 evidenciam gestos rítmicos mais consolidados (caixas compactas, menos outliers), já M3 (take 1) e M6, mostram maior variabilidade expressiva, talvez associada à ajustes gestuais ou de força na palheta.

A amplitude dinâmica apresenta pouca variabilidade (Figura 166), salvo M6T2, que apresenta variação maior. M4 apresenta menores amplitudes, enquanto M2T2 e M3T1 são assimétricos (com M3 possuindo mais outliers).

A estimativa de conteúdo espectral, representada pelo centroide, demonstra que todos os músicos possuem a mesma tendência central, ocupando a faixa em torno do segundo harmônico, com destaque para M4, mais controlado, e M6, mais disperso no grupo. Esses dados podem ser vistos na Figura 167.

As intensidades dos picos de aceleração linear e velocidade angular estão dispostos nas Figura 168 e Figura 169. As intensidades de aceleração linear mostram inconsistência entre os dois takes de M3 e M6, cada amostra com características bem distintas. M4 apresenta maior regularidade e valores menores, enquanto M1 e M2 se aproximam na faixa de valores maiores, com notável regularidade entre os takes de M2, que ocupa uma

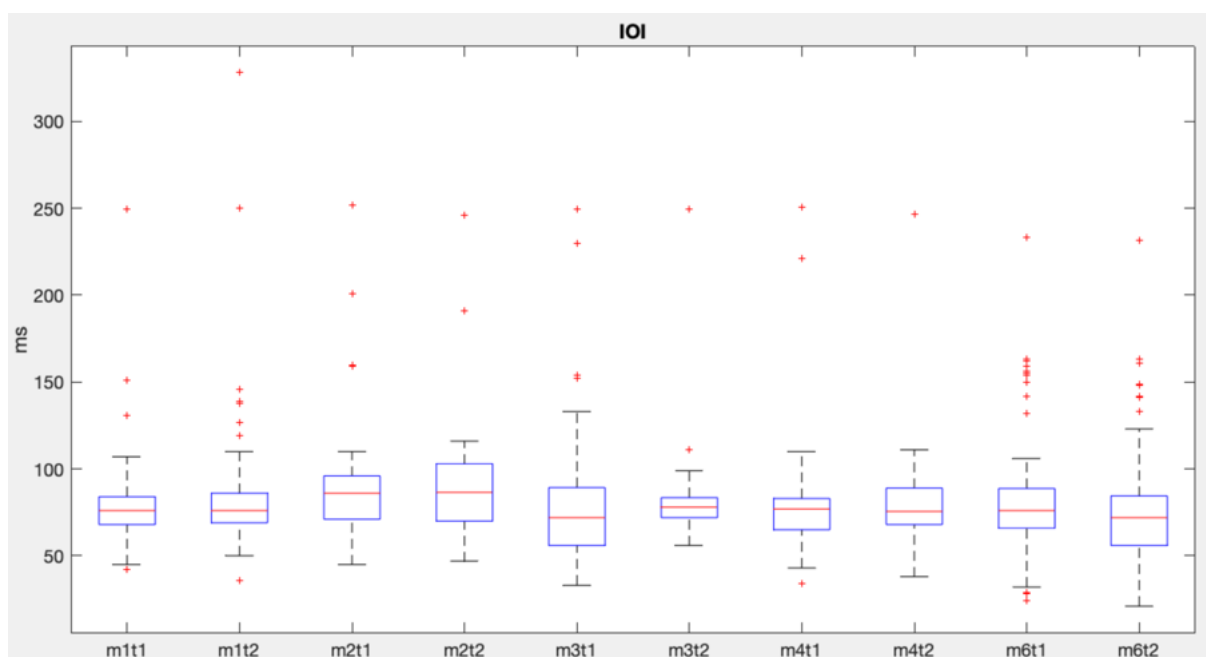


Figura 165: Boxplot com os IOIs de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1.

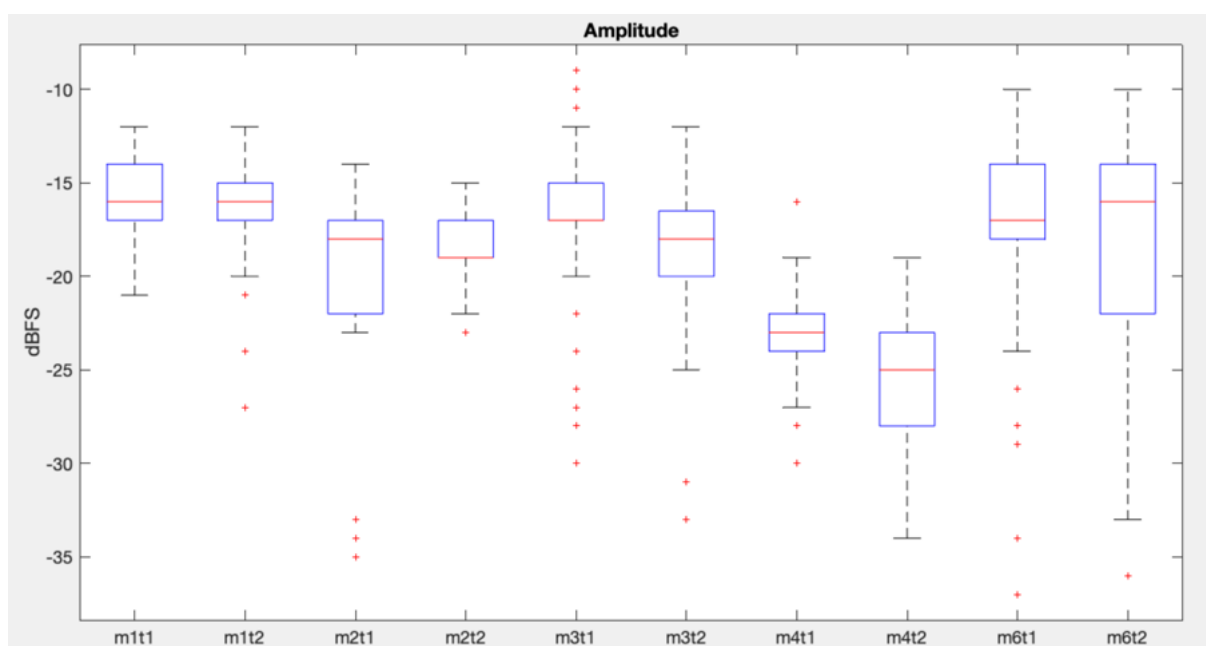


Figura 166: Boxplot com as amplitudes de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1.

faixa ligeiramente menor. Na velocidade angular essas características se mantêm: M3 e M6 irregulares nos 2 takes, M4 com menores variações e M1 e M2 próximos, mas com M1 agora com valores um pouco menores.

De forma sintética, os resultados do tremolo direto na corda 1 indicam que, apesar das diferenças individuais, há uma convergência geral para um padrão técnico comum

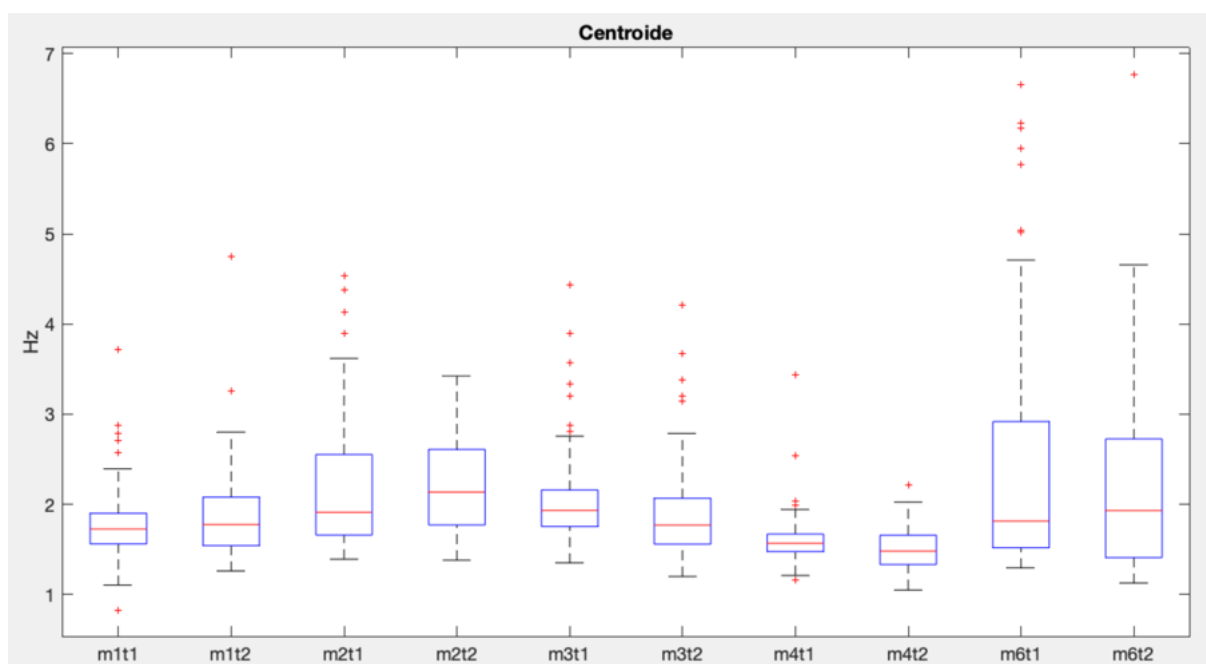


Figura 167: Boxplot do centroide espectral de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1.

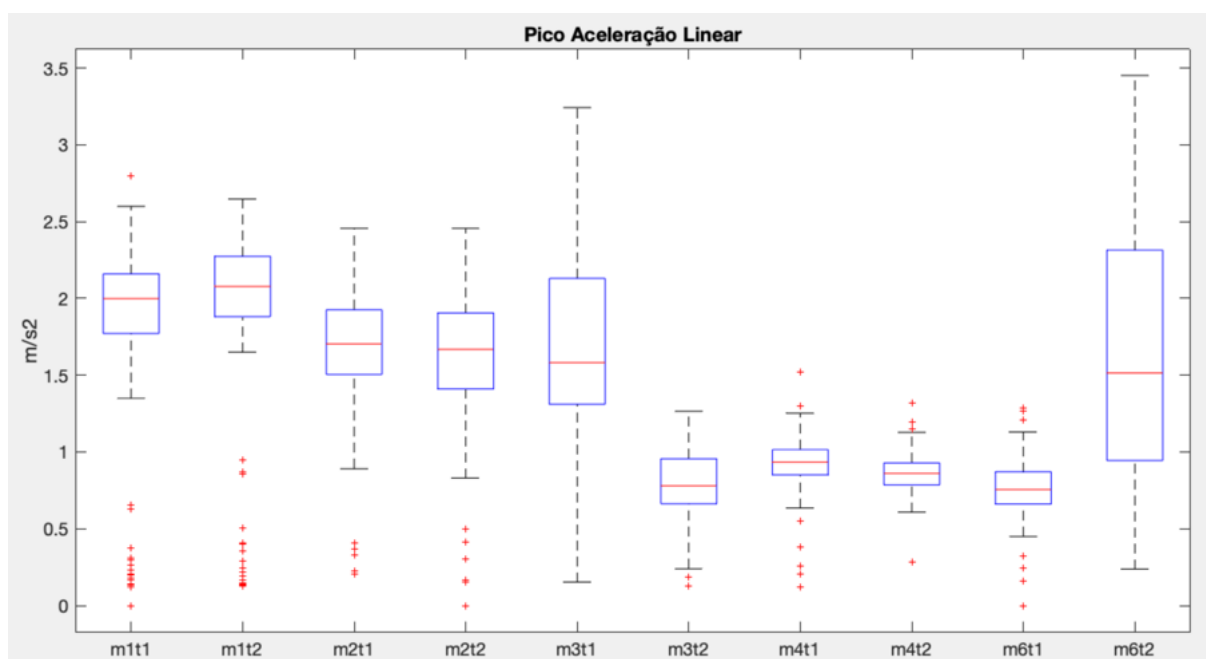


Figura 168: Boxplot das intensidades de aceleração linear de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1.

de estabilidade temporal e controle gestual. Os músicos tendem a manter IOIs médios próximos, amplitudes dinâmicas regulares e picos de aceleração e velocidade dentro de faixas semelhantes, sugerindo a consolidação de um regime motor eficiente e automatizado. As variações observadas — como a maior dispersão de M3 e M6 ou o controle mais

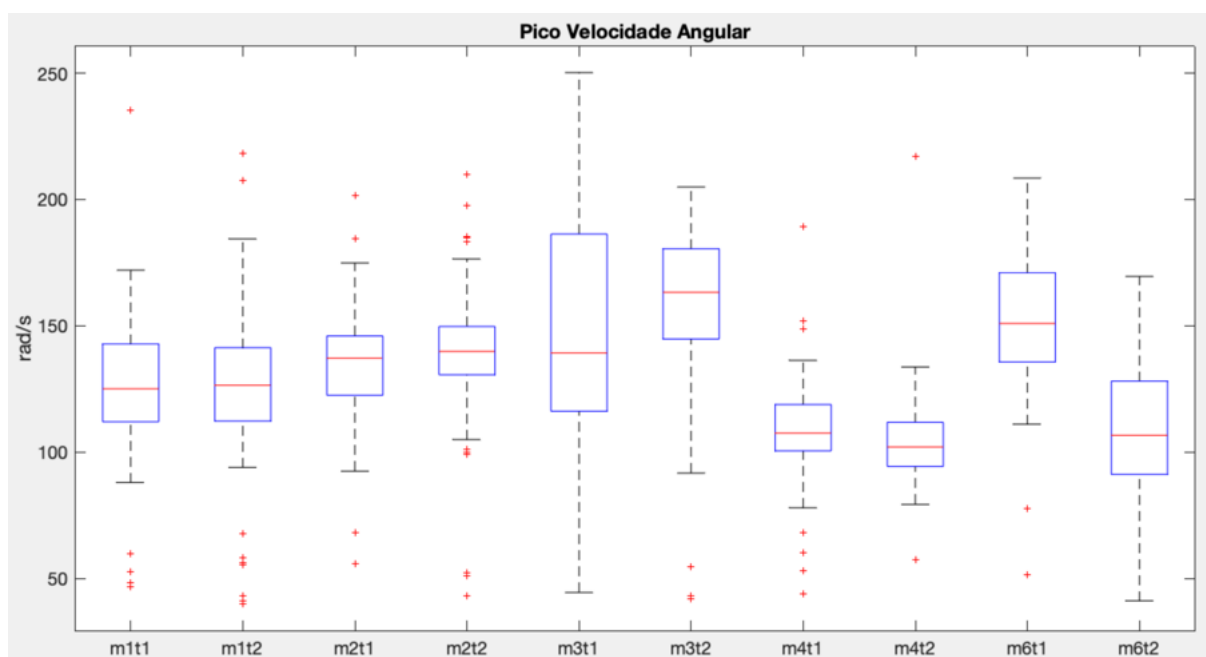


Figura 169: Boxplot das intensidades dos picos de velocidade angular de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 1.

compacto de M1 e M4 — refletem distintas estratégias de compensação e ajuste entre força e fluidez do movimento.

Em conjunto, os dados revelam que o domínio do tremolo em alta velocidade depende mais da otimização das relações entre regularidade rítmica, equilíbrio da força nos dedos e economia de movimento. Observaremos agora o comportamento do mesmo estudo, mas na corda 4.

### Tremolo Direto Corda 4

As Figura 170 e Figura 171 mostram a execução de M1, que revela um gesto sólido e consistente entre os dois takes. O número de notas permanece semelhante, e as amplitudes mantêm-se dentro de uma faixa muito próxima, indicando estabilidade dinâmica independentemente da repetição. As palhetadas descendentes apresentam ligeira predominância de intensidade, mas sem produzir mudanças significativas no perfil sonoro ou na regularidade geral do gesto. Os IOIs situam-se na faixa rápida característica desse participante, com variações que permanecem controladas nos dois registros. As forças aplicadas pelos dedos evidenciam equilíbrio entre polegar e indicador, ambos contribuindo de maneira bastante similar para o gesto.

Nos picos dos gestos, as direções 4–3 (aceleração linear) e 5–6 (velocidade angular) permanecem predominantes nos dois takes, indicando consistência na maneira como o

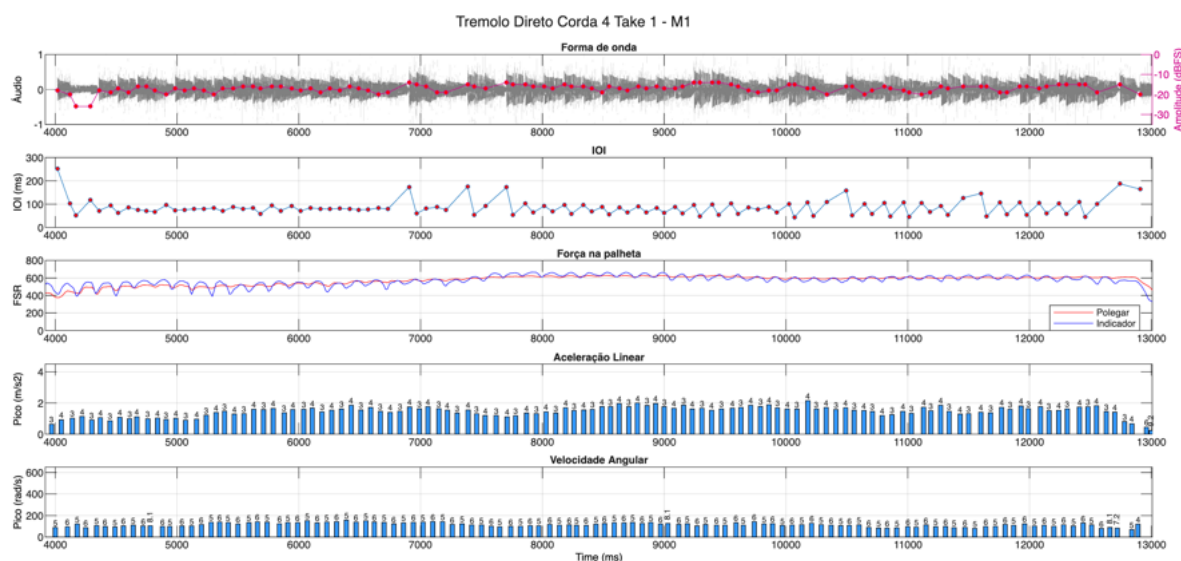


Figura 170: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M1.

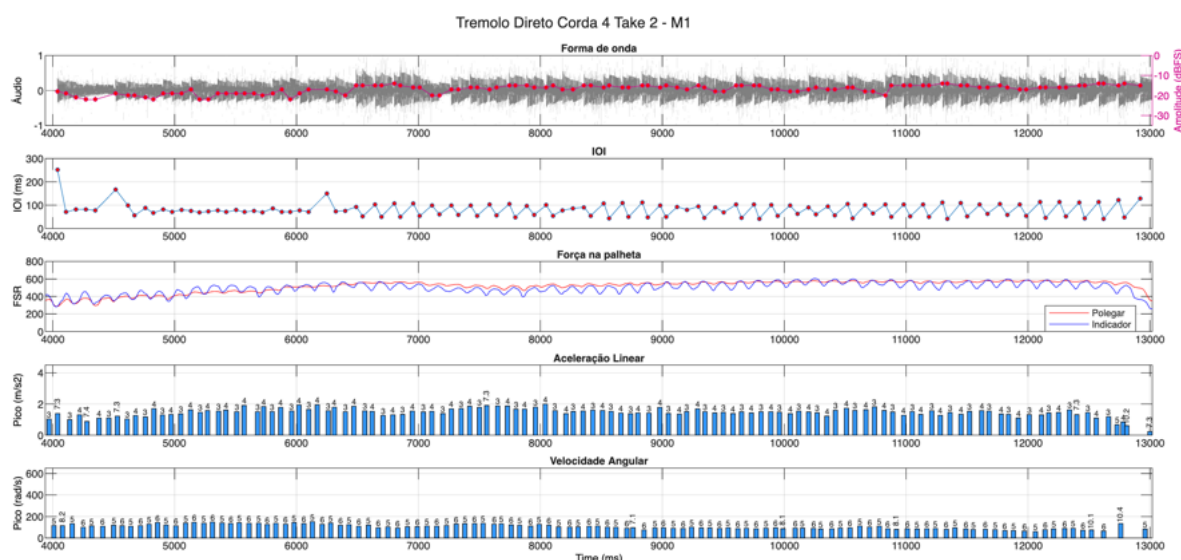


Figura 171: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M1.

músico organiza os eixos principais do movimento. Observa-se um crescimento progressivo da intensidade desses picos ao longo das execuções, sugerindo que o gesto se desenvolve de forma contínua e controlada. O resultado geral evidencia alta eficiência gestual, com energia distribuída de modo equilibrado entre os dedos e estabilidade plena do movimento — um tremolo tecnicamente consolidado e sem oscilações significativas na coordenação.

Em M2, o gesto revela uma sonoridade mais segmentada e um controle gestual preciso, com número de notas muito semelhante entre os dois takes. As amplitudes

mantêm-se discretas, refletindo uma dinâmica mais contida e homogênea ao longo da execução. Temporalmente, os IOIs mostram regularidade entre os registros, indicando estabilidade na alternância do tremolo. A força aplicada pelos dedos evidencia clara predominância do indicador, enquanto o polegar atua de forma mais leve. Apesar de uma falha no sensor de força no segundo take, a estratégia geral permanece evidente: o gesto se organiza majoritariamente em torno do indicador, com pouca participação complementar do polegar. Nos picos gestuais, observa-se crescimento de intensidade tanto na aceleração linear quanto na velocidade angular, reforçando a impressão de um gesto econômico, controlado e tecnicamente estável. A execução, como mostram as figuras Figura 172 e Figura 173, permanece coerente entre os takes, sem mudanças estruturais relevantes.

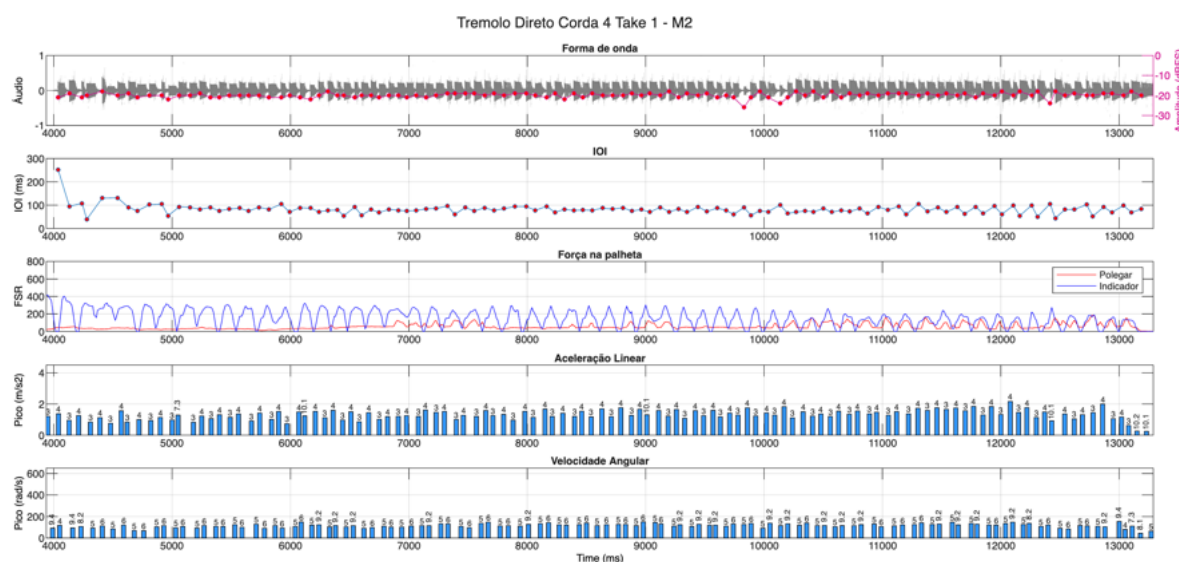


Figura 172: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M2.

M3 apresenta um comportamento distinto dos demais músicos: a direção da palheta não exerce impacto perceptível sobre as amplitudes, que permanecem estáveis entre os dois takes, tanto em termos de intensidade quanto de consistência global. A quantidade de notas registradas é semelhante entre os takes, reforçando a regularidade do gesto. Os IOIs mostram pequenas oscilações internas, mas mantêm-se dentro de um regime estável, indicando controle temporal coerente ao longo da execução. No que diz respeito às forças aplicadas pelos dedos, observa-se uma distribuição equilibrada entre polegar e indicador, com o polegar atuando de forma ligeiramente mais intensa em ambos os registros. As figuras Figura 174 e Figura 175 ilustram essa estabilidade geral.

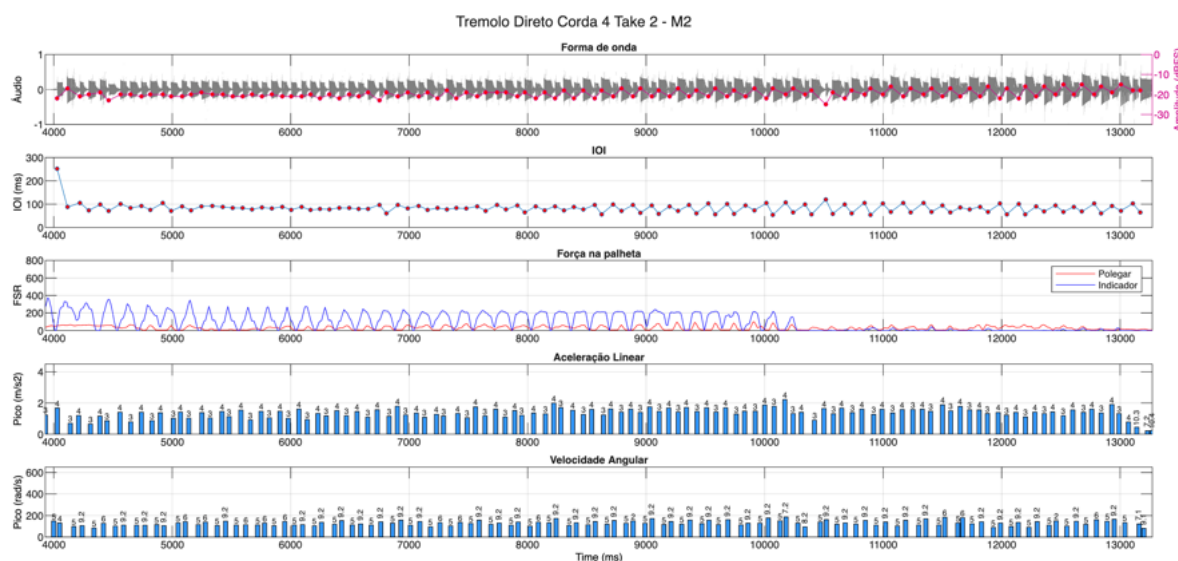


Figura 173: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M2.

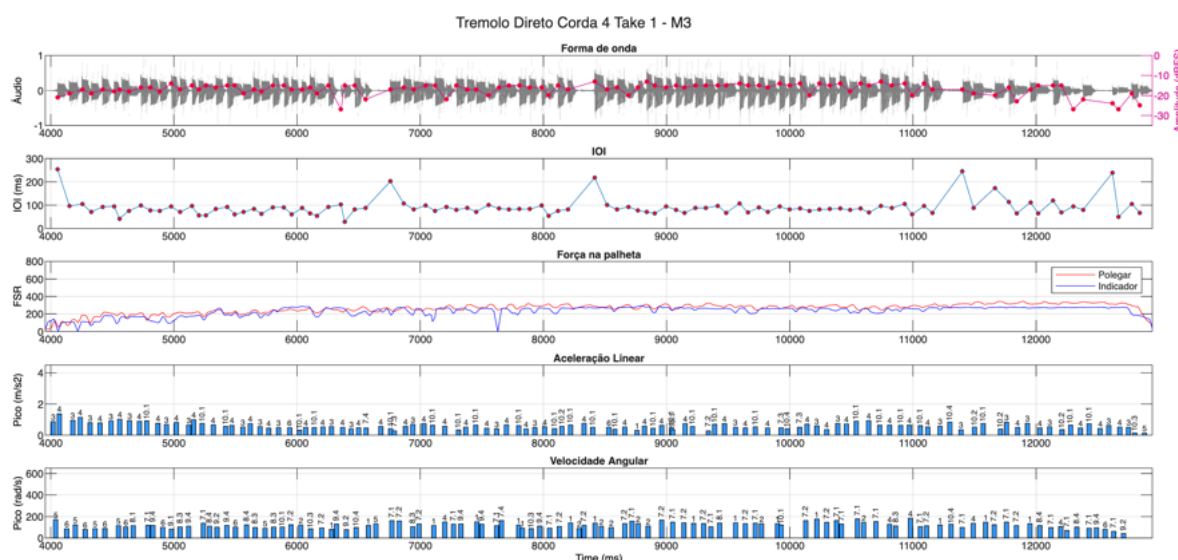


Figura 174: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M3.

Os picos de aceleração apresentam intensidades baixas e bastante estáveis entre os dois takes, enquanto a velocidade angular mostra um crescimento discreto, sugerindo um gesto que se torna ligeiramente mais amplo ou energético no segundo registro. Apesar de haver dispersão nas direções dos picos, o controle global do movimento se mantém consistente: a energia do gesto é distribuída de forma equilibrada e a alternância entre os dedos permanece estável ao longo da execução.

A técnica de M4 (Figura 176 e Figura 177) é marcada por uma uniformidade ges-

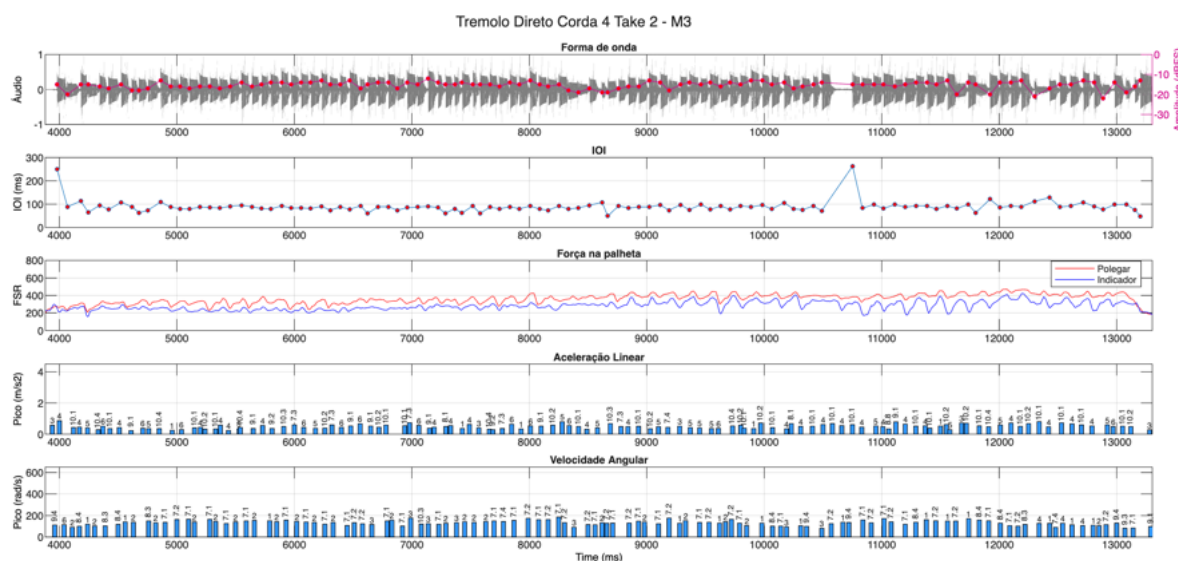


Figura 175: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M3.

tual, acompanhada de amplitudes ligeiramente maiores nas palhetadas descendentes. O número de notas executadas nos dois takes é semelhante, e a regularidade dos IOIs revela uma precisão temporal consistente ao longo de ambos os registros. Do ponto de vista sonoro, as amplitudes mantêm-se estáveis, indicando um controle dinâmico equilibrado. Quanto às forças aplicadas pelos dedos, observa-se menor participação do polegar no primeiro take, mas essa assimetria desaparece no segundo, quando ambos os dedos passam a contribuir de forma semelhante. Nos parâmetros gestuais, as direções dos picos de aceleração e de velocidade permanecem bastante regulares, reforçando a estabilidade gestual da execução.

M6 evidencia um comportamento altamente energético, apresentando o maior número de notas entre os músicos e mantendo constância sonora independente da direção da palheta (Figura 176 e Figura 177). Os intervalos entre ataques situam-se entre os menores da amostra, indicando execução no limite superior de velocidade com boa estabilidade temporal.

A força aplicada à palheta concentra-se majoritariamente no indicador, especialmente no primeiro take, enquanto o polegar contribui de forma muito reduzida, reforçando uma estratégia assimétrica de ataque. Nos parâmetros gestuais, observa-se um aumento expressivo na intensidade dos picos de aceleração linear, acompanhado de velocidades angulares elevadas e mais regulares entre os takes.

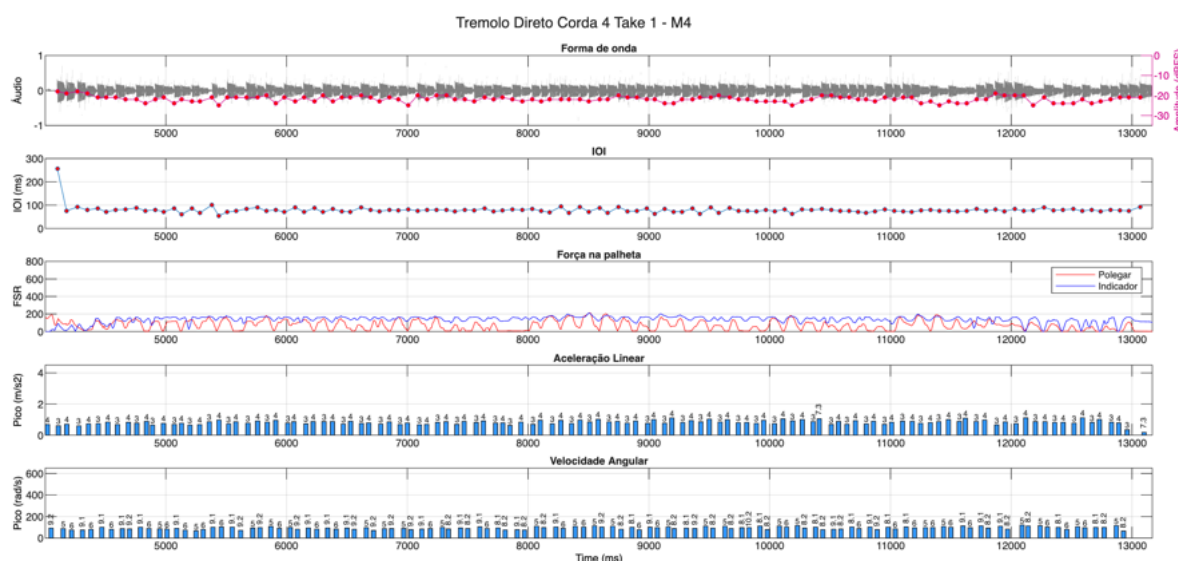


Figura 176: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M4.

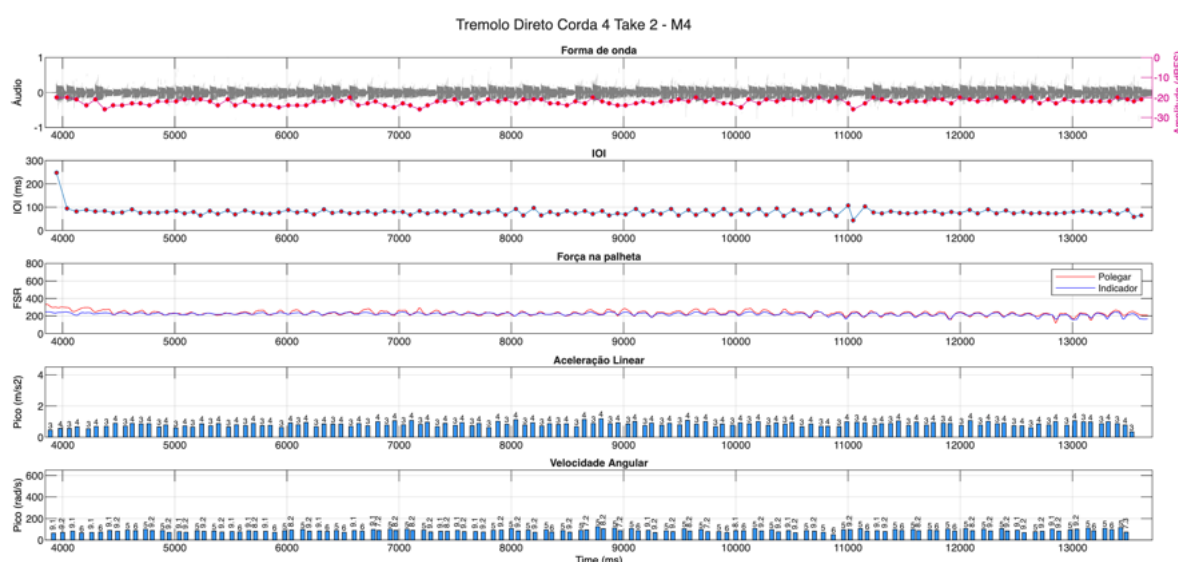


Figura 177: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M4.

Observando os dados de todos os músicos de forma conjunta, podemos perceber que o centroide espectral (Figura 180) de M1, nos dois takes, se difere dos outros músicos ocupando região de energia do quarto harmônico, enquanto os demais estão por volta de 2. Outro destaque está em M6, com os dois takes bem diferentes entre si. M2, M3 e M4 são mais controlados, com menor dispersão e variabilidade.

Os valores dos picos de aceleração linear (Figura 181) mostram que os músicos se agrupam da seguinte forma: M1 e M2 ocupam a faixa em torno de 1,4 g, com dispersão

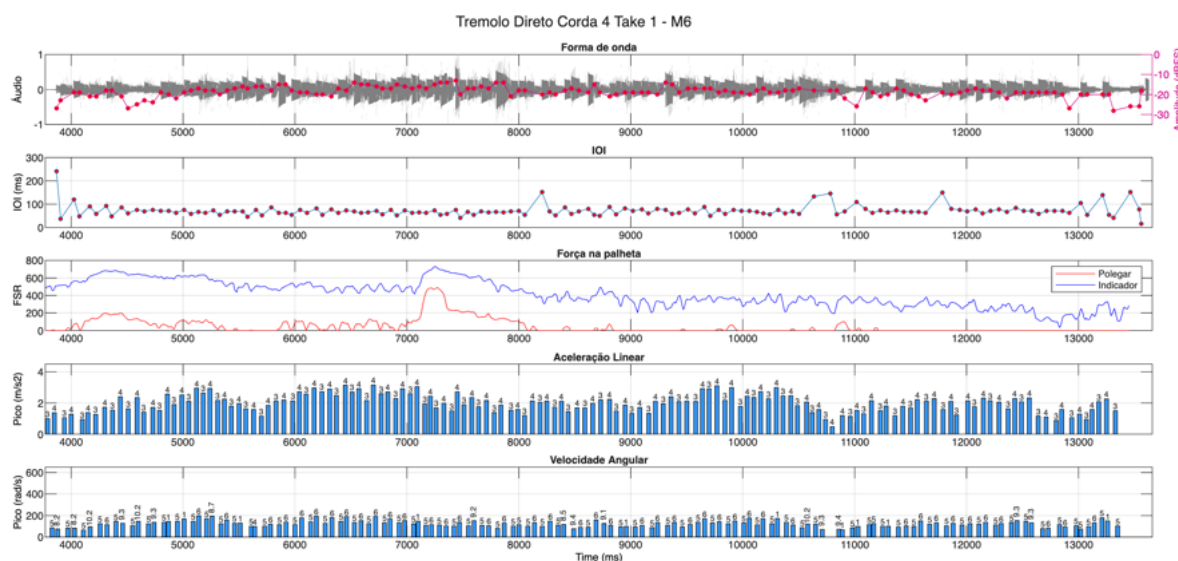


Figura 178: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 1, realizado pelo M6.

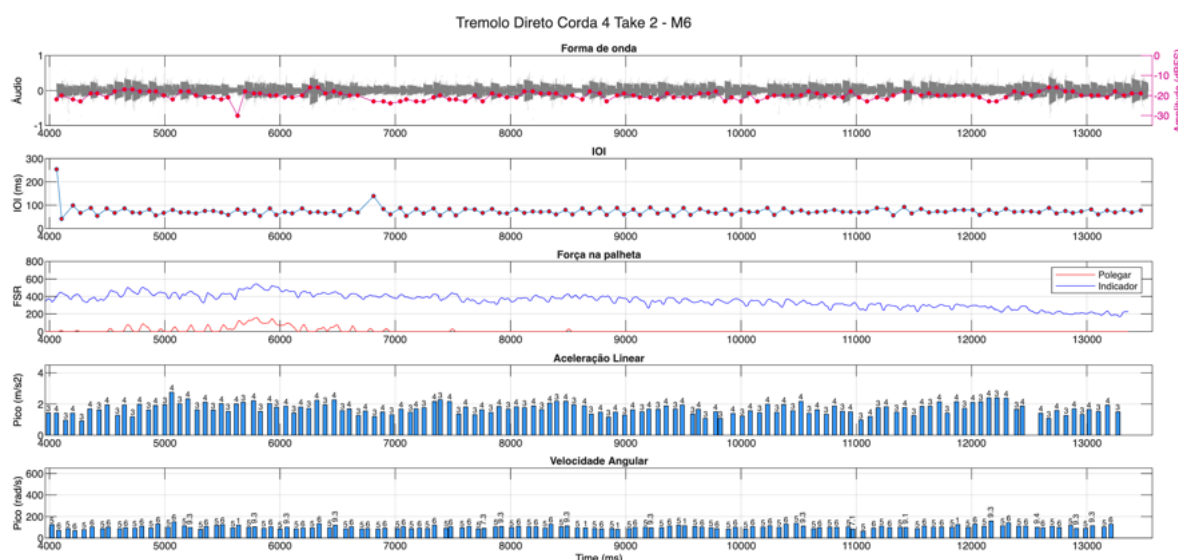


Figura 179: Amplitude, IOI, FRS, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular no tremolo direto corda 4 take 2, realizado pelo M6.

mediana no grupo; M3 e M4 estão na região abaixo de 1 g, com menor dispersão; M6 está acima de 1,5 g, com grande variabilidade e diferença entre os dois takes. Já na velocidade angular (Figura 182) os músicos se aproximam, tanto na faixa de atuação quanto na dispersão das medidas (com M4 um pouco abaixo dos demais e com menor variabilidade).

As amplitudes, apresentadas na Figura 183, revelam maior intensidade sonora em M1 e M3, enquanto M4 se destaca pela regularidade entre os takes e pelas menores intensidades do grupo. Observa-se ainda que M3 e M6 apresentam maior ocorrência de

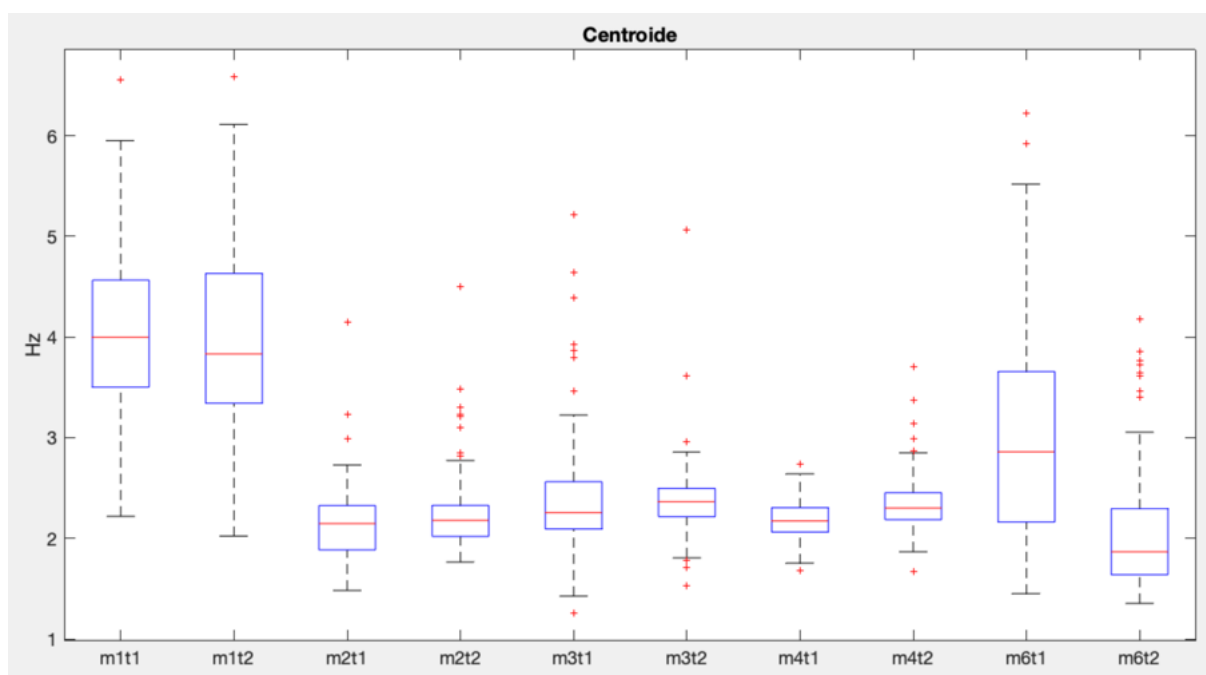


Figura 180: Boxplot do centroide espectral de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4.

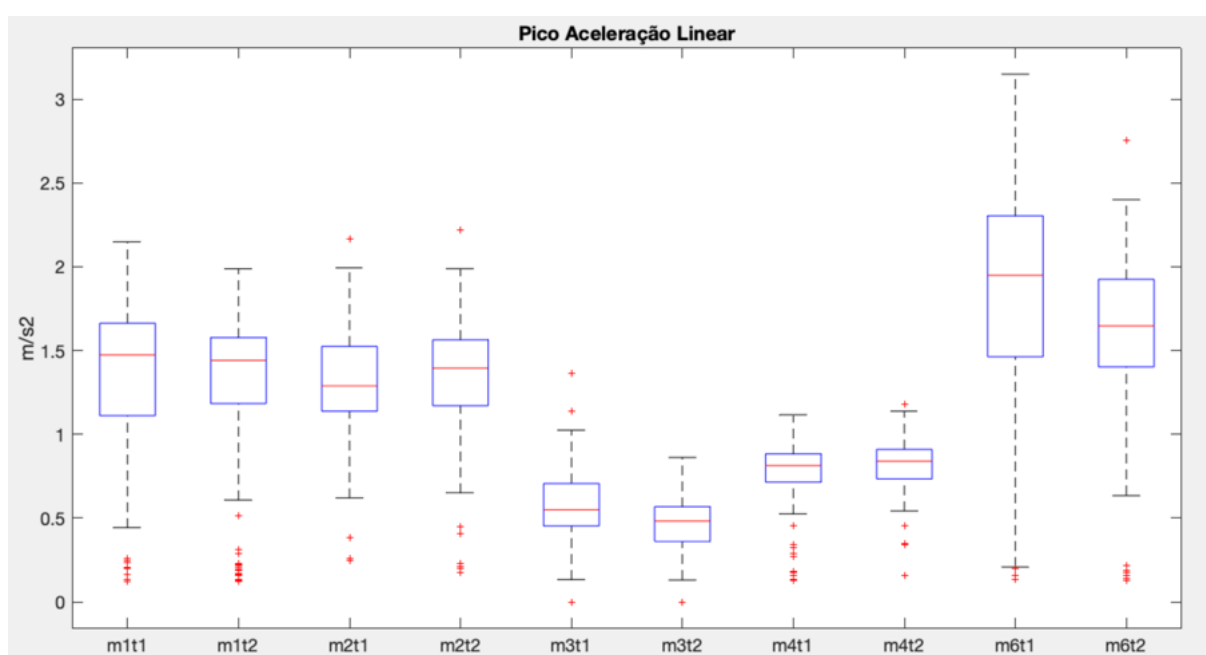


Figura 181: Boxplot da aceleração linear de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4.

valores afastados da tendência central, ao passo que M2 e M6 situam-se em uma faixa intermediária de amplitudes.

Ritmicamente, todos os músicos se concentram em uma mesma faixa de IOIs, sugerindo que, no regime rápido, há um limite de velocidade comum entre os participantes

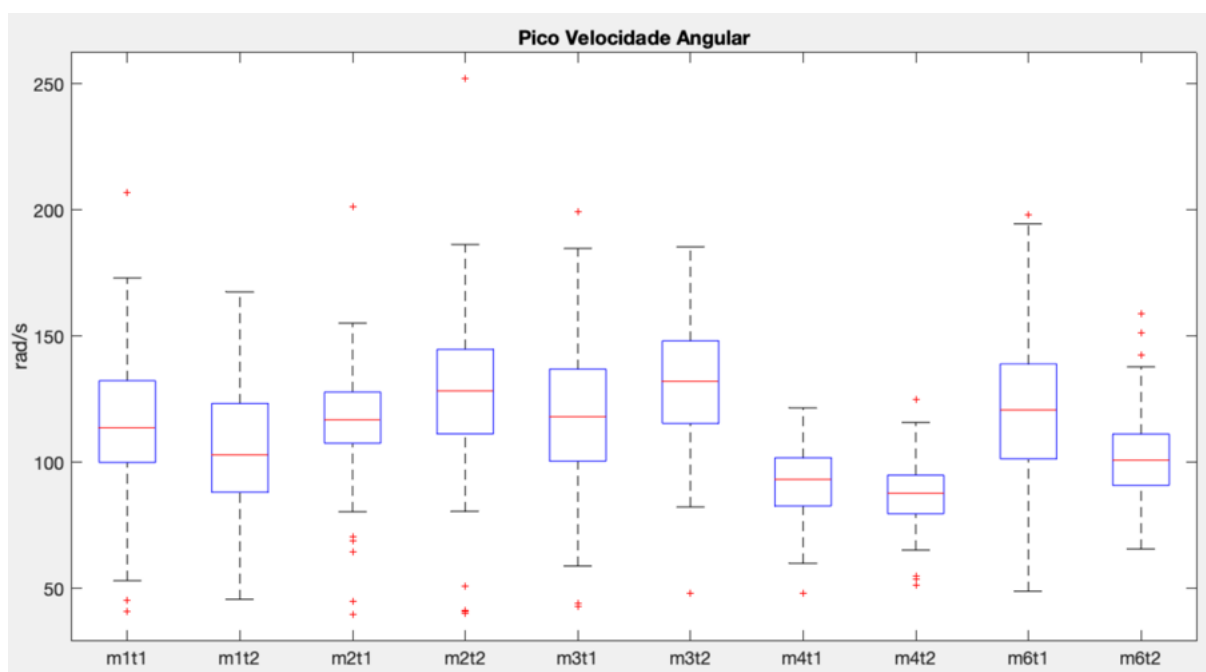


Figura 182: Boxplot da velocidade angular de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4.

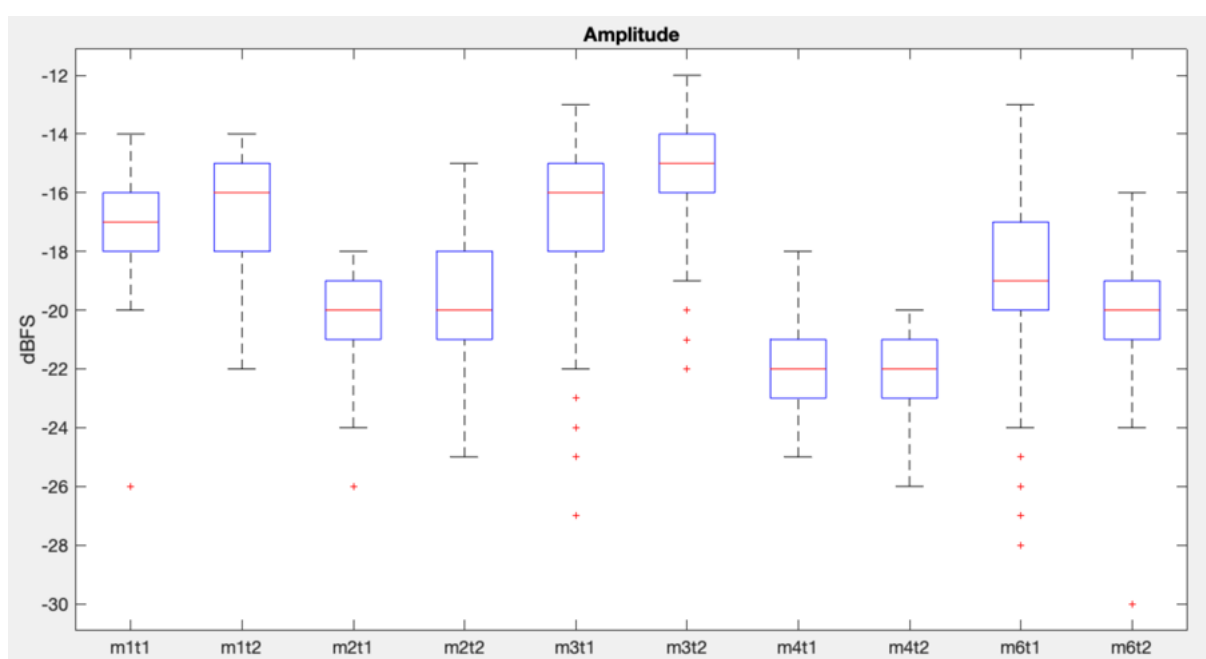


Figura 183: Boxplot das amplitudes de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4.

(Figura 184). Destacam-se a elevada regularidade de M4, a maior variabilidade apresentada por M1 e a notável simetria da dispersão observada em todos os músicos.

A análise integrada dos músicos na corda 4 revela um conjunto de tendências gerais com algumas distinções individuais relevantes. No plano tímbrico, apenas M1 se afasta

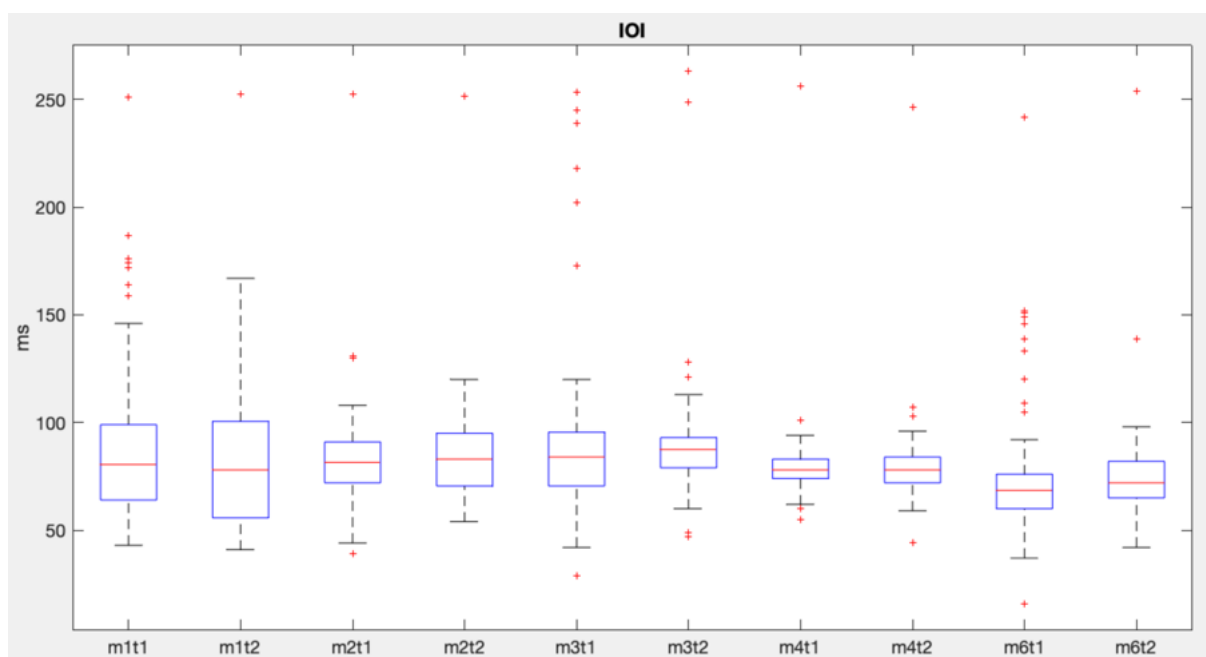


Figura 184: Boxplot dos valores de IOI de todos os músicos, nos dois takes do tremolo direto corda 4.

nitidamente dos demais, concentrando energia em uma região espectral mais aguda, enquanto a maioria permanece em faixas próximas e mais estáveis. Gestualmente, forma-se um agrupamento claro: M3 e M4 apresentam os gestos mais controlados e compactos, M1 e M2 situam-se em uma zona intermediária, e M6 demonstra o maior nível de variabilidade, especialmente entre os takes. Apesar dessas diferenças, as velocidades angulares convergem para uma mesma faixa de atuação, indicando uniformidade no padrão rotacional do gesto.

Dinamicamente, M1 e M3 produzem ataques mais intensos, M4 se mantém como o mais regular e suave, e M6 exibe maior dispersão, aproximando-se de um comportamento mais energético e irregular. Ritmicamente, todos os músicos convergem para a mesma faixa de IOIs, sugerindo um limite comum de velocidade; dentro desse quadro, destacam-se a regularidade de M4, a maior variabilidade de M1 e uma distribuição simétrica dos valores entre todos os participantes.

Os resultados do tremolo direto mostram que a troca entre a corda 1 e a corda 4 produz diferenças claras na organização do gesto, embora sem alterar a essência técnica do movimento alternado. Em termos rítmicos, os IOIs tendem a ser mais regulares na corda 1, enquanto na corda 4 observam-se variações iniciais mais acentuadas até que o gesto se estabilize, indicando maior necessidade de ajuste em uma corda posicionada na parte mais

central do instrumento. No domínio gestual, a corda 1 costuma exigir maior energia: os picos de aceleração linear e velocidade angular são, em geral, mais elevados, com direções gestuais mais estáveis; já a corda 4 apresenta picos menores e mais homogêneos.

Do ponto de vista dinâmico, as amplitudes tendem a ser maiores na corda 1 e mais uniformes na corda 4, refletindo o modo como o gesto se adapta a elas. Nas forças aplicadas na palheta, também há diferenças: na corda 1 observa-se mais equilíbrio entre polegar e indicador, enquanto na corda 4 o indicador assume papel mais dominante. Em síntese, a corda 1 enfatiza velocidade, energia e responsividade do gesto, enquanto a corda 4 destaca estabilidade, economia motora e menor variabilidade, revelando adaptações da técnica frente a posição no instrumento de cada corda.

Observaremos agora a segunda situação de estudo do tremolo, em acelerando. O objetivo é identificar a mudança de estratégia gestual e comparar a consistência dos movimentos entre os takes e entre os músicos.

#### 5.1.2.2 Tremolo Progressivo

A técnica de tremolo progressivo, analisada nesta segunda etapa do estudo, difere do tremolo direto ao introduzir um componente gradual de aceleração, no qual o músico aumenta progressivamente a velocidade dos ataques. Em vez de partir imediatamente do regime máximo — como observado na seção anterior —, o performer precisa ajustar continuamente sua coordenação motora à medida que os intervalos entre notas se tornam cada vez menores. Essa característica transforma o tremolo progressivo em um laboratório privilegiado para compreender como o gesto se reorganiza ao longo da aceleração.

Diferentemente do tremolo direto, nesta sessão não analisamos os picos de aceleração linear ou de velocidade angular. Em seu lugar, utilizamos as curvas contínuas dos eixos do IMU, permitindo observar diretamente como cada componente gestual — tanto na translação quanto na rotação — se adapta ao aumento gradual da demanda temporal. Essa abordagem pode revelar nuances importantes: mudanças de predominância entre eixos, inflexões abruptas ou suaves, reorganizações gestuais intermediárias e estratégias individuais de estabilização e compensação. Em outras palavras, mais do que identificar a intensidade dos gestos em pontos isolados, buscamos compreender como o gesto se transforma ao longo do percurso acelerado.

A análise do tremolo progressivo, portanto, complementa a do tremolo direto ao

expor o processo de ajuste motor que antecede a chegada ao regime rápido. Essa perspectiva processual possibilita identificar a forma com que cada músico se comporta durante a aceleração, oferecendo um panorama completo da técnica sob condições de crescente complexidade biomecânica.

### Tremolo Progressivo na Corda 1

Os dois takes de M1 apresentam forte semelhança estrutural, com diferenças apenas pontuais na regularidade dos IOIs, como ilustrado nas Figura 185 e Figura 186, onde pequenos trechos exibem um padrão de zigue-zague mais evidente. As palhetadas descendentes tendem a ser ligeiramente mais intensas que as ascendentes, embora o perfil dinâmico geral permaneça concentrado em uma faixa estreita de variação. No domínio gestual, o aumento progressivo da velocidade produz efeitos claros sobre os eixos dominantes. Na translação da mão, o eixo y intensifica sua participação, tanto em amplitude quanto em frequência, enquanto os demais eixos apresentam crescimento mais discreto. Na rotação, observa-se comportamento complementar: o eixo z, principal responsável pelo gesto, aumenta sua intensidade e frequência ao longo do trecho, ao passo que os eixos secundários reduzem sua contribuição relativa, embora também acompanhem o incremento da frequência global do movimento. Nos dois takes podemos ver uma estabilização, tanto de IOIs quanto gestual, por volta de 10.000 ms.

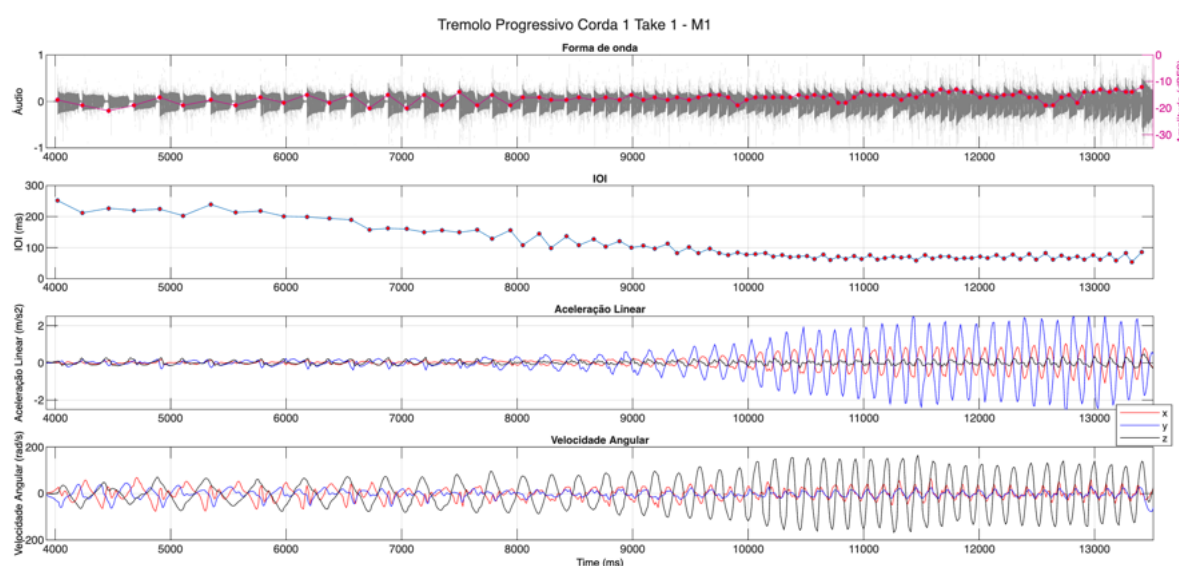


Figura 185: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M1.

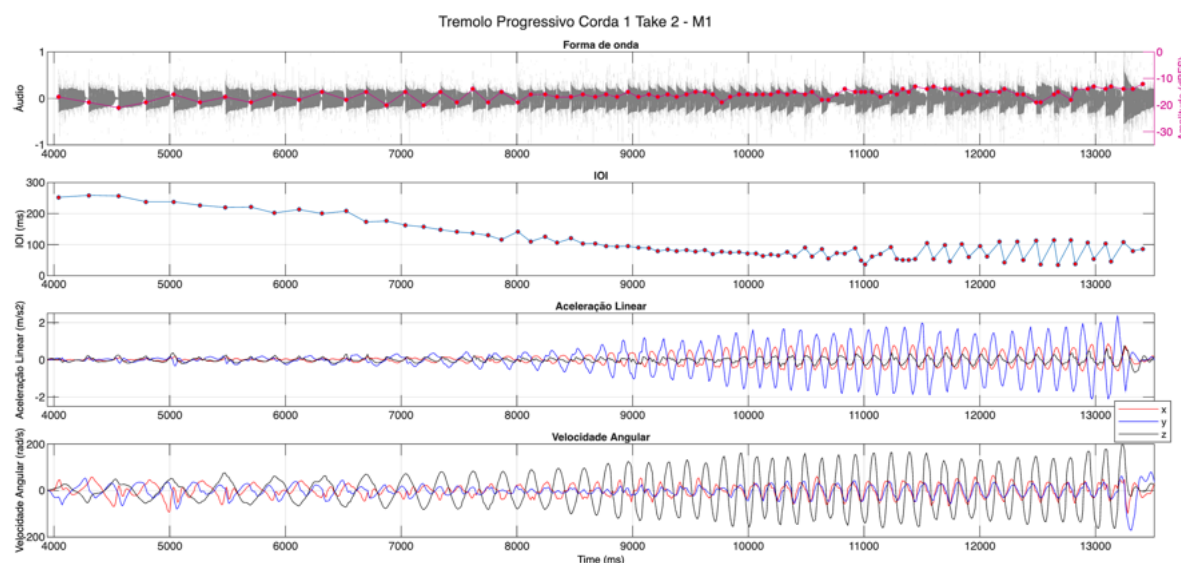


Figura 186: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M1.

Os takes de M2 (Figura 187 e Figura 188) são altamente semelhantes entre si. Assim como observado em M1, as palhetadas descendentes tendem a apresentar maior intensidade que as ascendentes, efeito que se torna mais evidente à medida que a velocidade máxima é atingida. No domínio temporal, os IOIs passam a apresentar oscilações mais marcadas quando o regime rápido se estabiliza. Do ponto de vista gestual, as acelerações lineares no eixo  $x$  permanecem discretas ao longo de todo o trecho, enquanto os eixos  $y$  e  $z$  — atuando de forma sincronizada — aumentam sua intensidade com a aceleração do tremolo, com clara predominância do eixo  $y$ . Na velocidade angular, o eixo  $z$ , que constitui o principal componente rotacional do gesto, mantém sua intensidade relativamente estável, modificando sobretudo sua frequência de ocorrência conforme o aumento da velocidade. A estabilização dos gestos e dos IOIs ocorre por volta de 9.000 ms.

Os takes de M3 apresentam maior variabilidade e menor regularidade interna quando comparados aos demais músicos. No primeiro registro (Figura 189), observa-se uma execução marcada por oscilações dinâmicas mais amplas, enquanto os IOIs exibem menor dispersão no regime de velocidade máxima. Diferentemente do que ocorre em outros participantes, o eixo  $y$  — embora predominante na translação da mão — não apresenta uma trajetória regular, aproximando-se em intensidade dos demais eixos e revelando um gesto mais irregular e multidirecional. No domínio rotacional, o eixo  $z$  adquire protagonismo relativo, pois, em vários momentos, sua intensidade se iguala à dos demais

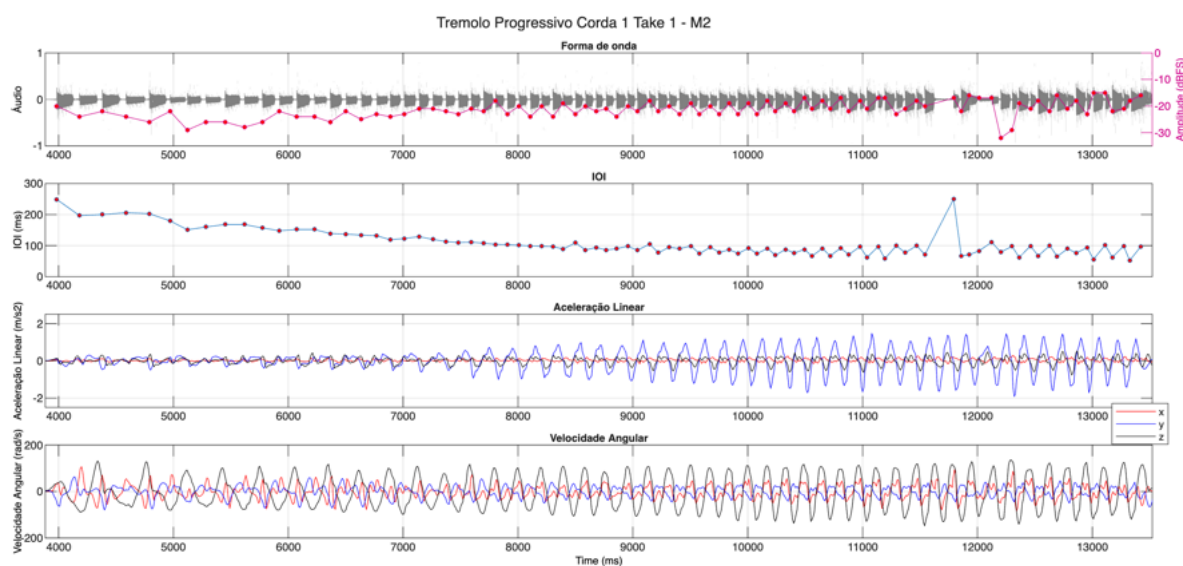


Figura 187: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M2.

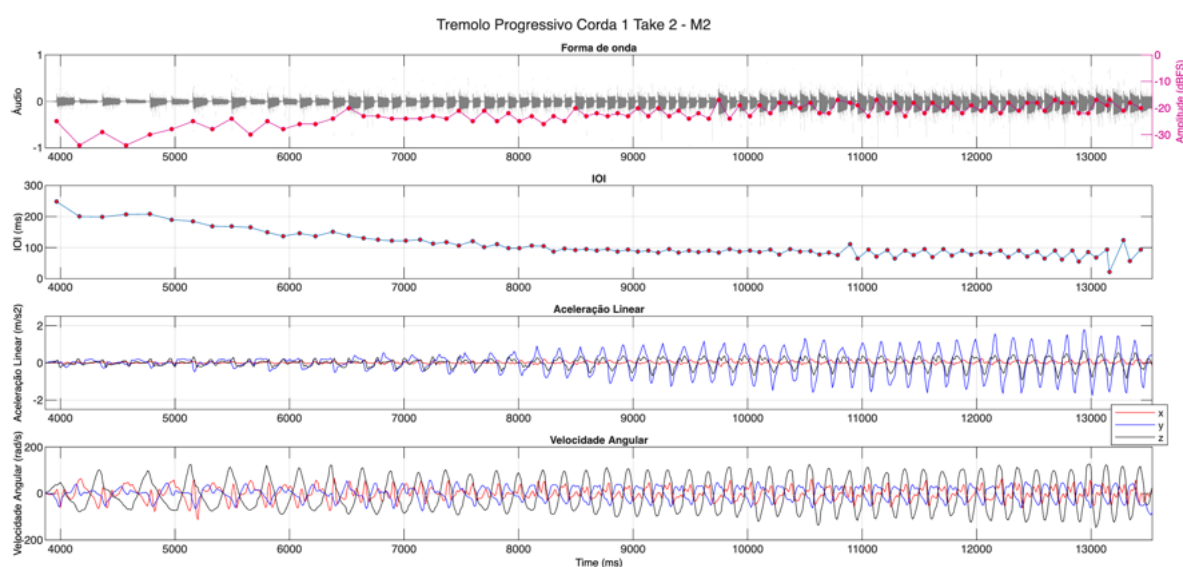


Figura 188: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M2.

eixos, indicando um padrão de rotação menos hierarquizado e mais distribuído entre os componentes do movimento. A estabilização gestual ocorre entre 8.000 e 9.000 ms.

No segundo take (Figura 190), o perfil dinâmico mantém a irregularidade observada no registro anterior, e os IOIs apresentam oscilações mais marcadas, evidenciando maior instabilidade temporal em trechos específicos. No domínio gestual, as translações no regime de velocidade máxima exibem intensidades menores em comparação ao primeiro take, enquanto as rotações preservam o mesmo padrão estratégico previamente observado.

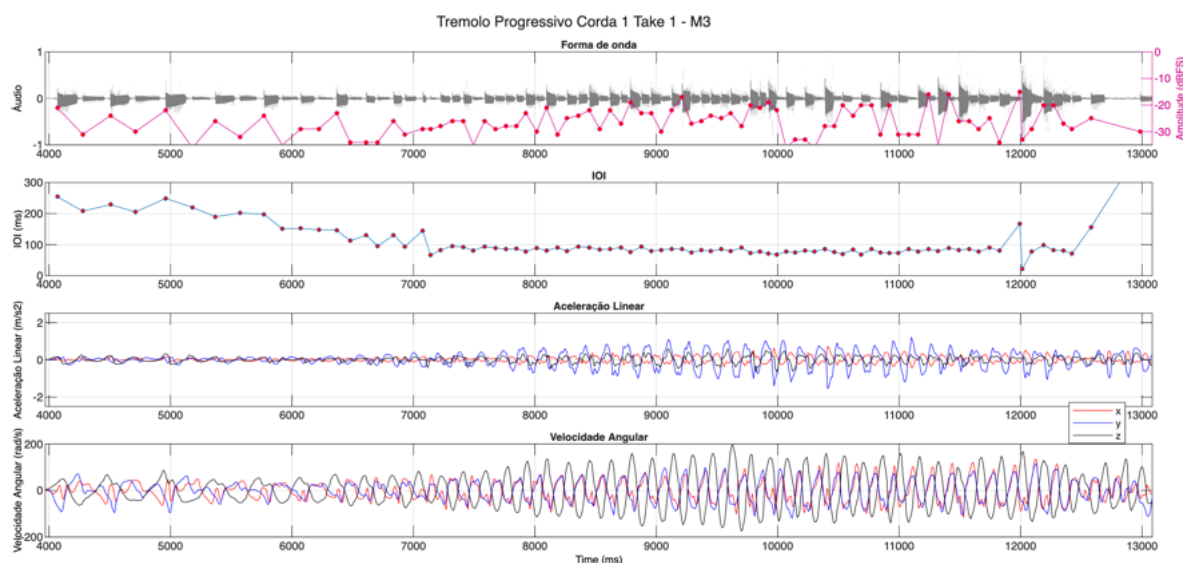


Figura 189: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M3.

Assim como no take 1, a estabilidade gestual ocorre entre 8.000 e 9.000 ms.

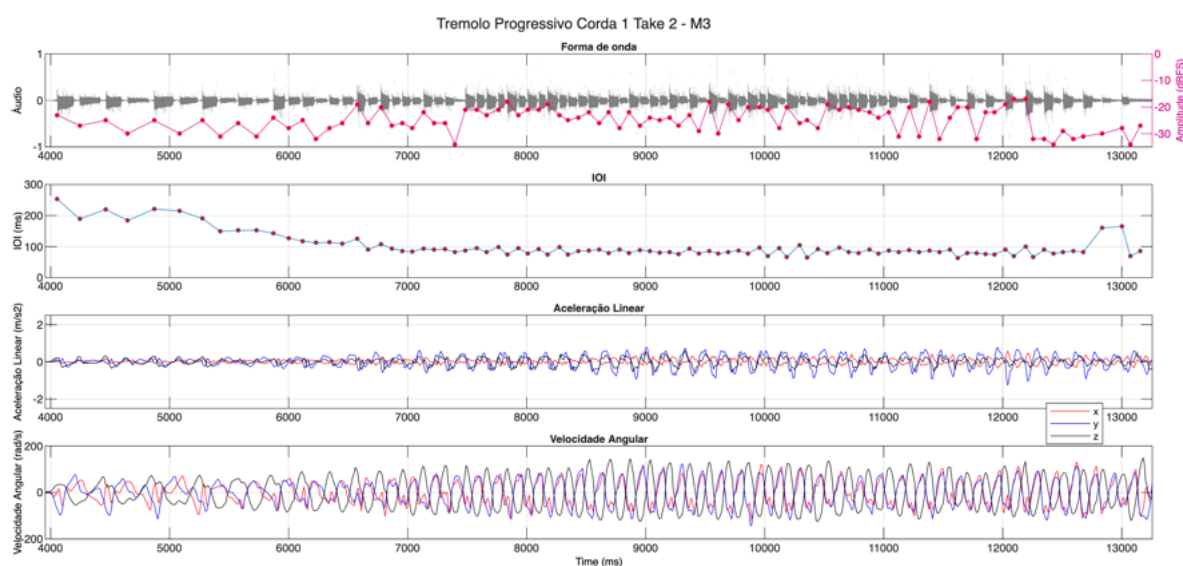


Figura 190: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M3.

Os dois takes de M4 apresentam grande similaridade estrutural, como ilustram a Figura 191 e Figura 192. O perfil dinâmico revela instabilidade considerável, embora essa flutuação não se manifeste de forma equivalente nos IOIs, que permanecem mais regulares ao longo do trecho. No domínio gestual, a aceleração linear é marcada pela predominância consistente do eixo y, especialmente estável no regime de velocidade máxima. Já na velocidade angular, o eixo z — principal responsável pela rotação da mão — apresenta

valores mais elevados antes da estabilização da velocidade, sugerindo um ajuste rotacional inicial preparatório para o trecho de exigência. Por volta de 8.000 ms podemos identificar a estabilização dos gestos.

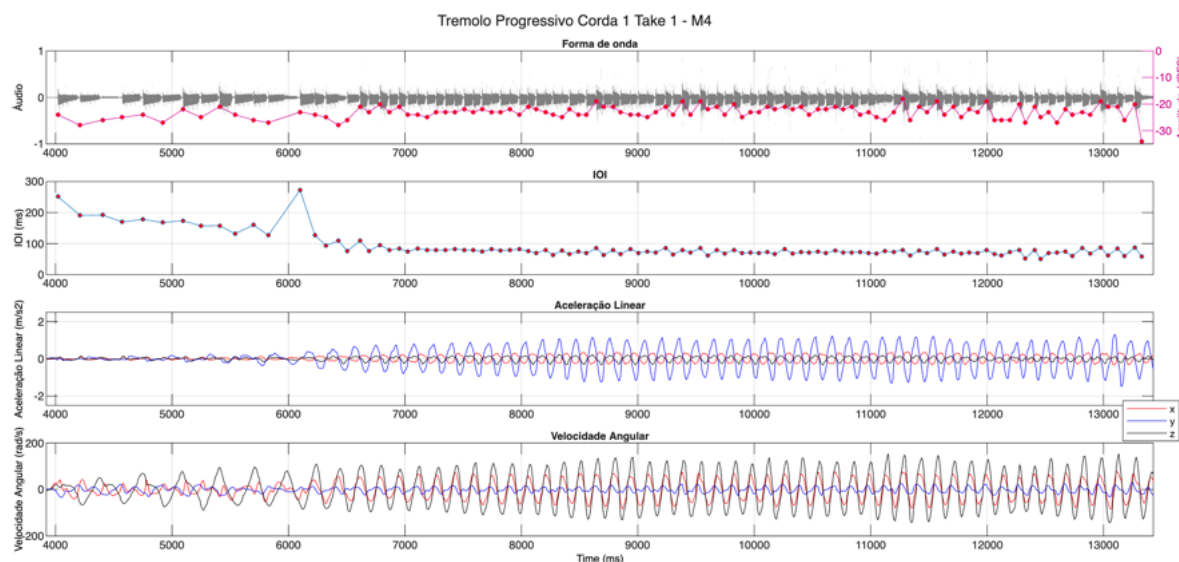


Figura 191: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M4.

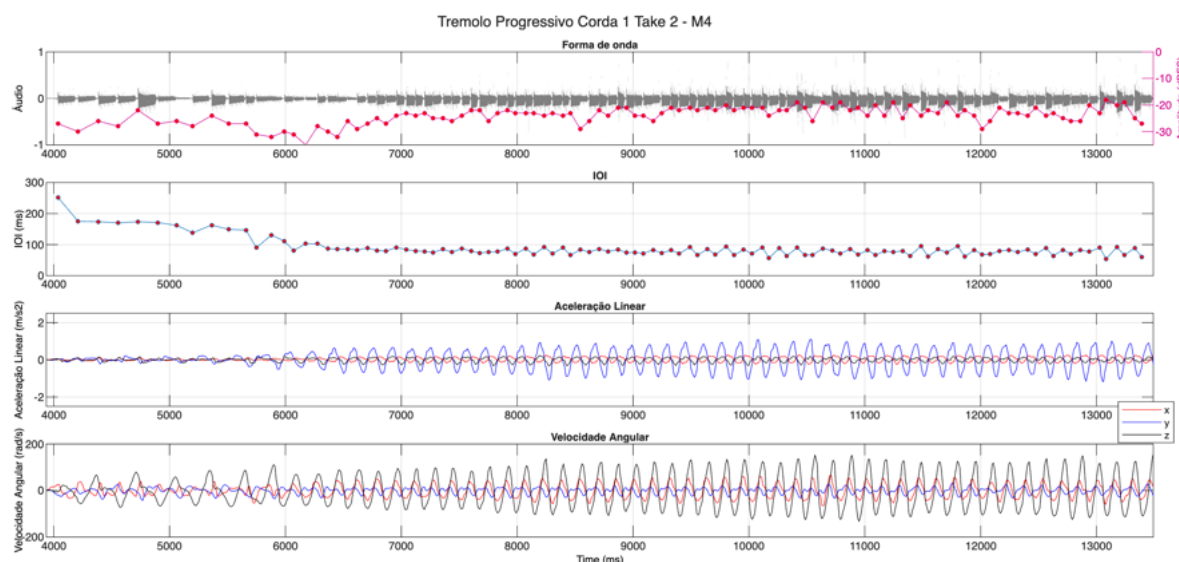


Figura 192: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M4.

Os takes de M6 (Figura 193 e Figura 194) apresentam diferenças expressivas tanto no comportamento dinâmico quanto no gestual. No primeiro registro, o perfil dinâmico é mais regular, enquanto no segundo observa-se maior dispersão, incluindo trechos com

amplitudes reduzidas. Os IOIs seguem uma trajetória semelhante à dos demais músicos, ainda que o take 2 apresente falhas de notas que interrompem momentaneamente a continuidade do padrão. Na translação da mão, o take 1 adota uma estratégia gestual compatível com a de outros intérpretes: predominância marcada do eixo y, com pouca participação dos demais eixos, porém com intensidades elevadas. A estabilização gestual para esse registro corre a partir de 10.000 ms. Já no take 2 ocorre uma queda significativa da intensidade de y no meio do regime de velocidade estabilizada, o que pode estar relacionado ao aumento das distâncias entre onsets observado nesse trecho. A rotação da mão apresenta, em ambos os takes, um padrão semelhante: antes da estabilização da velocidade, os eixos x e z exibem valores altos; após a transição para o regime rápido, o gesto reorganiza-se e o eixo z assume protagonismo exclusivo. A estabilidade gestual aqui ocorre logo após 9.000 ms. Esse comportamento sugere uma estratégia específica de preparação rotacional para alcançar e manter a velocidade máxima do tremolo.

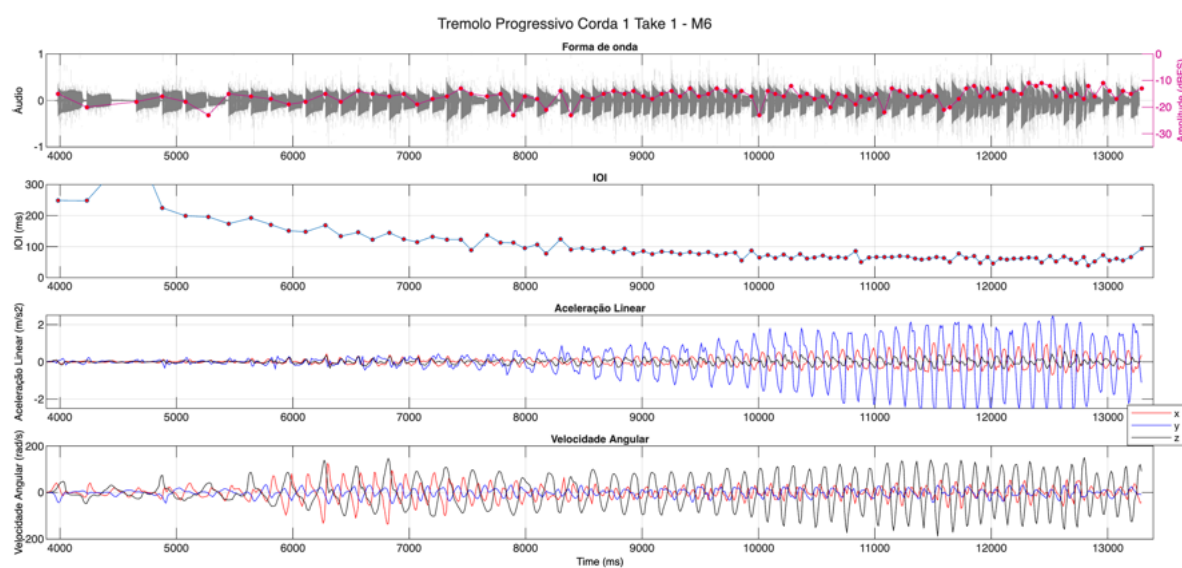


Figura 193: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 1, realizado por M6.

A análise comparativa entre os músicos revela diferentes abordagens gestuais durante o tremolo progressivo na corda 1. Em termos de amplitude (Figura 195), M1 e M6 apresentaram valores médios mais elevados, com M1 bem consistente, denotando controle e projeção sonora mais estáveis. M3, por outro lado, exibiu amplitudes menores e irregularidade entre takes, possivelmente associadas a variações na força e na coordenação do gesto, assim como M6. M2 e M4 ocupam faixas medianas de amplitude sonora do grupo,

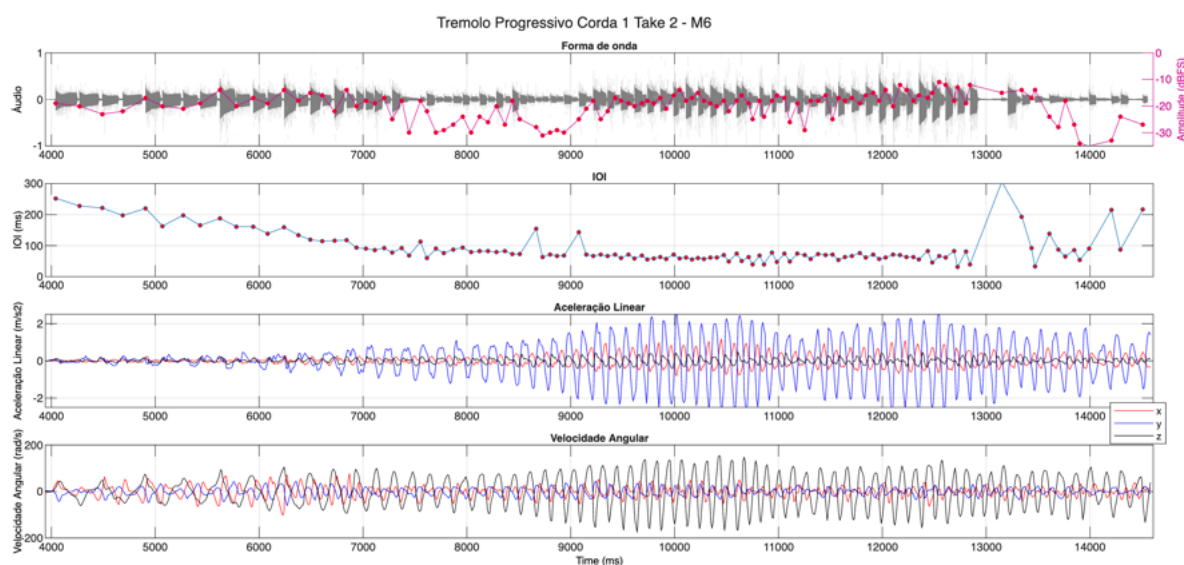


Figura 194: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 1 take 2, realizado por M6.

com M2 ligeiramente mais disperso na tendência central.

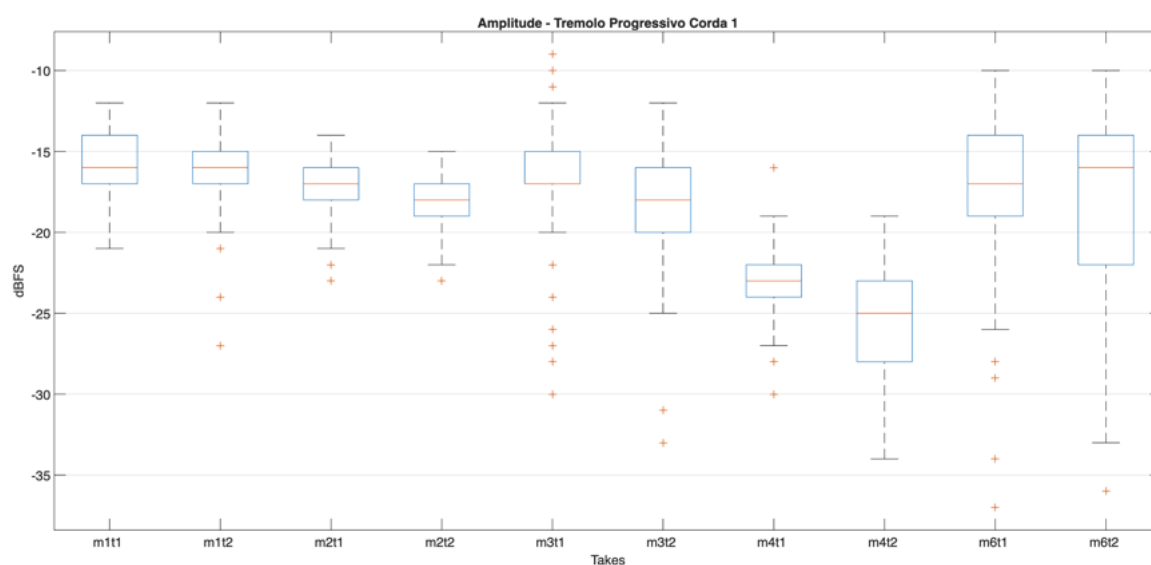


Figura 195: Boxplot das amplitudes sonoras de todos os músicos no tremolo progressivo corda 1.

Em relação ao centroide espectral (Figura 196) os músicos ocupam a faixa entre 1 e 2 vezes de maior energia comparada à frequência fundamental, com M1 e M4 bem compactos na variabilidade e M3 e M6 mais inconstantes entre os takes, com destaque para várias medidas distantes das observações comuns.

A análise conjunta do tremolo progressivo na corda 1 evidencia que, embora todos os músicos utilizem princípios gestuais semelhantes para alcançar o regime de alta veloci-

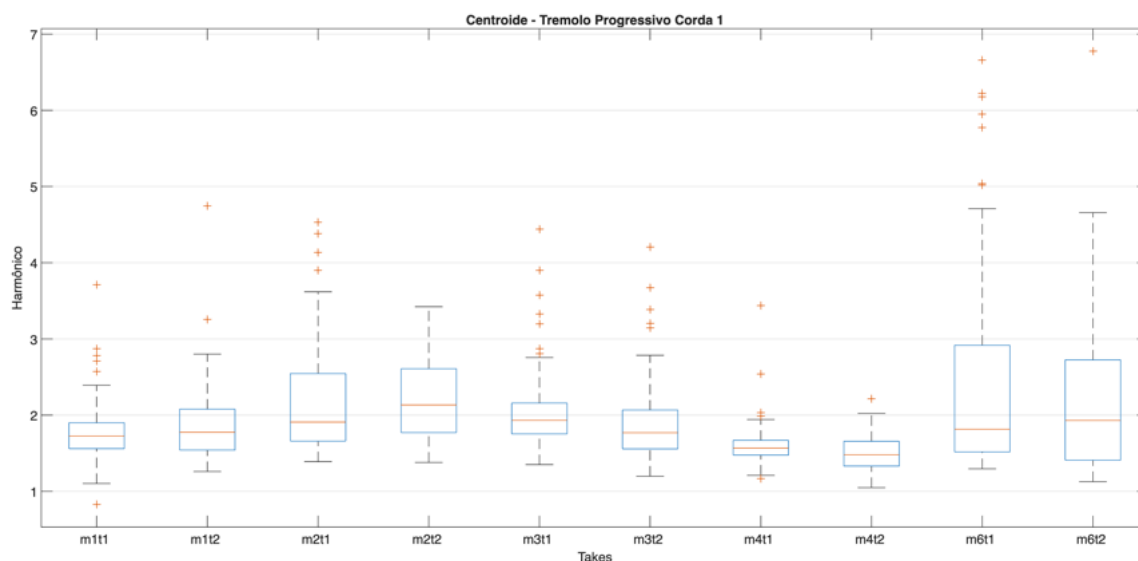


Figura 196: Boxplot do centroide espectral de todos os músicos no tremolo progressivo corda 1.

dade, cada performer organiza esses elementos de maneira particular. Sonoramente, M1 e M6 apresentam amplitudes mais elevadas — com M1 mais estável e M6 mais irregular —, enquanto M2 e M4 ocupam faixas intermediárias e M3 demonstra maior variabilidade entre os takes. No centroide espectral, M1 e M4 mantêm distribuição mais compacta, ao passo que M3 e M6 exibem valores mais dispersos.

Os IOIs mostram diferenças importantes na adaptação ao acelerando: M1, M2 e M4 tendem à estabilidade quando a velocidade máxima se estabelece, enquanto M3 e M6 apresentam oscilações mais marcadas e irregularidades entre os takes. Ainda assim, todos convergem para uma faixa comum de desempenho rápido.

Gestualmente, o eixo y domina a translação e o eixo z a rotação, especialmente no regime estabilizado, constituindo o padrão mais consistente entre os músicos. As diferenças surgem no percurso até esse ponto: alguns apresentam crescimento gestual gradual e organizado (como M1 e M4), enquanto outros reorganizam intensidade e direção ao longo do trecho (como M3 e M6).

Em conjunto, o tremolo progressivo na corda 1 revela uma técnica marcada por um núcleo gestual compartilhado, sobre o qual cada performer desenvolve ajustes individuais para acomodar velocidade, controle sonoro e regularidade temporal.

Realizaremos agora uma análise semelhante com o tremolo progressivo na corda 4, que por sua posição no instrumento (entre duas cordas) e tipo de corda diferente

(envolvida com metal) pode trazer situações gestuais e de expressão rítmica diferentes.

### Tremolo Progressivo na Corda 4

Nos dois takes apresentados na Figura 197 e Figura 198, M1 mantém um gesto altamente estável e coerente entre as execuções. O perfil dinâmico apresenta pouca variação interna, sem influência perceptível da direção da palhetada na amplitude. Os IOIs exibem, como observado na corda 1, trechos curtos com oscilações mais irregulares, mas dentro de um padrão geral de boa estabilização no regime estabilizado. As curvas de translação e rotação seguem a mesma organização gestual já identificada na corda 1, embora com intensidades mais discretas em todos os eixos. No take 1, após 9.000 ms percebemos instabilidade nos IOIs – apesar de o gesto apresentar estabilidade – que se tornam menos dispersos por volta de 11.000 ms. Já no take 2 a estabilidade geral ocorre em 11.000 ms, após uma queda das amplitudes.

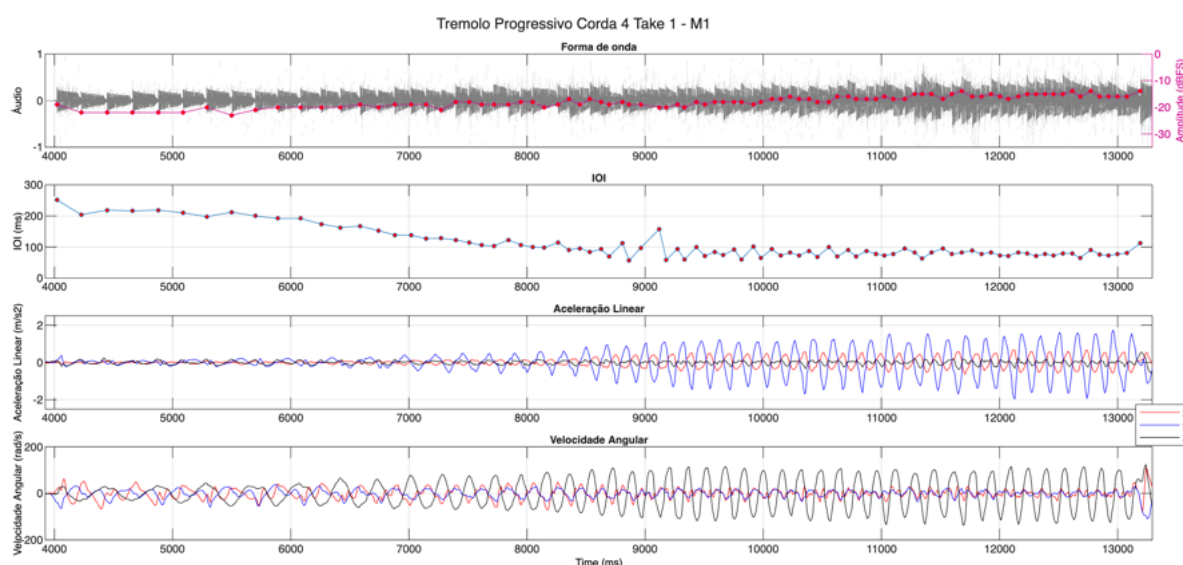


Figura 197: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M1.

Os dois takes de M2 (Figura 199 e Figura 200) apresentam grande semelhança geral, tanto no comportamento sonoro quanto no gesto. As amplitudes permanecem dentro de uma mesma faixa nas duas execuções, com diferenças entre palhetadas descendentes e ascendentes mais evidentes no take 1. Os IOIs exibem alguns pontos isolados fora do fluxo, associados a falhas de ataque, mas é possível identificar trechos com oscilações mais marcadas no padrão temporal. No domínio gestual, destaca-se a atuação inicial mais intensa do eixo x na rotação, que se atenua à medida que o gesto se estabiliza,

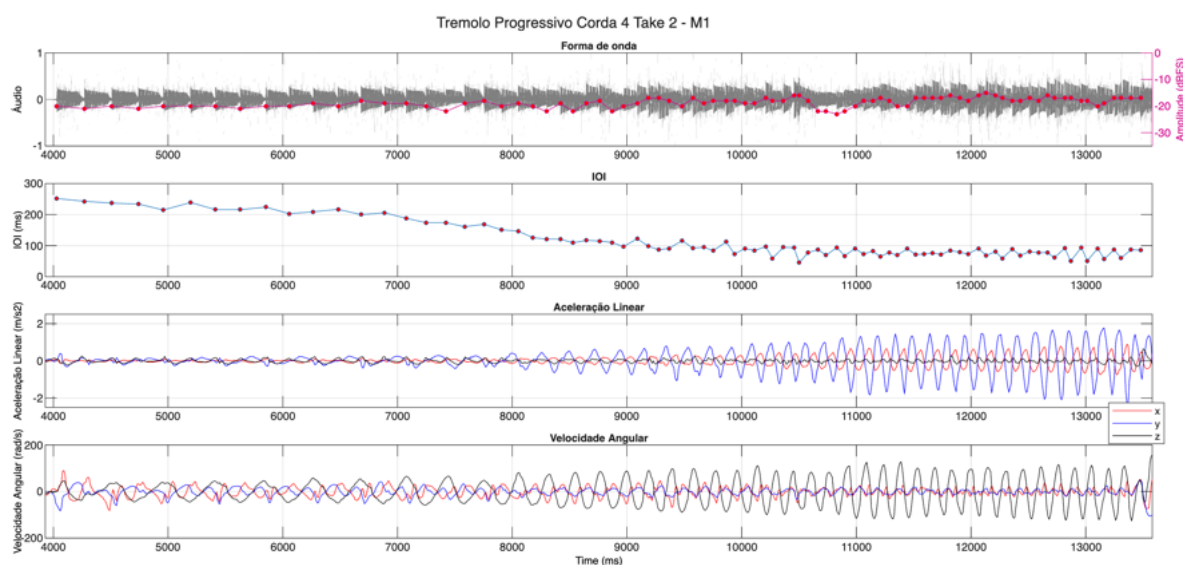


Figura 198: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M1.

momento em que o eixo z passa a predominar — embora com amplitudes menores que as registradas na corda 1. Na translação da mão, o eixo y domina ao longo de todo o trecho, intensificando-se progressivamente no regime de velocidade máxima. Após 9.000 ms percebemos uma estabilidade geral.

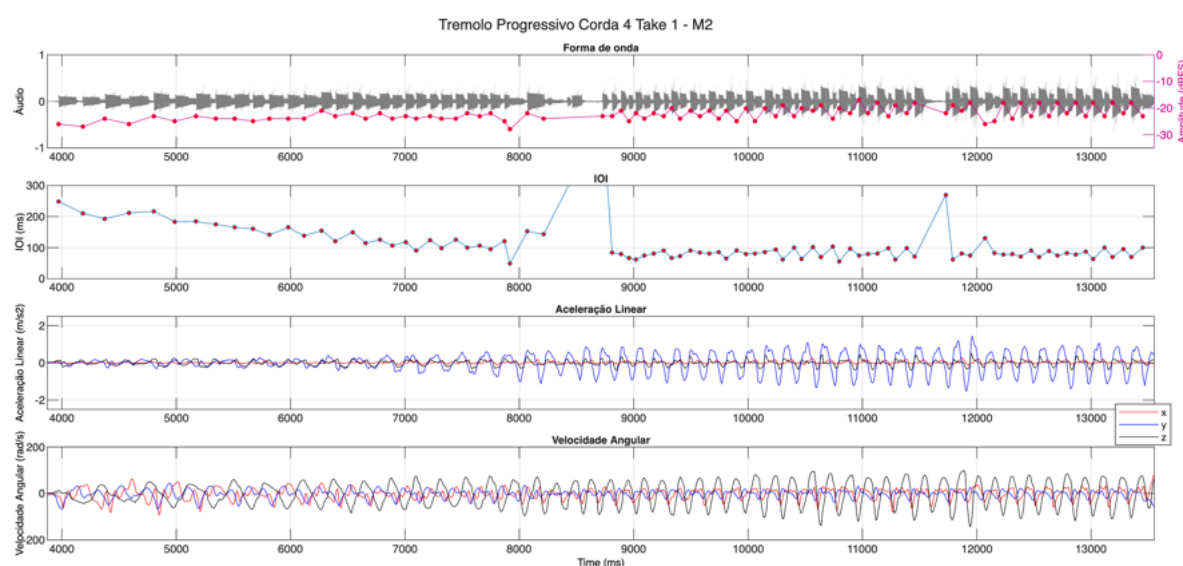


Figura 199: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M2.

No caso de M3 (Figura 201 e Figura 202), os dois takes apresentam uma execução mais irregular, com um perfil dinâmico no qual as palhetadas descendentes são mais intensas apenas em trechos pontuais, não permitindo afirmar que a direção da palheta

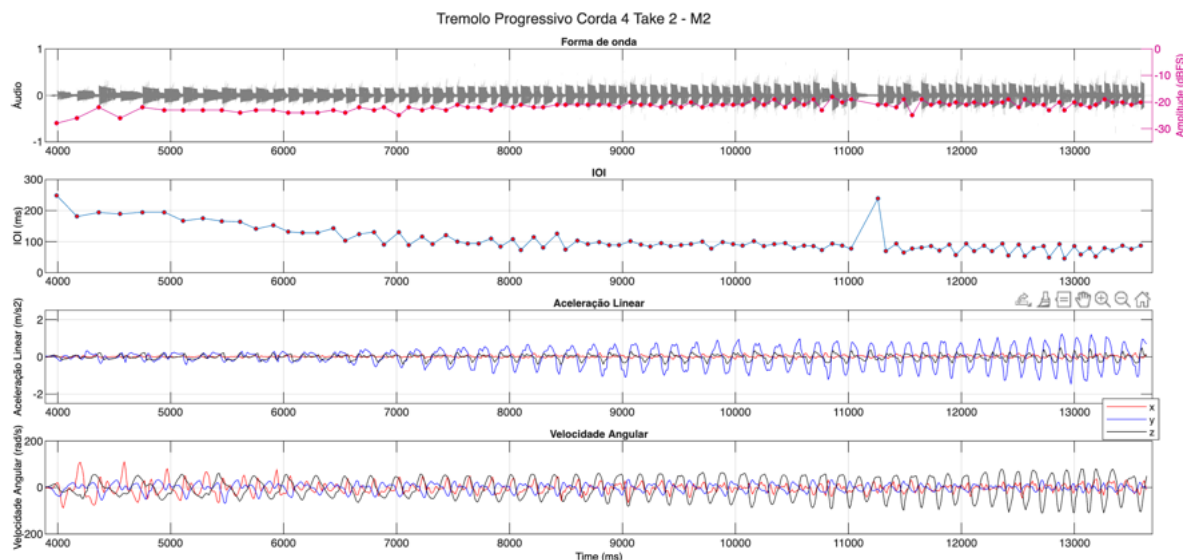


Figura 200: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M2.

influencia de maneira consistente as amplitudes. Os IOIs mantêm o comportamento observado nos demais músicos: ocorrência de valores elevados devido à ausência de ataques em pontos específicos e trechos com oscilações mais marcadas no padrão temporal. Em comparação com a corda 1, as acelerações lineares apresentam redução significativa, e não se observa um padrão consistente ao longo do trecho, uma vez que as relações entre os eixos variam continuamente. As velocidades angulares mostram atuação equilibrada dos três eixos, com intensidades menores que as registradas na corda 1, exibindo x e y em fase e o eixo z defasado aproximadamente 180 graus. A estabilidade para os dois takes ocorre após 9.000 ms.

O desempenho de M4 apresenta elevada consistência entre os dois takes (Figura 203 e Figura 204). No perfil dinâmico, o take 1 se mostra ligeiramente mais estável, enquanto os IOIs exibem uma evolução temporal semelhante ao padrão já observado nos demais músicos. No âmbito gestual, as translações e rotações reproduzem o comportamento identificado na corda 1, porém com intensidades gerais menores. Destaca-se que o eixo z da velocidade angular mantém seu padrão característico ao longo de todo o trecho, independente da velocidade atingida pelo tremolo. No primeiro take percebemos estabilidade geral a partir de 9.000 ms, e no segundo take a partir de 8.000 ms.

Nas Figura 205 e Figura 206, observa-se que M6 adota uma abordagem gestual mais contrastante entre os dois takes. No primeiro, a intensidade da translação no eixo y é mais

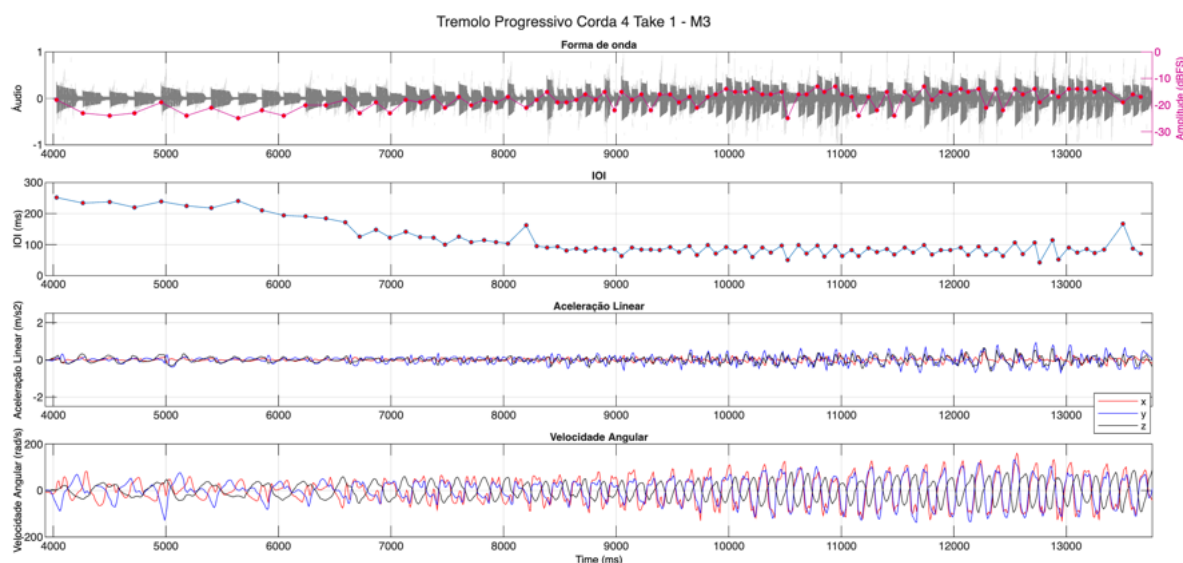


Figura 201: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M3.

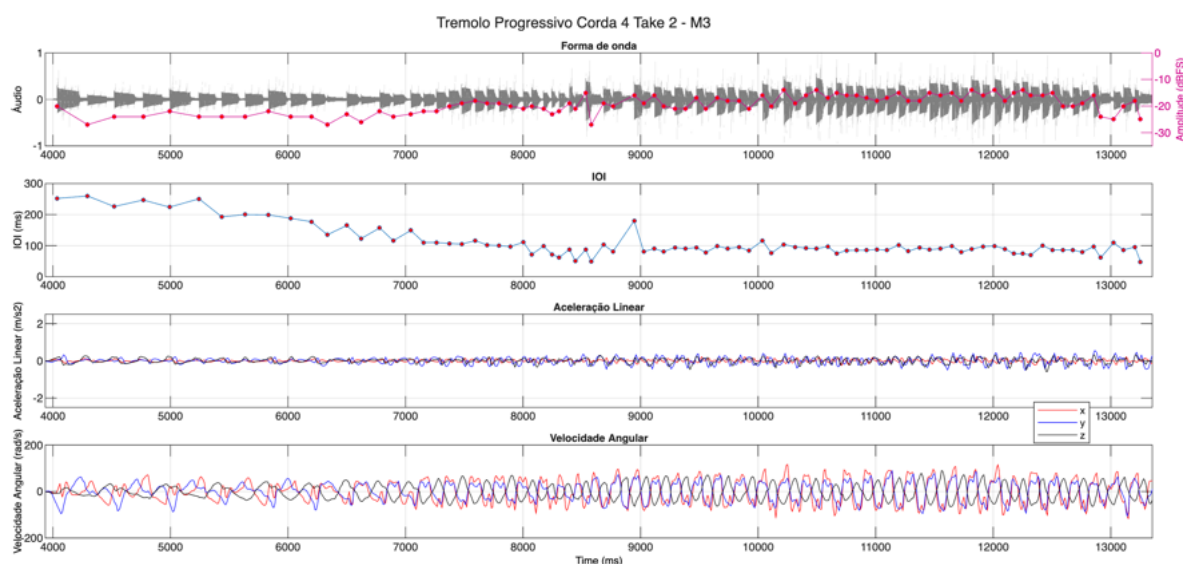


Figura 202: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M3.

moderada e apresenta menor frequência de oscilação, enquanto no segundo take esse eixo atua de forma mais intensa e recorrente, ainda que os IOIs permaneçam agrupados na mesma faixa temporal em ambas as execuções. No domínio rotacional, identificam-se dois regimes claros: durante o acelerando, os eixos contribuem de maneira mais equilibrada para o movimento; após a estabilização da velocidade, o eixo z passa a prevalecer, embora o eixo x mantenha participação significativa na composição do gesto. O perfil dinâmico apresenta um contorno semelhante nos dois takes, com estabilidade geral no take 1 a

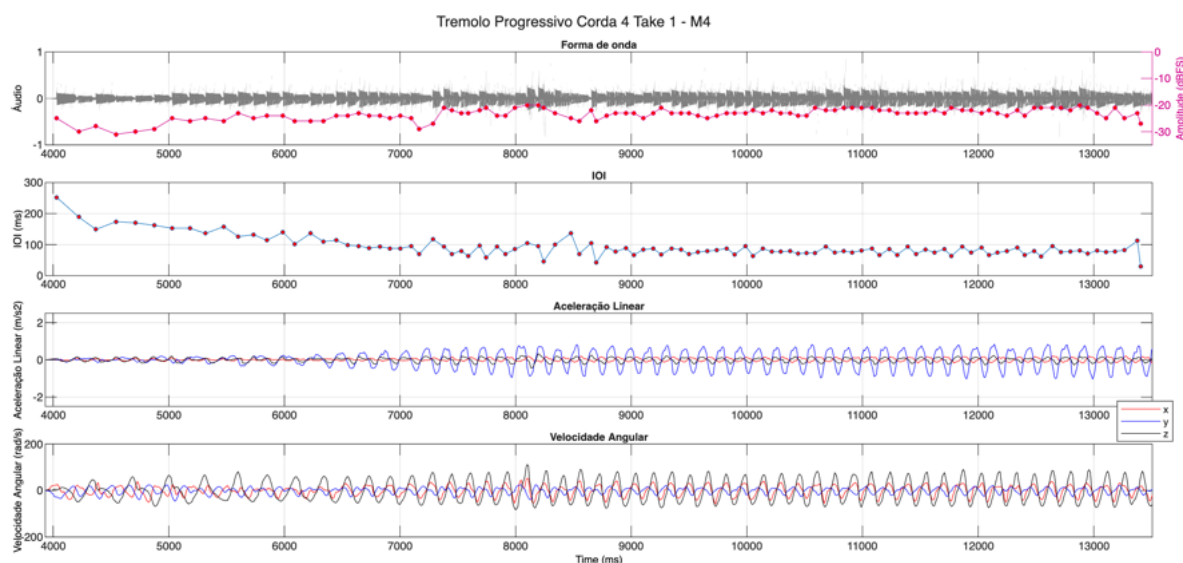


Figura 203: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M4.

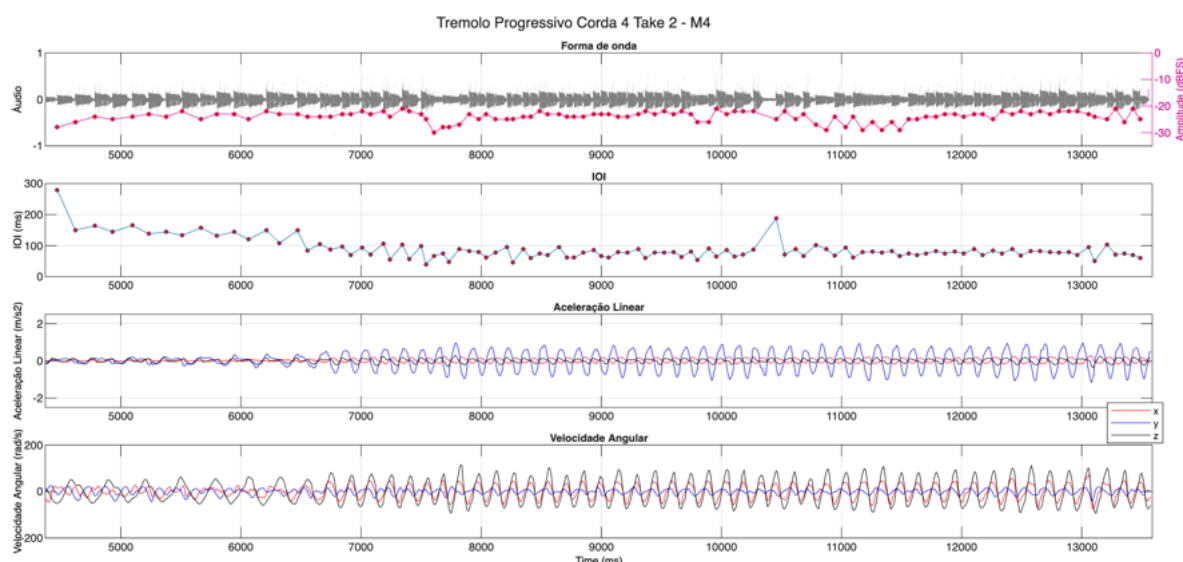


Figura 204: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M4.

partir de 9.000 ms – com busca de outros pontos de estabilidade –, e no take 2 a partir de 9.500 ms, com ajustes no final.

Na análise conjunta, a Figura 207 evidencia os padrões dinâmicos dos participantes. Observa-se que M1, M3 e M6 apresentam intensidades mais elevadas, enquanto M4 se destaca pela regularidade entre os dois takes. As dispersões são, em geral, semelhantes entre os músicos, com reduções mais perceptíveis apenas em M2T2 e M6T2. Nota-se ainda que a maior parte dos intérpretes apresenta distribuições assimétricas de amplitude.

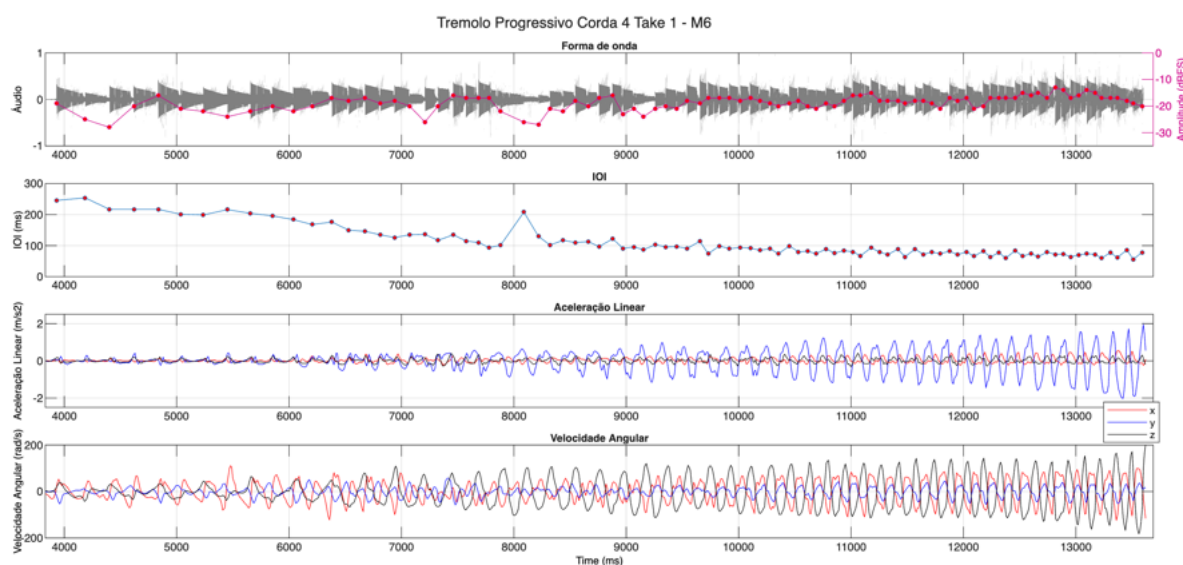


Figura 205: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 1, realizado por M6.

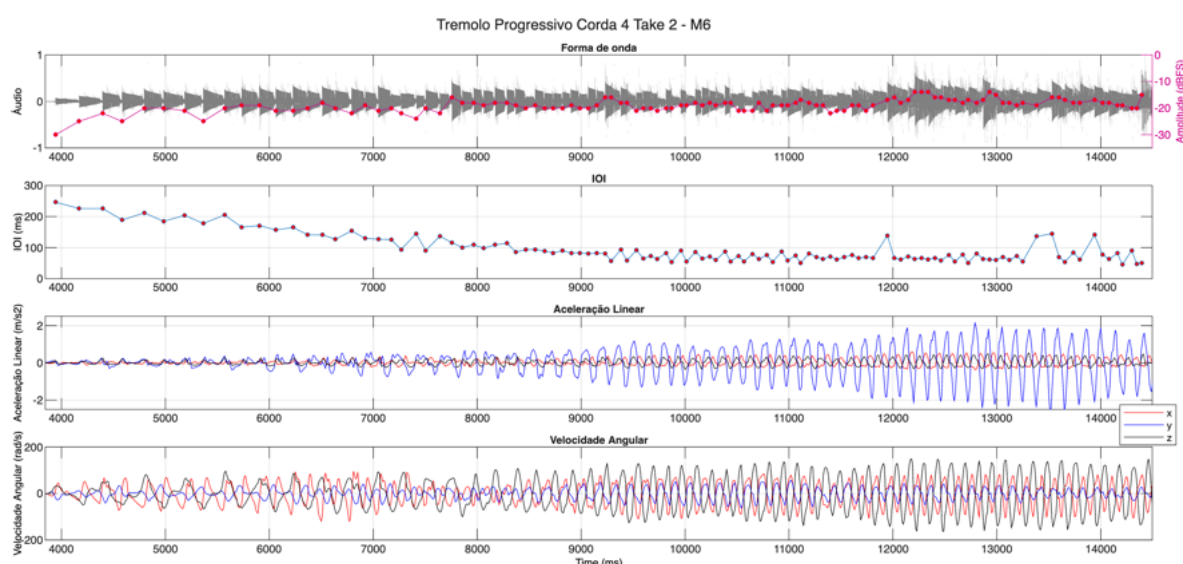


Figura 206: Amplitude, IOI, FRS, Aceleração Linear e Velocidade Angular (x, y, z) no tremolo progressivo corda 4 take 2, realizado por M6.

No que diz respeito ao timbre (Figura 208), M1 se destaca por concentrar energia entre o terceiro e o quarto harmônicos, ao passo que os demais músicos apresentam maior incidência no segundo harmônico. Entre eles, M2, M3 e M4 exibem menor dispersão, enquanto M6 apresenta elevada variabilidade, marcada por numerosos outliers.

O tremolo progressivo na corda 4 revela um conjunto de estratégias amplamente consistentes entre os músicos, ainda que com particularidades individuais. M1 e M2 apresentam os gestos mais estáveis, com amplitudes concentradas em faixas estreitas, IOIs bem

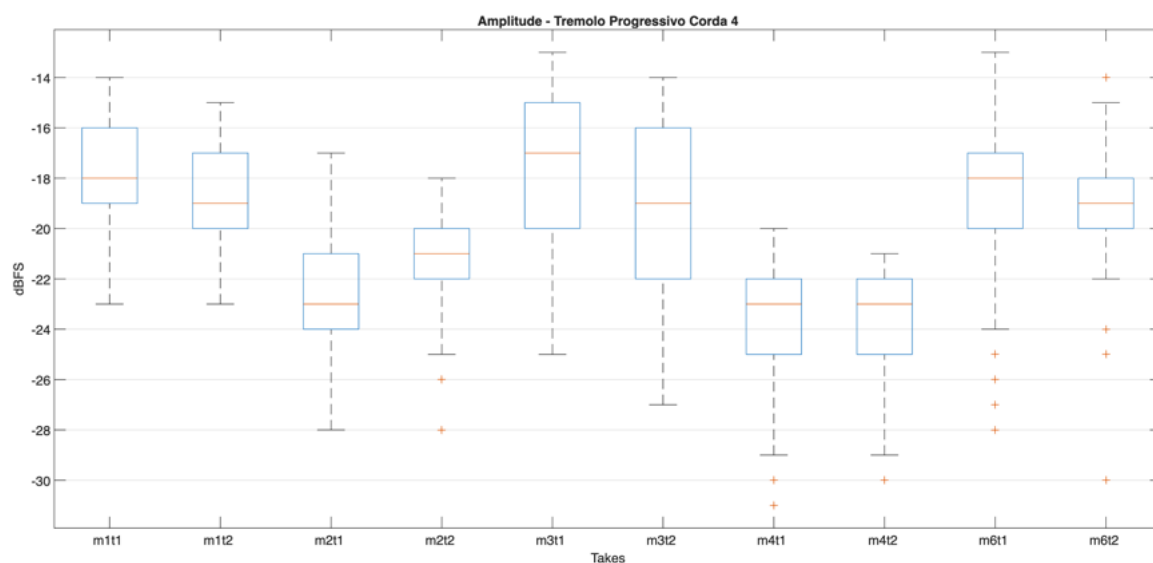


Figura 207: Boxplot da amplitude sonora de todos os músicos no tremolo progressivo corda 4.

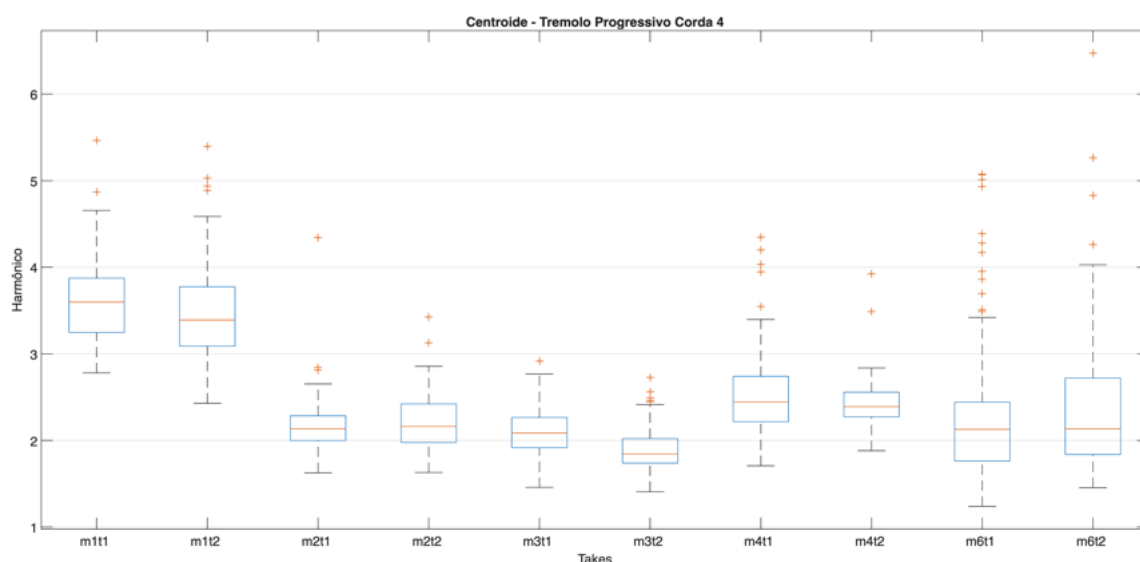


Figura 208: Boxplot do centroide de todos os músicos no tremolo progressivo corda 4.

organizados e curvas de translação e rotação que seguem o padrão observado na corda 1, porém com intensidades mais discretas. M3 demonstra maior irregularidade tanto no domínio dinâmico quanto gestual, com acelerações lineares reduzidas e rotações distribuídas de forma menos hierarquizada entre os eixos. M4 mantém elevada consistência entre takes, reproduzindo o arranjo gestual da corda 1 com intensidade geral menor, enquanto M6 apresenta contraste marcante entre os registros, variando a intensidade do eixo y e reorganizando a rotação entre uma fase inicial multidirecional e um regime estabilizado dominado pelo eixo z. Na análise conjunta, as amplitudes indicam maior projeção sonora

em M1, M3 e M6, regularidade em M4 e dispersões semelhantes entre os performers, com assimetrias frequentes. No timbre, M1 se distingue pela energia concentrada em harmônicos superiores, enquanto os demais se agrupam em torno do segundo harmônico, com M2, M3 e M4 mais compactos e M6 exibindo maior variabilidade.

A comparação entre o tremolo progressivo na corda 1 e na corda 4 evidencia tanto padrões gestuais comuns aos músicos quanto diferenças sistemáticas que podem ser atribuídas às características físicas de cada corda — sobretudo o material (nylon puro na corda 1 e nylon com revestimento metálico na corda 4) — e à posição no instrumento, que influencia a ergonomia, a amplitude do gesto e a resposta sonora.

De modo geral, as semelhanças entre as duas cordas aparecem principalmente na organização gestual global: todos os músicos mantêm o domínio do eixo  $y$  na translação e do eixo  $z$  na rotação, e perfis dinâmicos coerentes com suas próprias estratégias. Ou seja, a estrutura gestual fundamental do tremolo é preservada independentemente da corda, e cada intérprete tende a reproduzir seu “modelo gestual” de maneira relativamente estável entre as execuções. As diferenças, entretanto, são marcantes e ocorrem de forma consistente entre os músicos. A primeira diz respeito à intensidade geral dos gestos: a corda 4 — por ter revestimento metálico e maior diâmetro — exige menos amplitude de movimento para produzir um ataque claro, o que se reflete em menores intensidades tanto na translação quanto na rotação em comparação à corda 1. Esse comportamento aparece repetidamente nas curvas de todos os participantes, independentemente do estilo gestual individual.

Além disso, a corda 4 tende a apresentar menor regularidade nas relações entre os eixos de translação — especialmente para músicos como M3, que apoia o punho no cavalete do violão — o que sugere que o contato com uma corda no centro do instrumento modifica ligeiramente o equilíbrio dos movimentos finos do punho.

No domínio sonoro, as diferenças também são sistemáticas. Na corda 4, as amplitudes tendem a ser mais moderadas, e a influência da direção da palhetada é menos evidente para alguns intérpretes — possivelmente porque a resposta mais “densa” do revestimento metálico reduz o contraste entre ataques ascendentes e descendentes. O timbre evidencia essa mudança: na corda 1, os centroides espectrais se concentram em torno do segundo harmônico e apresentam distribuição relativamente estável; na corda 4, o conteúdo espectral incorpora maior energia de harmônicos mais altos e mais irregularidade, sobretudo

para intérpretes com maior variabilidade gestual (como M6).

Por fim, a corda 4 também apresenta menor intensidade geral nas velocidades angulares, sugerindo que o trabalho rotacional necessário para manter o gesto é reduzido. Em síntese, a corda 4 promove um gesto mais contido, com menores intensidades, variações menos amplas entre eixos, menor contraste dinâmico entre direções da palhetada e um timbre mais denso e irregular — efeitos que podem ser atribuídos tanto ao material metálico de revestimento quanto à posição mais interna do instrumento, que altera a mecânica fina do movimento.

## 5.2 Discussão

A comparação entre o tremolo direto e o tremolo progressivo revela dois modos distintos de organização gestual, temporal e sonora, apesar de ambos se basearem na mesma alternância rápida de ataques. No tremolo direto, o músico inicia imediatamente no regime máximo de velocidade, o que torna visíveis desde os primeiros ciclos as estratégias individuais de estabilização: regularidade dos IOIs, perfil dinâmico, intensidade e hierarquia entre os eixos de movimento. Como não há fase de preparação, qualquer oscilação temporal inicial, variação dinâmica ou reorganização se manifesta de forma explícita, funcionando como um indicador da capacidade do intérprete de atingir estabilidade gestual sob alta demanda.

No tremolo progressivo, por outro lado, o gesto se desenvolve como um processo contínuo de ajuste. A aceleração gradual permite observar a transição entre regimes gestuais, a redistribuição progressiva entre os eixos de translação e rotação, as e a reorganização do gesto conforme os IOIs se tornam menores. Em vez de refletir apenas o estado final estabilizado, o progressivo evidencia a trajetória completa de adaptação gestual e revela nuances fundamentais sobre como cada performer negocia o crescente nível de complexidade temporal. As intensidades gestuais tendem a ser menores no início e crescem junto com a velocidade, o que cria diferenças importantes entre as duas técnicas: enquanto o tremolo direto já nasce com intensidades altas e organização gestual imediatamente definida, o tremolo progressivo mostra esse arranjo se consolidando ao longo do tempo.

As diferenças intra-músicos reforçam esse contraste. Intérpretes como M1 e M4 apresentam forte consistência entre os takes e entre as duas técnicas, reproduzindo gestos estáveis, amplitudes compactas e IOIs bem organizados independentemente do contexto.

Para esses músicos, as diferenças entre direto e progressivo aparecem sobretudo na intensidade inicial e no tempo necessário até que a regularidade rítmica se estabilize. M2 ocupa uma posição intermediária: mantém coerência entre suas execuções e ajusta gradualmente o gesto ao longo do acelerando. Já M3 e M6 apresentam grande variabilidade entre takes e entre técnicas. No tremolo direto, exibem maiores dispersões de IOIs, amplitudes irregulares e picos gestuais intensos; no tremolo progressivo, reorganizam frequentemente os eixos e mostram oscilações expressivas tanto no gesto quanto no som. Nessas situações, a diferença entre as técnicas se torna ainda mais evidente, pois o progressivo expõe a instabilidade e os ajustes contínuos que o direto, mais compacto e imediato, tende a disfarçar.

As diferenças inter-músicos também revelam padrões claros. M1 e M4 formam o grupo mais consolidado, com gestos econômicos, translação fortemente organizada no eixo y, rotação dominante no eixo z e amplitude sonora estável. M2 permanece estável, porém com ajustes específicos na segmentação do ataque. M3 e M6 constituem o grupo mais energético e irregular, exibindo multidirecionalidade gestual, maior dispersão temporal e reconfigurações contínuas da técnica. Comparar esses perfis mostra que o tremolo é uma técnica menos homogênea do que aparenta: cada performer constrói uma solução técnica própria, ajustando a intensidade do gesto, o equilíbrio da força, a economia de movimento e o modo como busca a estabilidade temporal.

No conjunto, o que muda entre realizar tremolo direto e progressivo é, sobretudo, a forma como o gesto se organiza e se estabiliza no tempo. O tremolo direto evidencia a capacidade imediata de manter regularidade e controle sob alta velocidade, enquanto o progressivo expõe o processo de construção desse controle, tornando visíveis as transições, os ajustes e as reorganizações gestuais que antecedem o regime estabilizado. Assim, enquanto o direto funciona como um recorte do gesto consolidado, o progressivo revela a arquitetura dinâmica da técnica, mostrando como cada músico articula velocidade, direção e controle sonoro para alcançar a mesma alternância rápida que, no tremolo direto, já aparece pronta desde o primeiro ataque. Essa distinção permite compreender o tremolo não apenas como um produto final, mas como um processo gestual complexo, no qual cada intérprete mobiliza estratégias próprias para equilibrar velocidade, projeção e regularidade.

## 6 DISCUSSÃO GERAL

Embora os experimentos tenham lidados com técnicas bastante distintas de palheta, é possível estabelecer uma ligação entre os dois experimentos, ao colocar em perspectiva as amostras de palhetada alternada com 4 notas por corda (a 60 e a 100 bpm) com o tremolo direto nas duas cordas. Utilizaremos aqui apenas os dados dos 4 músicos que participaram de ambos os experimentos.

Uma distinção importante a ser considerada na interpretação das técnicas estudadas diz respeito às diferenças estruturais entre o violão e a guitarra, cujas características físicas podem influenciar diretamente a execução e a organização gestual da palhetada. No violão, a distância entre as cordas é geralmente maior, demandando deslocamentos mais amplos da mão direita na transição entre cordas. Além disso, as cordas de nylon (com exceção das bordões, que possuem núcleo de nylon e revestimento metálico) respondem de forma diferente ao ataque: deformam mais, possuem menor resistência mecânica e geram transientes menos granulares, o que altera tanto a sensação tátil quanto os parâmetros acústicos da palhetada.

Na guitarra, ao contrário, a distância reduzida entre as cordas facilita deslocamentos mais estreitos e gestos mais compactos, favorecendo a execução de técnicas rápidas. A maior tensão e menor espessura das cordas de aço aumenta a responsividade ao ataque, deixando o gesto mais “rebatido” e permitindo que pequenas variações angulares ou de força produzam mudanças sonoras mais imediatas. O material metálico também acentua o brilho, o ruído de atrito e a definição dos transientes, aspectos que interferem na percepção dos onsets e na forma como o músico organiza o gesto de ataque e liberação da corda.

Essas diferenças estruturais tornam o violão um ambiente particularmente desafiador para técnicas de palhetada rápida, pois exigem maior amplitude gestual, mais controle sobre o arrasto da palheta e uma adaptação mais sensível aos modos de vibração das cordas. Assim, a interpretação dos resultados deve levar em conta que os gestos necessários para executar essas técnicas no violão não se transfere de maneira direta da prática consolidada na guitarra, tornando o estudo multimodal ainda mais relevante para compreender essas especificidades.

Para manter um parâmetro comparativo entre as técnicas, adotamos como re-

ferência o IOI médio de 90 ms — valor observado tanto no tremolo direto quanto na fase estabilizada do tremolo progressivo, comum a todos os participantes —, o que corresponde a aproximadamente 170 bpm<sup>19</sup>. Dessa forma, podemos estabelecermos três faixas de velocidade para análise: 60, 100 e 170 bpm.

A Figura 209 apresenta os ângulos de Euler para a técnica de palhetada alternada com quatro notas por corda, nos dois andamentos, e para a técnica de tremolo, tanto na forma direta quanto na progressiva. Em uma observação geral, nota-se uma mudança clara no comportamento dos ângulos no regime de maior velocidade exigido pelo tremolo, que apresenta variações significativamente menores. Já a palhetada alternada mantém um padrão gestual semelhante entre os dois andamentos, evidenciando maior estabilidade relativa frente à mudança de velocidade.

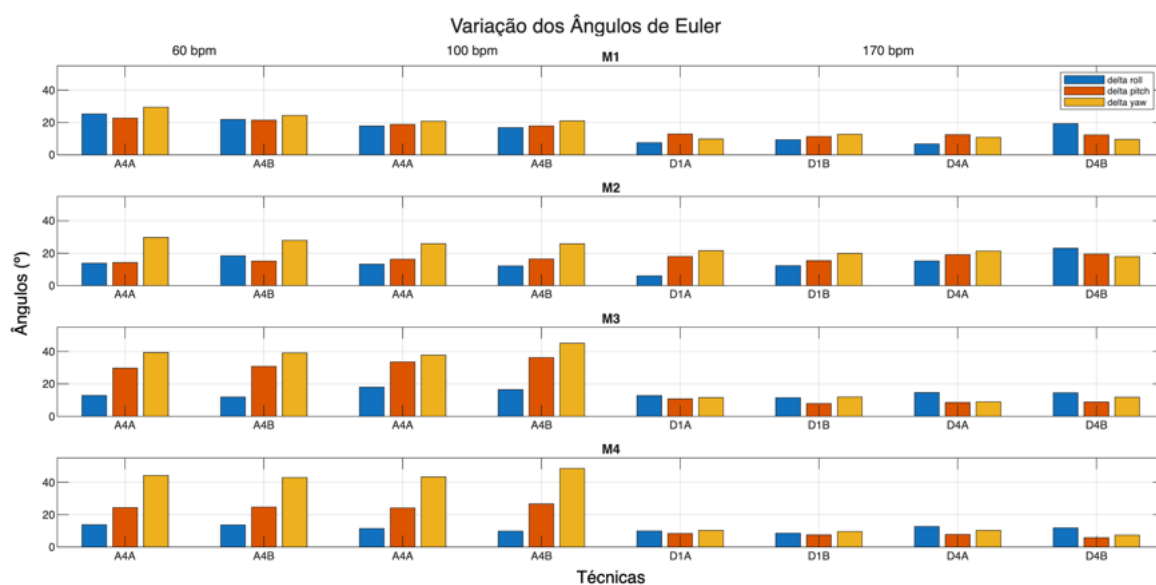


Figura 209: Ângulos de Euler de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.

Em relação à simetria entre os valores positivos e negativos de aceleração linear (Figura 210) e de velocidade angular (Figura 211), observa-se que, no regime de alta velocidade do tremolo, as amplitudes aumentam de forma mais pronunciada na translação da mão, enquanto na rotação esse incremento ocorre de maneira mais moderada e menos evidente.

A observação das PCAs sugere, de modo geral, um aumento da variância explicada pelo primeiro componente da aceleração linear no tremolo (Figura 212), destacando-se,

<sup>19</sup>Considerando que as notas do tremolo são semicolcheias, como nas demais técnicas, multiplica-se o IOI por 4 e divide-se 60.000 ms por esse resultado para obter o bpm equivalente.

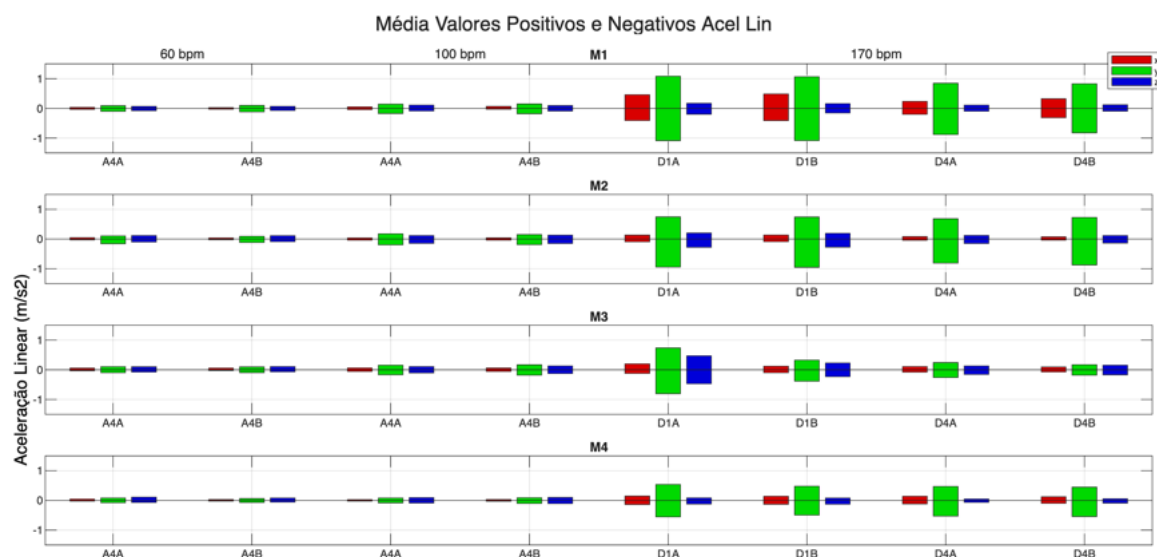


Figura 210: Máximos e mínimos da aceleração linear de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.

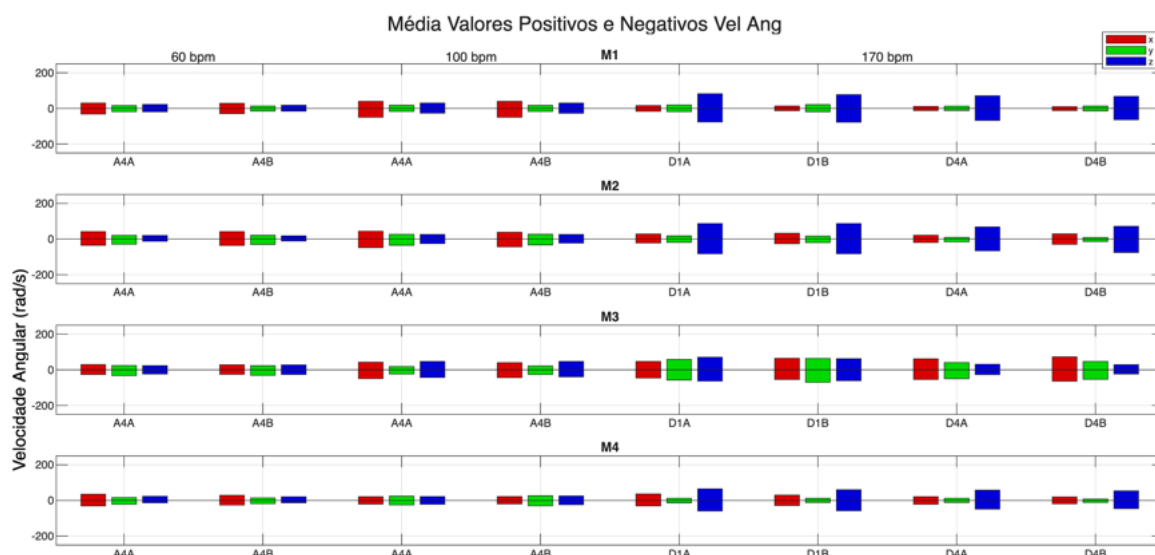


Figura 211: Máximos e mínimos da velocidade angular de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.

nesse contexto, a mudança de predominância entre os eixos no caso do músico M4 quando comparadas a palhetada alternada e o tremolo. Nos componentes de velocidade angular (Figura 213), o padrão de incremento entre as duas técnicas se mantém para a maioria dos participantes — com exceção de M3 — e, assim como na aceleração, observa-se também uma reconfiguração das prioridades entre os eixos ao se comparar a palhetada alternada com o tremolo.

As amplitudes também evidenciam alterações no perfil dinâmico entre as técnicas,

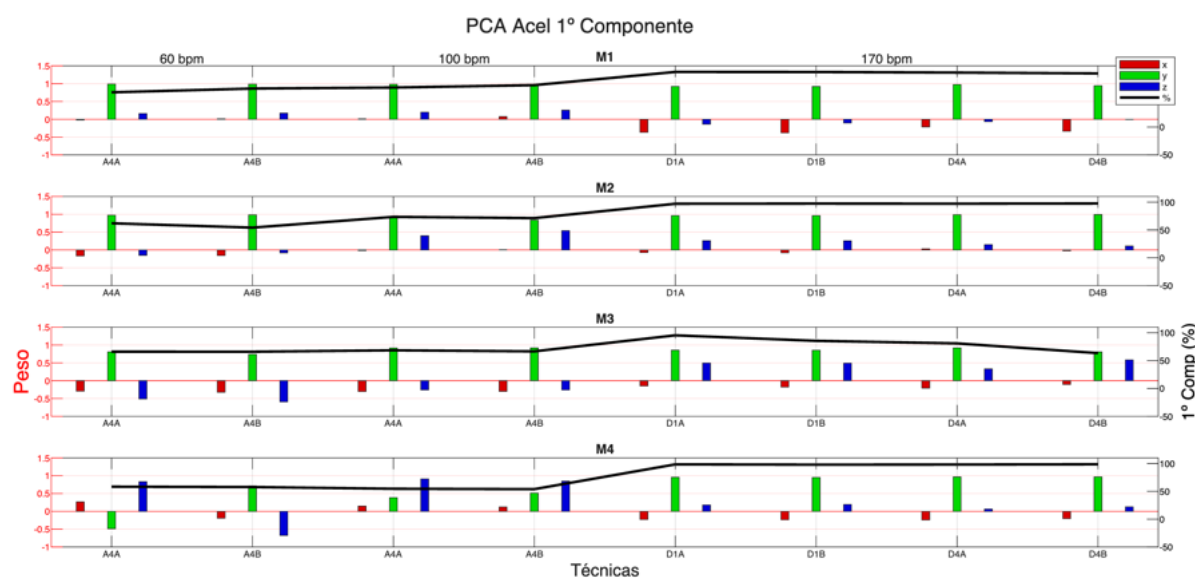


Figura 212: PCA da aceleração linear de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.

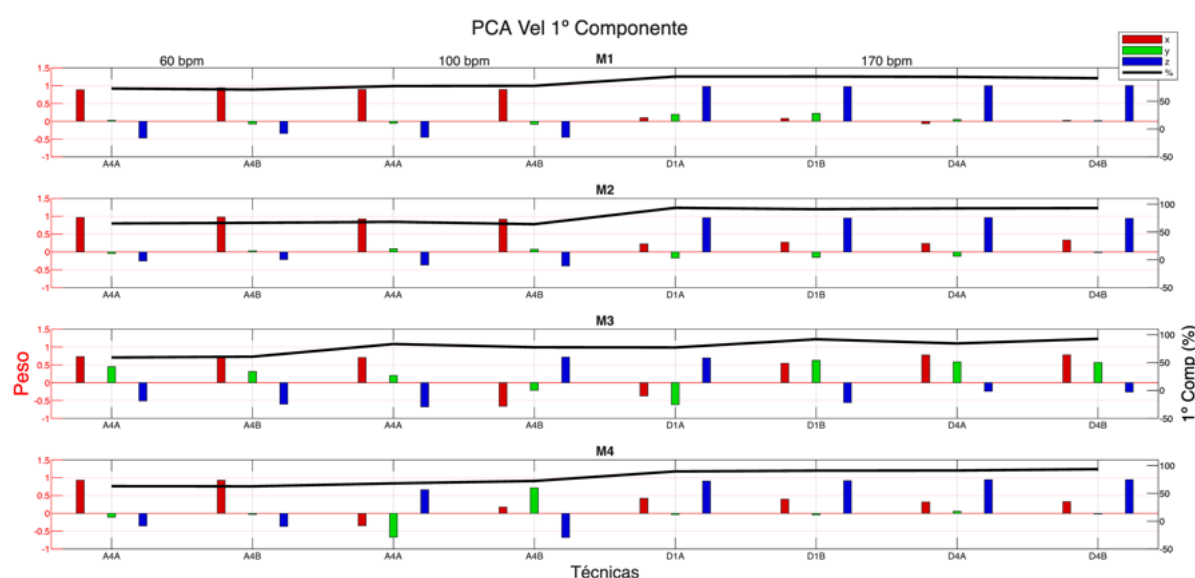


Figura 213: PCA da velocidade angular de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.

como mostra a Figura 214. Observa-se um aumento significativo das intensidades na execução do tremolo, enquanto M4 constitui a principal exceção, mantendo-se na mesma faixa de valores independentemente da técnica empregada.

A variabilidade dos IOIs, apresentada na Figura 215, evidencia mudanças claras quando se compara a técnica de tremolo à palhetada alternada. De modo geral, observa-se um aumento da variabilidade para alguns músicos (como M1 e M2) e uma redução discreta para outros (como M4), acompanhados de uma maior incidência de outliers no

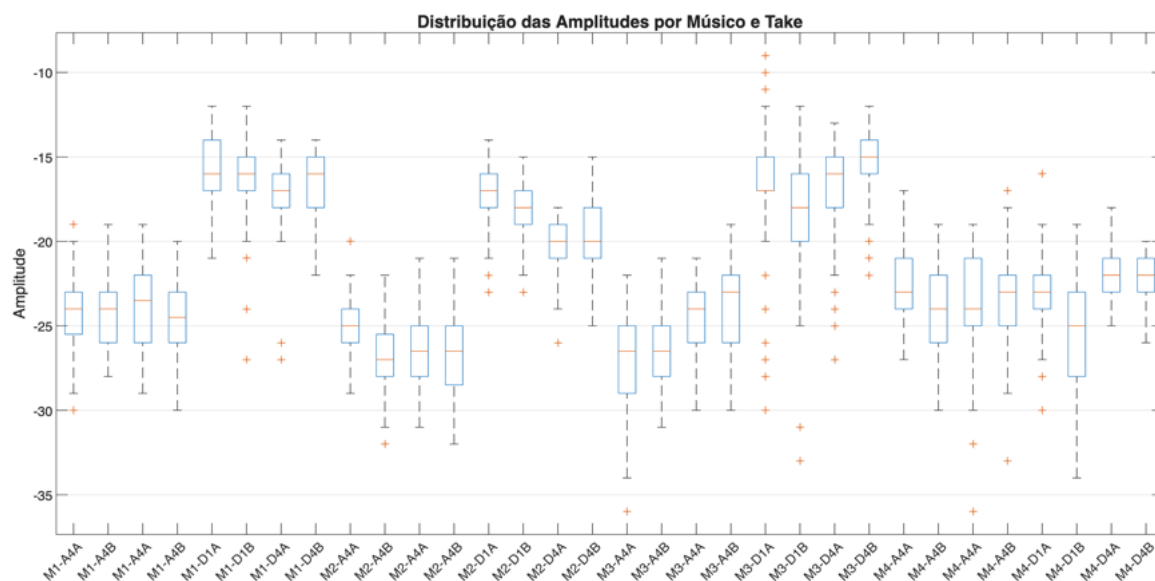


Figura 214: Amplitudes de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.

tremolo.

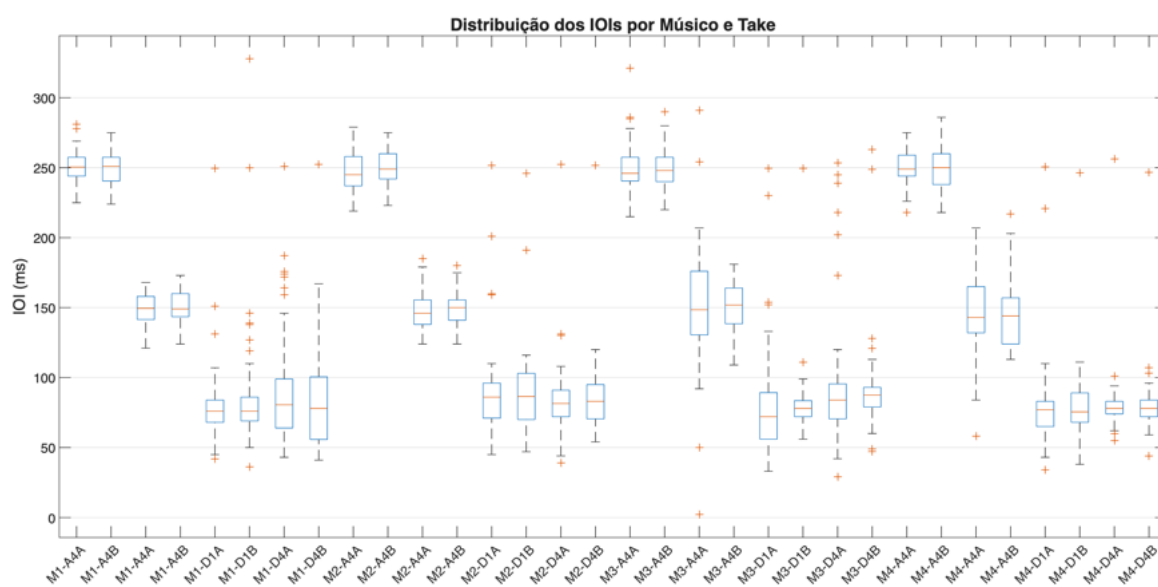


Figura 215: Iois de todos os músicos nas técnicas de palhetada alternada 4 cordas, nos dois andamento, e tremolo.

Em síntese, a comparação entre a palhetada alternada em quatro notas — nos dois andamentos — e o tremolo revela de forma consistente que os músicos não preservam a mesma estratégia gestual quando passam do regime lento para o rápido. As diferenças observadas nos ângulos de Euler, nas intensidades de aceleração linear e velocidade angular, na variabilidade dos IOIs, na distribuição das amplitudes e na organização dos componentes principais apontam para uma reconfiguração explícita do gesto diante das demandas

impostas pela velocidade. No tremolo, especialmente em seu regime mais acelerado, os movimentos tornam-se mais econômicos, compactos e centrados nos eixos mais eficientes para manter a alternância rápida; já na palhetada alternada, mesmo em andamentos distintos, o gesto preserva maior amplitude relativa e um padrão mais estável entre os eixos.

Esses achados evidenciam que não tocamos da mesma forma em velocidades diferentes, e que a execução rápida mobiliza ajustes específicos que não são uma simples aceleração do gesto lento. Tal constatação tem implicações diretas para a prática instrumental: estudar apenas em andamentos lentos, pressupondo que o gesto naturalmente se “transportará” para velocidades mais altas, pode ser insuficiente ou até contraproducente. A mudança de estratégia gestual entre as técnicas confirma que o domínio da palhetada exige atenção tanto aos padrões de baixa velocidade quanto às formas organizacionais próprias do gesto rápido, reforçando a importância de práticas de estudo que contemplem explicitamente essas transições.

Fechamos esta seção com duas observações.

O setup escolhido para captar as forças da palheta demonstrou não ser o mais adequado para este estudo, por ser dependente de locais de pega muito específicos.

As situações de performance escolhidas, embora musicalmente muito simples, se mostraram efetivas para os objetivos propostos. Os músicos foram previamente informados das tarefas a serem realizadas, mas não foi notada uma preparação prévia por parte deles. Desse modo, as amostras são um retrato da capacidade individual de se preparar praticamente na hora para realizar uma performance, algo comum no contexto da música popular.

## 7 CONCLUSÕES

Ao finalizar este trabalho, chama bastante a atenção a existência de estratégias gestuais bastante diversas utilizadas pelos músicos participantes para realizar uma mesma tarefa. Isto deve-se certamente ao fato de que o aprendizado da técnica de palheta se deu primordialmente de forma autodidata, em ambientes musicais variados. Se isto pode ser visto como um problema, por outro lado não se deve esquecer que em ambientes mais típicos da música popular a uniformidade também pode ser questionada.

Ficou também claro que as técnicas estudadas exigem estratégias distintas para sua realização. Foi possível observar tendências gerais mesmo dentro da grande variedade técnica proposta, enriquecendo o caráter exploratório da pesquisa.

Um dos conselhos mais constantes no ensino/aprendizado da palhetada é o de que se deve iniciar em andamentos mais lentos e acelerar gradualmente. Os resultados aqui obtidos podem contribuir para relativizar esta afirmação, pois indicaram claramente a utilização de estratégias gestuais distintas em velocidades diferentes. As transições observadas no estudo dos tremolos progressivos deixaram isto claro, tendo um dos músicos inclusive antecipado o gesto que faria na parte mais rápida para o início da amostra.

Para o processo de aprendizagem poderíamos sugerir o exercício de se trabalhar a consciência dos movimentos de translação e rotação da mão em diferentes situações e velocidades, de modo a se buscar uma economia gestual consistente. O posicionamento da mão/braço direito de um dos músicos, com apoio do pulso no instrumento, demonstrou limitar bastante seu movimento de translação e interferir na estabilidade gestual.

Um outro ponto que se mostrou bastante relevante, e que pudemos observar apenas de maneira indireta, foram os ângulos e a profundidade do contato da palheta com a corda, que também é influenciado pelas forças aplicadas na palheta. Uma consciência da complexidade desse toque—choque, contato, soltura, rebotes— pode ajudar a moldar padrões de pega e pressão na palheta.

Como se trata de um ambiente musical onde a expertise não é afunilada em direção a um padrão único de performance, é difícil fazer uma avaliação musical mais ampla a partir dos dados coletados. Não seria justificável, a priori, associar precisão gestual e regularidade rítmica com uma performance mais efetiva. Por outro lado, se o músico estiver buscando precisão e regularidade em sua formação, seria interessante buscar uma

maior concisão gestual e consciência das forças envolvidas no processo.

Os resultados aqui discutidos abrem caminhos importantes para investigações futuras. Em primeiro lugar, torna-se evidente a necessidade de explorar mais profundamente como diferentes trajetórias de aprendizado influenciam a técnica de palhetada. A forte marca de autodidatismo observada nos participantes sugere que futuras pesquisas poderiam comparar músicos formados em ambientes pedagógicos sistematizados (como cursos formais de guitarra e violão) com músicos de formação puramente informal, observando em que medida essas trajetórias modulam a diversidade gestual e a organização do gesto em alta velocidade.

Ainda sobre formação musical, outro desdobramento natural é a criação de estudos longitudinais de aprendizagem, acompanhando ao longo do tempo músicos iniciantes ou intermediários submetidos a diferentes tipos de instrução. Modelos de ensino que enfatizem economia gestual, percepção das rotações e translações, ou consciência das forças aplicadas à palheta poderiam ser comparados para verificar se produzem convergência gestual ou, ao contrário, reforçam soluções motoras individuais. Uma investigação desse tipo poderia, inclusive, testar a validade prática da recomendação tradicional de “começar lento e acelerar”, relativizada pelos resultados deste estudo.

Além disso, seria valioso expandir a análise multimodal integrando modelos de aprendizado de máquina capazes de identificar padrões gestuais associados a diferentes níveis de precisão ou estabilidade. Classificadores poderiam ser treinados para reconhecer automaticamente estratégias de execução e sugerir, por meio de sistemas de *feedback*, ajustes potencialmente mais econômicos ou eficientes. Essa abordagem abriria portas para novas ferramentas pedagógicas baseadas em dados.

Por fim, considerando a diversidade técnica encontrada e a impossibilidade de associar diretamente regularidade gestual à “melhor performance”, torna-se relevante estudar a relação entre intenção musical e solução gestual. Diferentes intenções – sons mais agressivos, mais leves, mais percussivos, mais fluidos – provavelmente levam a diferentes ajustes gestuais, sugerindo que a técnica não é apenas uma questão de eficiência, mas também de estética e escolha artística. Mapear os gestos associados a diferentes intenções poderia aproximar ainda mais esta linha de pesquisa da prática musical cotidiana.

## REFERÊNCIAS

- AGUADO, D. et al. *Nuevo método para guitarra*. [S.l.: s.n.], 1843.
- ARMONDES, A. C. P. et al. Análise multimodal da técnica de strumming no violão. Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- CARLEVARO, A. Escuela de la Guitarra. *Buenos Aires: Barry Editorial*, 1979.
- CLARKE, E. F. Rhythm and timing in music. In: *The psychology of music*. [S.l.]: Elsevier, 1999. p. 473–500.
- ERICSSON, K. A.; KRAMPE, R. T.; TESCH-RÖMER, C. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, v. 100, n. 3, p. 363–406, 1993.
- FITTS, P. M.; POSNER, M. I. *Human Performance*. Belmont, CA: Brooks/Cole, 1967.
- FREIRE, S.; ARMONDES, A.; SILVA, R. Real-Time Symbolic Transcription and Interactive Transformation Using a Hexaphonic Nylon-String Guitar. *Computer Music Journal*, v. 45, n. 4, p. 20–39, dez. 2021. ISSN 0148-9267. Disponível em: [https://doi.org/10.1162/comj\\_a\\_00625](https://doi.org/10.1162/comj_a_00625).
- FREIRE, S. et al. Strumming on an acoustic nylon guitar: Microtiming, beat control and rhythmic expression in three different accompaniment patterns. In: . [S.l.: s.n.], 2018. p. 4–7.
- FREIRE, S.; NÉZIO, L. Study of the Tremolo Technique on the Acoustic Guitar: Experimental Setup and Preliminary Results on Regularity. In: *Proceedings of the 10th Sound and Music Computing Conference*. Estocolmo: SMC, 2013. p. 329–334. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.850407>.
- FREIRE, S.; NÉZIO, L.; PIMENTA, R. O som plaqué no violão: aspectos qualitativos e quantitativos em situação musical. *Seminário Música Ciência Tecnologia*, v. 1, n. 4, 2012.
- FREIRE, S.; NÉZIO, L.; REIS, A. Analysis of the Simultaneity, Voice/layer Balance and Rhythmic Phrasing in Works for Guitar by Rodrigo, Brouwer and Villa-Lobos. In: *Proceedings of the 11th SMC and 40th ICMC*. Atenas: SMC/ICMC, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.850753>.
- FREIRE, S. et al. Evaluation of Inertial Sensor Data by a Comparison with Optical Motion Capture Data of Guitar Strumming Gestures. *Sensors*, v. 20, n. 19, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5722>.
- GAMBALE, F. *Speed Picking: For Guitar; Build Maximum; Picking Efficiency*. [S.l.]: Hal Leonard Publ., 1994.
- GODØY, R. I.; LEMAN, M. *Musical gestures: Sound, movement, and meaning*. [S.l.]: Routledge, 2010.

- GRADY, T. *Cracking the Code has transformed the way guitarists learn, and through discoveries like escape motion, we've made clean picking technique accessible to everyone. For step-by-step tutorials, in-depth interviews, and even personalized reviews of your own playing, check out our website!* 2006. YouTube. Disponível em: [⟨https://www.youtube.com/@troygrady⟩](https://www.youtube.com/@troygrady). Acesso em: 23 nov. 2024.
- HOLLINGER, A.; WANDERLEY, M. M. Evaluation of commercial force-sensing resistors. In: CITESEER. *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Paris, France*. [S.l.], 2006. p. 4–8.
- HONING, H. Structure and interpretation of rhythm in music. *The psychology of music*, Academic Press Amsterdam, v. 3, p. 369–404, 2013.
- JENSENIUS, A. R.; WANDERLEY, M. M. Musical gestures: Concepts and methods in research. In: *Musical gestures*. [S.l.]: Routledge, 2010. p. 24–47.
- LEHMANN, A. *Psychology for musicians: Understanding and acquiring the skills*. [S.l.]: Oxford University Press, 2007.
- MAGALHAES, T. N. *Análise do bending e do vibrato na guitarra elétrica a partir dos descritores de expressividade da ferramenta Expan*. Tese (Doutorado) — Master's thesis, Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais . . . , 2015.
- OLIVEIRA, C. B. de. *A técnica violonística em expansão: revisão histórica e uma proposta de categorização*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- PETRUCCI, J. *Rock Discipline*. [S.l.]: Warner Bros., 2003.
- REPP, B. H. Diversity and commonality in music performance: an analysis of timing microstructure in Schumann's "Träumerei". *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 92 5, p. 2546–68, 1992. Disponível em: [⟨https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14895067⟩](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14895067).
- ROTH, D. *SwiftOsc*. 2006. Acessado em: 15 de novembro de 2024. Disponível em: [⟨https://github.com/ExistentialAudio/SwiftOSC/blob/master/Framework/SwiftOSC/Types/Blob.swift⟩](https://github.com/ExistentialAudio/SwiftOSC/blob/master/Framework/SwiftOSC/Types/Blob.swift).
- SCHMIDT, R. A.; LEE, T. D. *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. 5. ed. Champaign, IL: Human Kinetics, 2014. ISBN 978-1450443615.
- SHEARER, A. *Classic guitar technique*. [S.l.]: Alfred Music Publishing, 1985. v. 1.
- SHEARER, A. *Learning the Classic Guitar, Volume 1*. Van Nuys, CA: Alfred Publishing, 1990. ISBN 978-0882844830.
- WANDERLEY, M. M.; DEPALLE, P. Gestural control of sound synthesis. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 92, n. 4, p. 632–644, 2004.
- YANIGER, S. Force sensing resistors: A review of the technology. In: *Electro International, 1991*. [S.l.: s.n.], 1991. p. 666–668.
- ZWICKER, E.; FASTL, H. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Berlin: Springer, 1999.

## A IMU

### A.1 Programação

A empresa MBientLab não oferece, até o momento, software para o uso deste sensor no modo streaming em sistemas operacionais MacOS e Linux. Como alternativa, são disponibilizados códigos e tutoriais para a compilação do programa pelo próprio usuário.<sup>20</sup> Encontramos códigos em Swift para MacOS e em Python para Linux, os quais foram adaptados no desenvolvimento dos drivers.

Inicialmente desenvolvemos um driver para o sistema operacional macOS 10.14 (Mojave), implementado na linguagem Swift. O projeto foi baseado na adaptação de códigos fornecidos pela MbientLab e na integração de um framework especializado em Open Sound Control (OSC)<sup>21</sup>, desenvolvido por Roth (2006). O driver foi projetado para configurar sensores de modo a possibilitar o envio de informações por meio de BLE. Cada mensagem OSC é composta por 10 dados de 16 bits: três para aceleração linear (g), três para velocidade angular (graus/s) e quatro para os ângulos de Euler (graus); como um destes quatro valores é redundante, ele é excluído dos cálculos posteriores. Após o recebimento dos dados, estes são encaminhados para o software Max/MSP por meio de um servidor local, utilizando mensagens OSC via protocolo UDP. Com o sensor programado nesta plataforma realizamos diversas pesquisas e trabalhos, tanto na área de análise de performance (ARMONDES et al., 2020) quanto no uso em sistemas musicais interativos. Apesar de apresentar uma certa confiabilidade, percebemos que a taxa de recepção dos dados em diferentes computadores com MacOS variava bastante, além da incompatibilidade com sistemas e hardwares mais recentes. Desse modo decidimos experimentar outras possibilidades de programação, agora na linguagem Python em Linux.

No sistema operacional Linux, foi utilizada a versão Ubuntu 22.04 LTS, instalada em um ambiente de dual boot com o MacOS. O código em Python foi desenvolvido a partir de adaptações dos exemplos disponibilizados no site de tutoriais da MetaWear, durante o primeiro semestre de 2022. A programação implementada seguiu uma abordagem se-

---

<sup>20</sup><https://mbientlab.com/tutorials/MetaWearAPI.html>

<sup>21</sup>Open sound control é um protocolo de comunicação entre computadores, sintetizadores de som e outros dispositivos multimídia otimizado para tecnologia de redes modernas, tendo como características principais ser interoperável, preciso e flexível. <https://ccrma.stanford.edu/groups/osc/index.html>, acessado em 20/11/2024

melhante à previamente desenvolvida em Swift, utilizando o algoritmo de fusão IMUPlus para a captura de dados de aceleração linear, velocidade angular e ângulos de Euler nos três eixos. Após a realização de testes de streaming, constatou-se que a implementação no sistema Linux apresentou uma taxa de amostragem mais estável em comparação com a versão desenvolvida anteriormente para o MacOS.

Posteriormente, em busca de um setup mais compacto e modular, eliminando a necessidade de dois computadores com os dois sistemas operacionais (MacOS e Linux), passamos a utilizar o Raspberry Pi<sup>22</sup> com o mesmo código em Python para recebimento dos dados do sensor de movimento. Por um cabo de rede transmitimos os dados recebidos do sensor, também em OSC via UDP, para o Max/MSP. Nesta nova configuração percebemos a taxa de transmissão ainda mais estável.

O MetaMotionR permite a configuração dos dados de acelerômetro e giroscópio em faixas pré-definidas. Para o acelerômetro temos as faixas de 2, 4, 8 e 16g com 16 bits de resolução, e para o giroscópio as faixas de 125, 250, 500, 1000 e 2000<sup>o</sup>/s, também com 16 bits de resolução. A escolha da faixa ideal depende do tipo de gesto a ser detectado pelo sensor. No caso das técnicas de palheta os gestos são curtos, portanto escolhemos os limites de 2g para aceleração linear e 500<sup>o</sup>/s para velocidade angular, aproveitando melhor os 16 bits disponíveis para os dados. Já o magnetômetro possui configuração única com 1300 $\mu$ T<sup>23</sup> para os eixos xy e 2500 $\mu$ T para z.

#### A.1.1 Processamento e análise dos dados

A visualização dos dados foi implementada no Max/MSP onde desenvolvemos um patch que inclui um monitor para acompanhar a taxa de amostragem efetiva dos dados recebidos. Nesse monitor, o número de mensagens processadas por segundo é exibido como uma curva, com variações em torno de 100 Hz. Os dados de cada mensagem são armazenados em um buffer com resolução de 1 ms, sendo marcados com o respectivo timestamp de chegada. Analisando os intervalos de tempo entre mensagens consecutivas, observamos frequências predominantes de 0, 3, 12 e 15 ms, resultando em uma média geral de 9,88 ms. Essas irregularidades decorrem do protocolo BLE, que opera com intervalos temporais discretos, múltiplos de 1,25 ms, para transmissão de dados. Para monitorar

---

<sup>22</sup><https://www.raspberrypi.com>

<sup>23</sup>T = Tesla, unidade de medida do campo magnético

atrasos significativos, registramos os momentos em que os intervalos entre mensagens superam 30 ms.

Com base nessa análise, identificamos a necessidade de reconstruir a taxa de amostragem nominal de 100 Hz por meio de um metrônomo e um filtro de média móvel. A cada 10 ms, um clock interno gera um novo valor na saída do filtro para cada uma das três grandezas monitoradas. Como a média geral do intervalo entre mensagens está abaixo de 10 ms e atrasos superiores a 30 ms são raros, optamos por utilizar um filtro de três pontos. Esse filtro é alimentado por novos dados quando disponíveis antes do próximo tick, ou pela repetição do último valor recebido caso nenhuma nova mensagem seja detectada entre dois ticks. Essa abordagem evita a repetição de valores idênticos consecutivos na saída do filtro, garantindo maior consistência e estabilidade no processamento dos dados. Realizamos um teste de latência, comparando o intervalo temporal entre o impacto sonoro da queda livre do IMU e a variação brusca de seus dados de aceleração, utilizando um MacBook Pro e uma placa de áudio Presonus Studio8. O valor estimado foi de 24,4 ms.

Após a captura, os dados de aceleração linear e velocidade angular são convertidos para coordenadas polares, sendo representados por um módulo e dois ângulos de orientação: azimute (variando entre  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ ) e elevação (variando entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ ). Os dados de aceleração linear podem ser rotacionados com base nos ângulos de Euler calculados pelo próprio IMU, garantindo que as direções de translação (eixos da aceleração linear) permaneçam inalteradas, mesmo quando o sensor é rotacionado. Além disso, todos os fluxos de dados podem ser filtrados conforme requisitos específicos.

O processo de extração de picos nas curvas de aceleração e velocidade angular foi estruturado em etapas distintas:

1. Conversão de coordenadas: os dados dos eixos cartesianos  $x$ ,  $y$  e  $z$  foram transformados em coordenadas polares, com cálculo do módulo de amplitude, ângulos de azimute e elevação.
2. Detecção de picos: a identificação dos picos foi realizada com base na análise da derivada das curvas dos módulos, sendo os picos definidos pelos instantes em que a derivada muda de sinal positivo para negativo.
3. Cálculo da direção instantânea: no momento de cada pico detectado, foi calculada a direção instantânea tanto da velocidade angular quanto da aceleração. Essas

direções foram então categorizadas em 10 tipos distintos, conforme detalhado mais abaixo.

4. Filtragem por limiar: os picos detectados foram comparados a um valor limiar; somente aqueles com amplitude superior a este valor foram armazenados. Cada registro inclui o momento de ocorrência (medido em relação ao início do trecho), a amplitude do pico e a sua direção espacial. Foi também definido um intervalo de espera entre detecções consecutivas para evitar múltiplos registros de um mesmo evento.

## B FSR

### B.1 Circuito, dados e processamento

Neste estudo, medimos a variação de tensão em duas entradas analógicas de um Arduino Leonardo, representando as forças aplicadas pelos dedos polegar e indicador em cada lado da palheta. Os sensores FSR foram configurados para operar com uma taxa de amostragem de 100 Hz, e sua faixa efetiva de atuação foi controlada por meio de um resistor. No Arduino, a tensão medida (variando de 0 a 5 V) foi convertida para valores de 10 bits (entre 0 e 1023), que foram utilizados como unidades arbitrárias para comparações. A Figura 216 apresenta o circuito composto pelos sensores FSR, resistores e o Arduino.

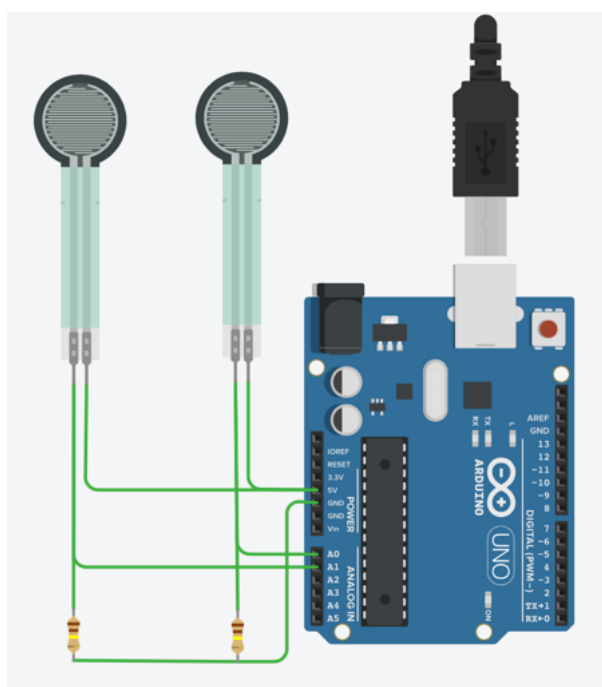


Figura 216: Circuito com dois FSR's ligados ao Arduino. Fonte: [www.tinkercad.com](http://www.tinkercad.com)

Os dados capturados pelo Arduino foram transmitidos para o software Max/MSP por meio de comunicação serial, com uma baud rate (taxa de transmissão de símbolos por segundo) configurado no código do microcontrolador. Este valor, que pode variar entre 300 e 115.200, influencia diretamente a latência do sistema. Optamos por um baud rate de 57.600, com base em testes empíricos que resultaram em uma latência de aproximadamente 20 ms, valor próximo ao atraso do IMU (24,4 ms). Essa configuração facilitou a sincronização dos dados nas visualizações e análises.

Para assegurar uma taxa de amostragem estável de 100 Hz, implementamos um clock interno de 10 ms no Max/MSP, que alimenta um filtro de média móvel de 3 pontos, utilizando o mesmo método empregado para o IMU. Essa abordagem garantiu a suavização dos dados e maior precisão na análise.



## C FIGURAS

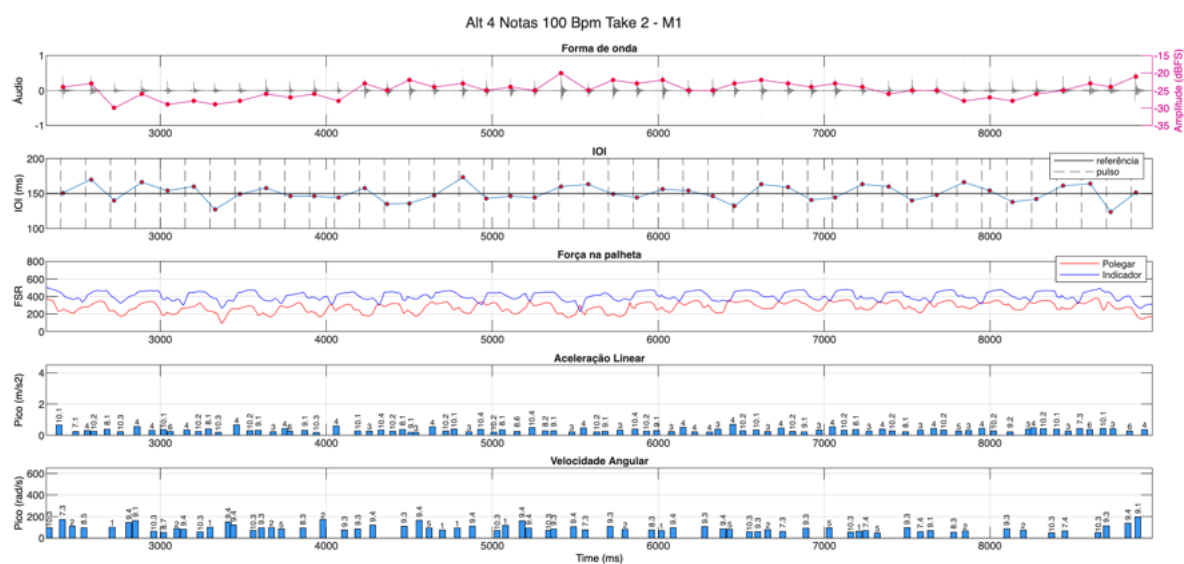


Figura 217: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

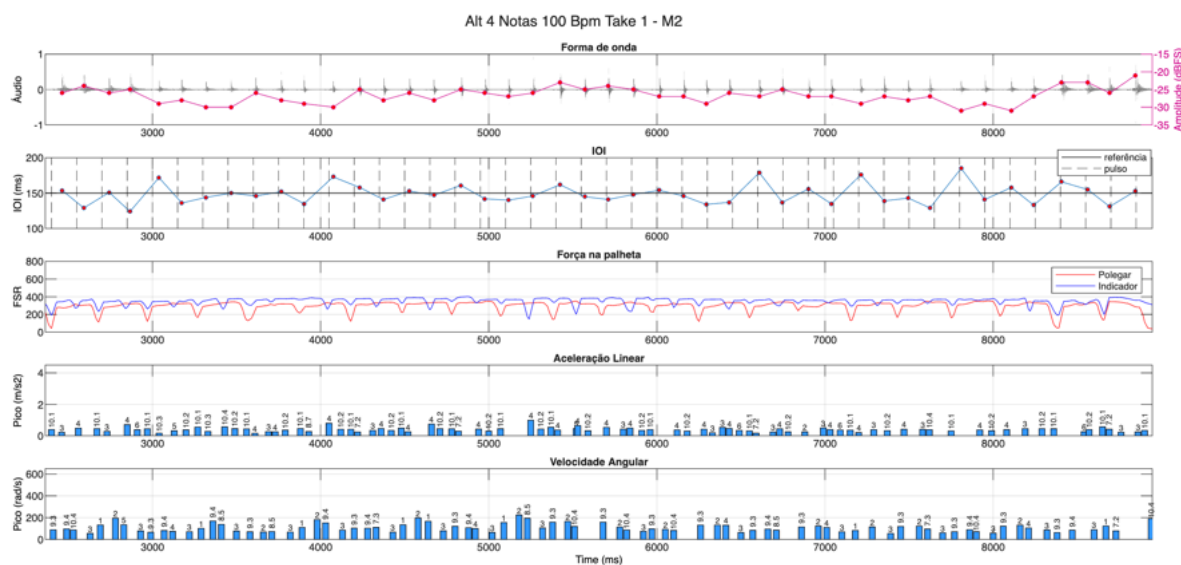


Figura 218: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.

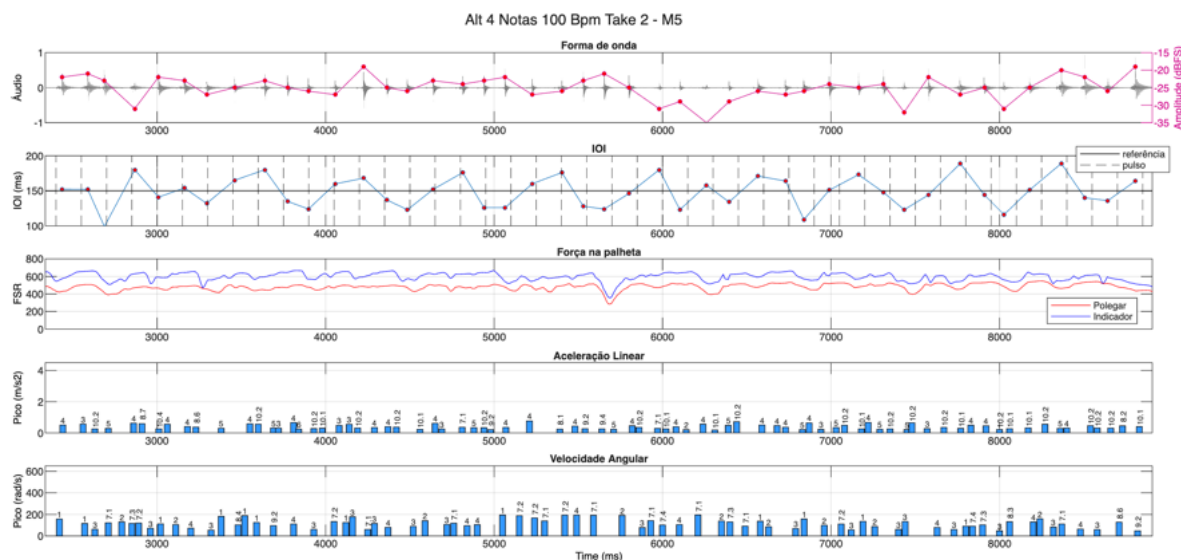


Figura 219: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 4 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.

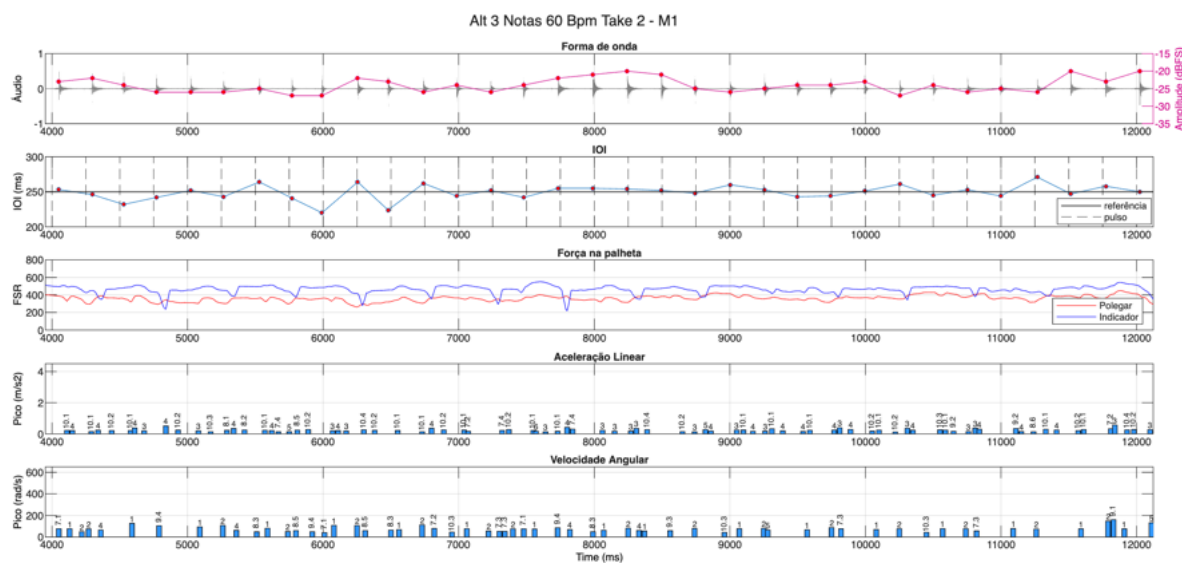


Figura 220: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.

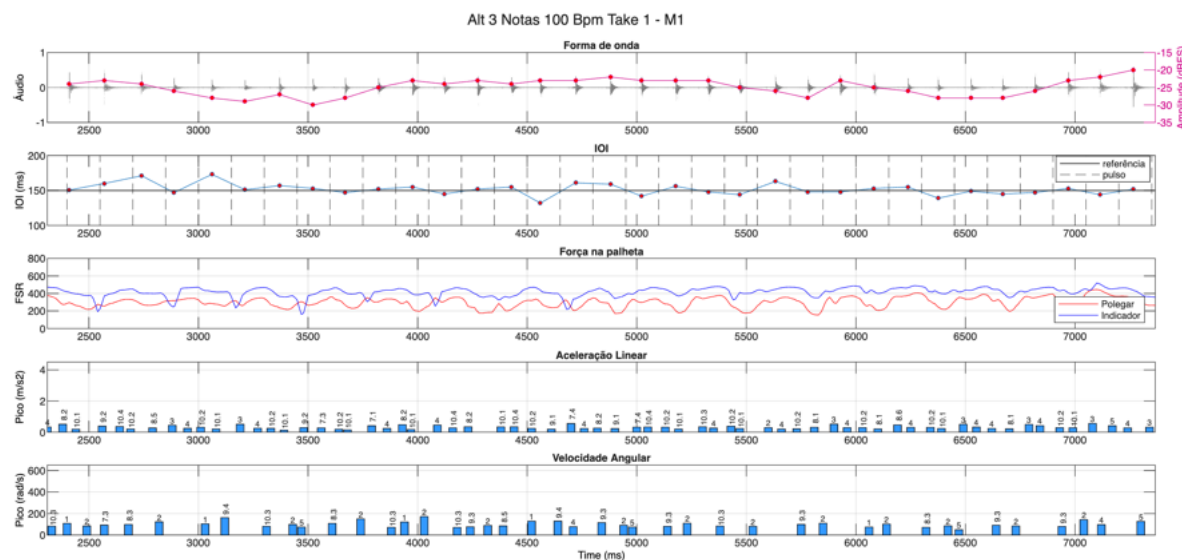


Figura 221: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.

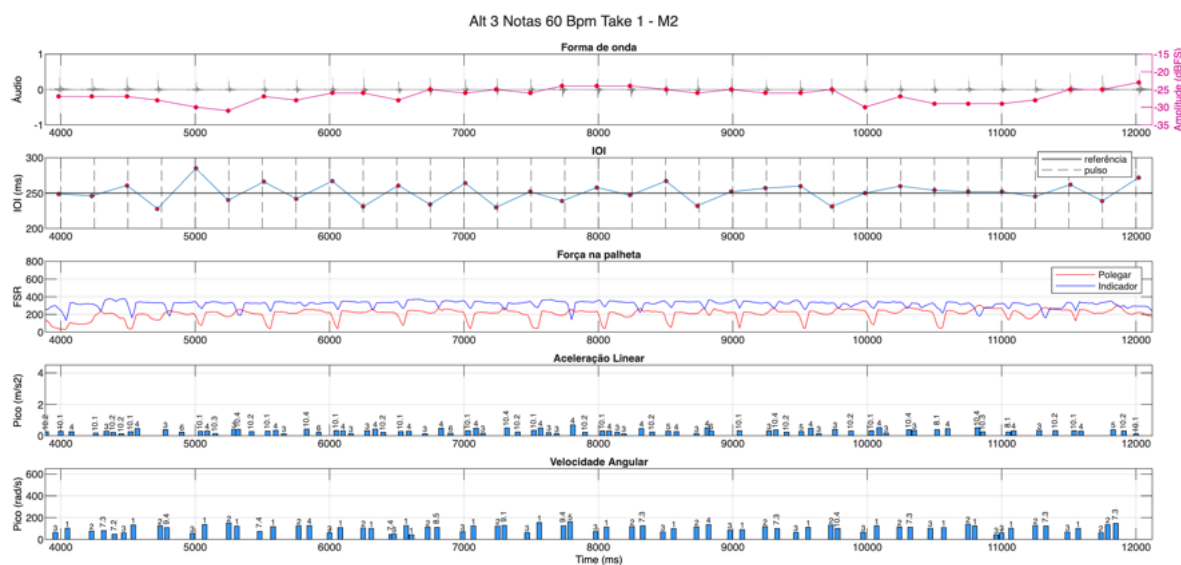


Figura 222: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.

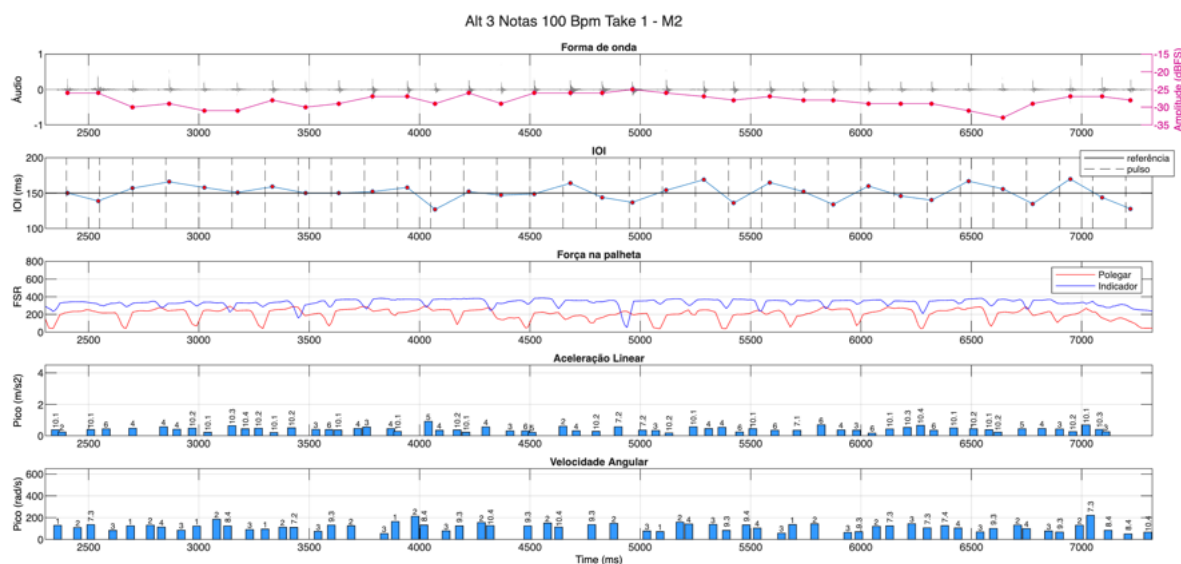


Figura 223: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.

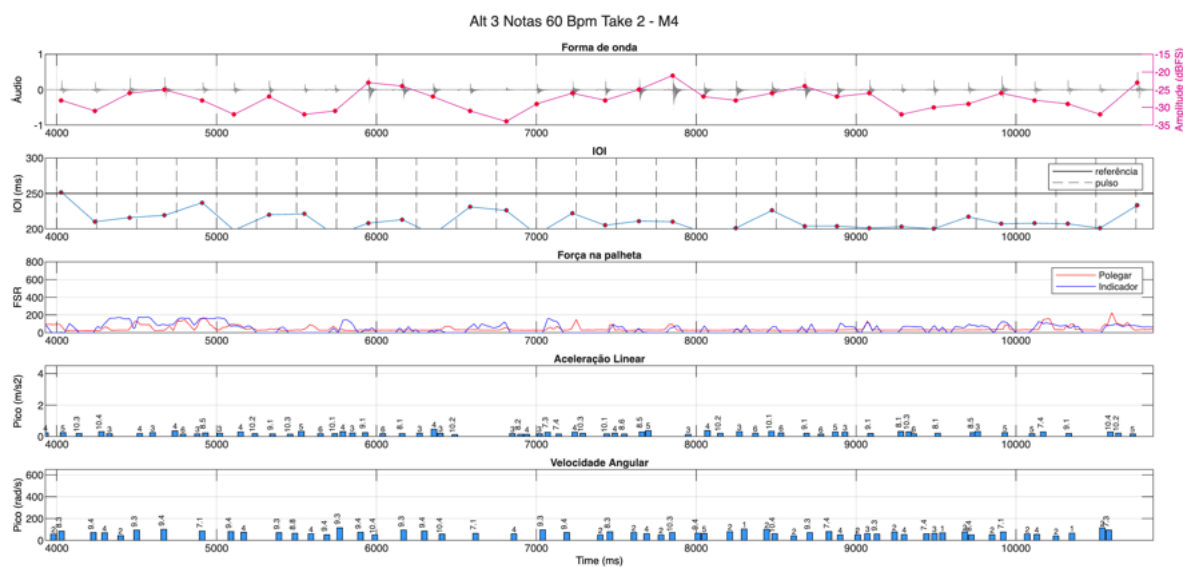


Figura 224: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.

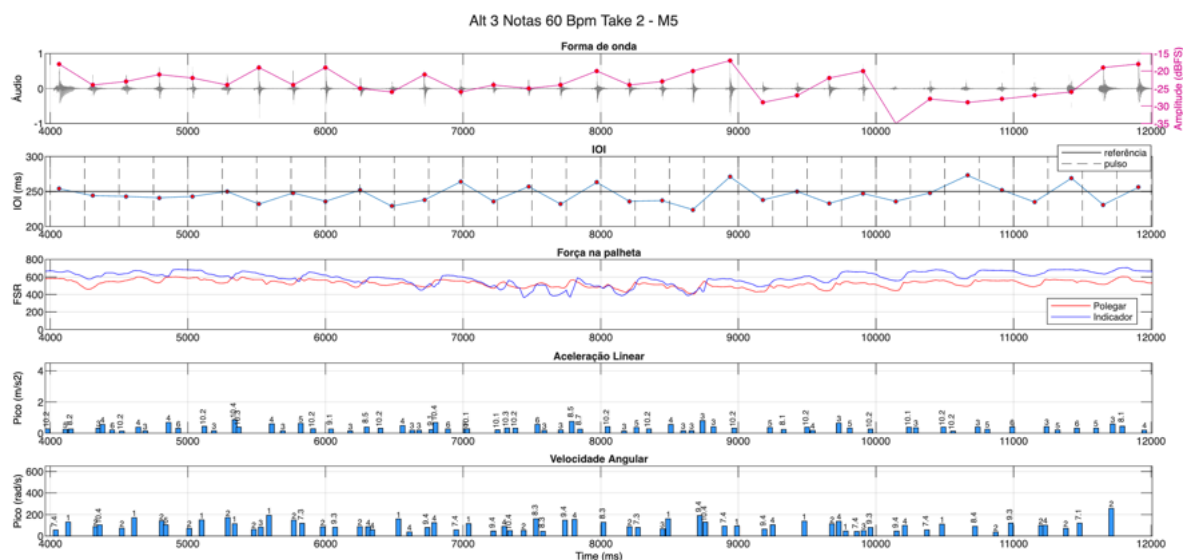


Figura 225: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.

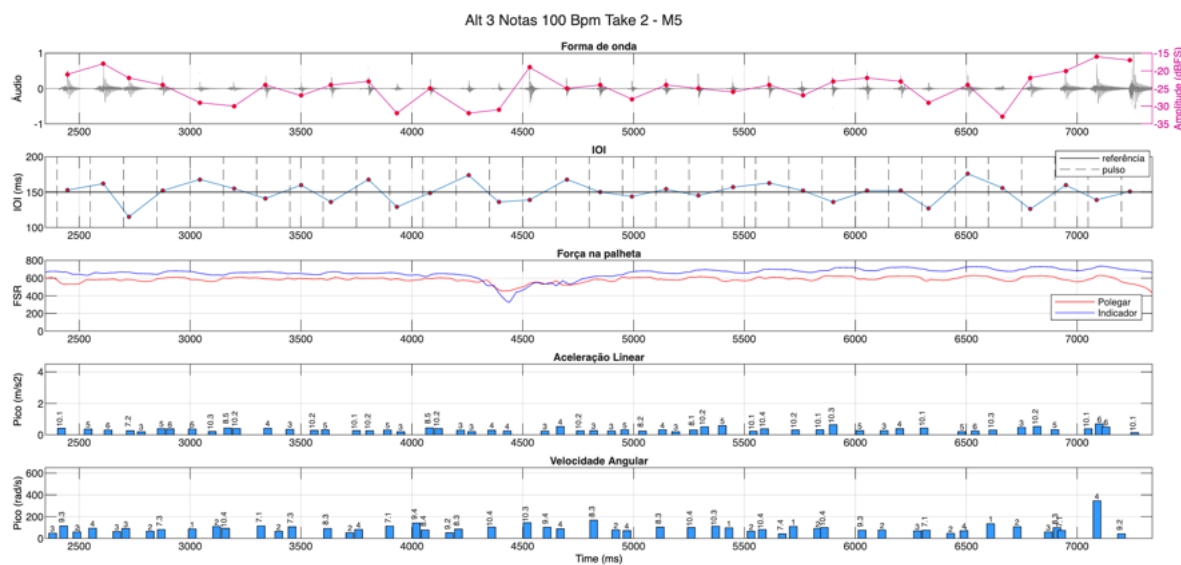


Figura 226: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 3 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.

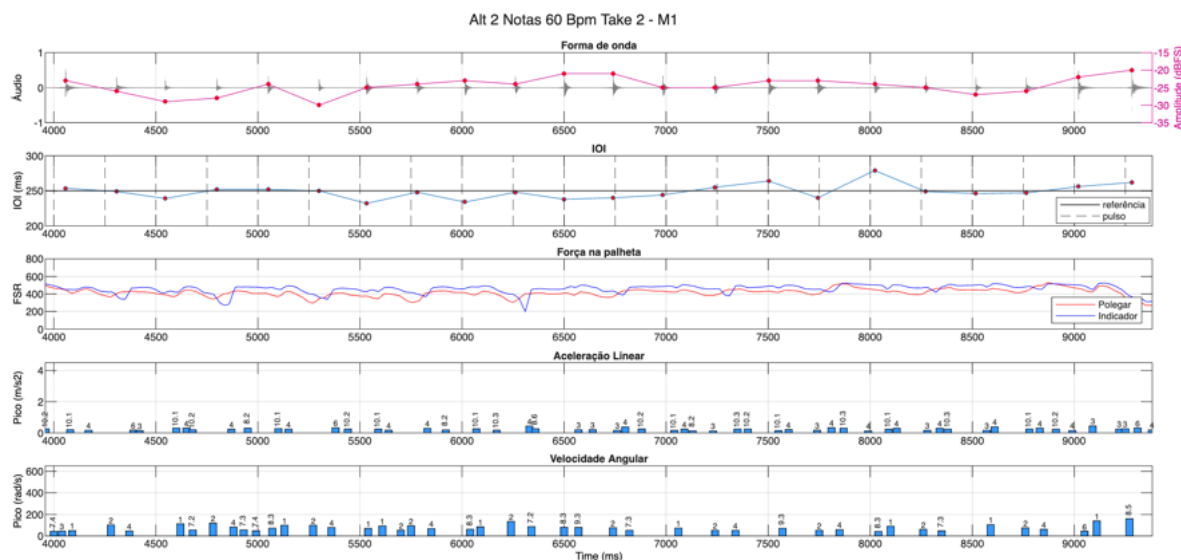


Figura 227: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.

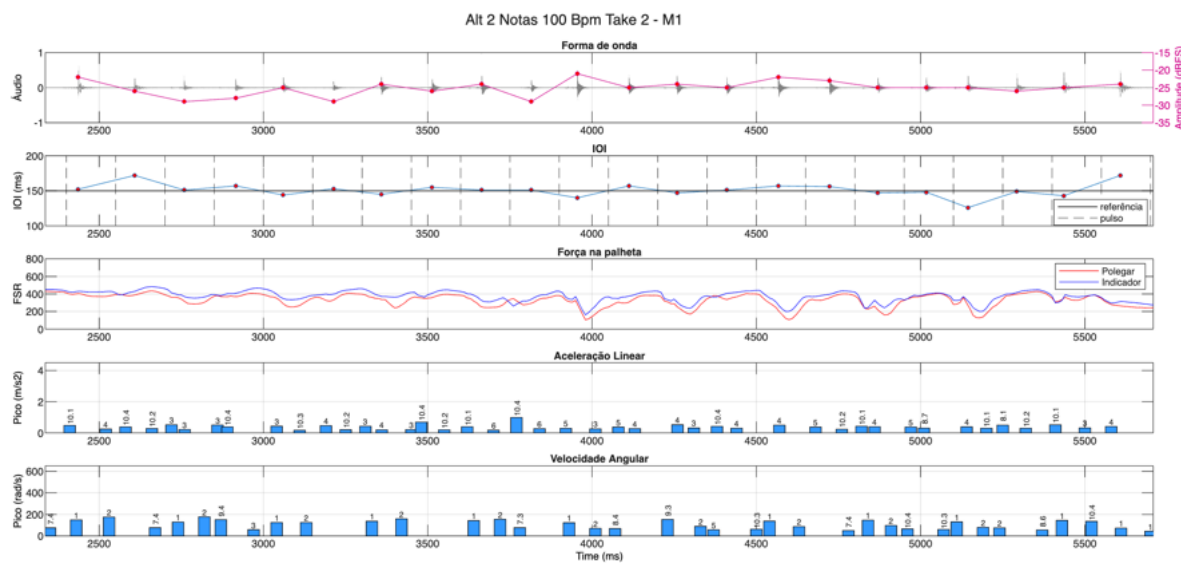


Figura 228: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

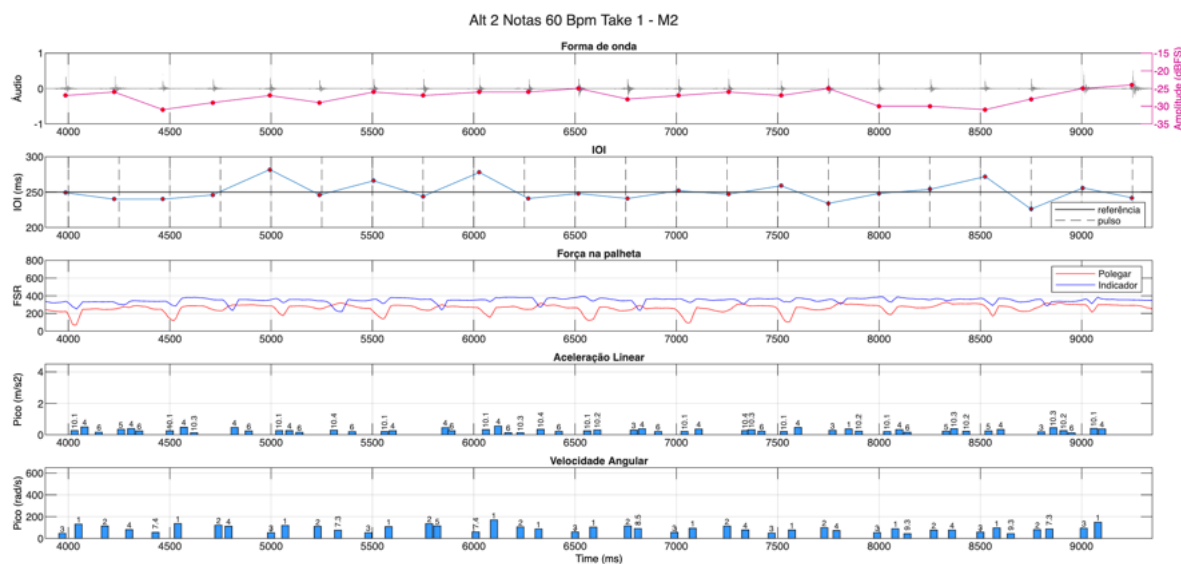


Figura 229: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.

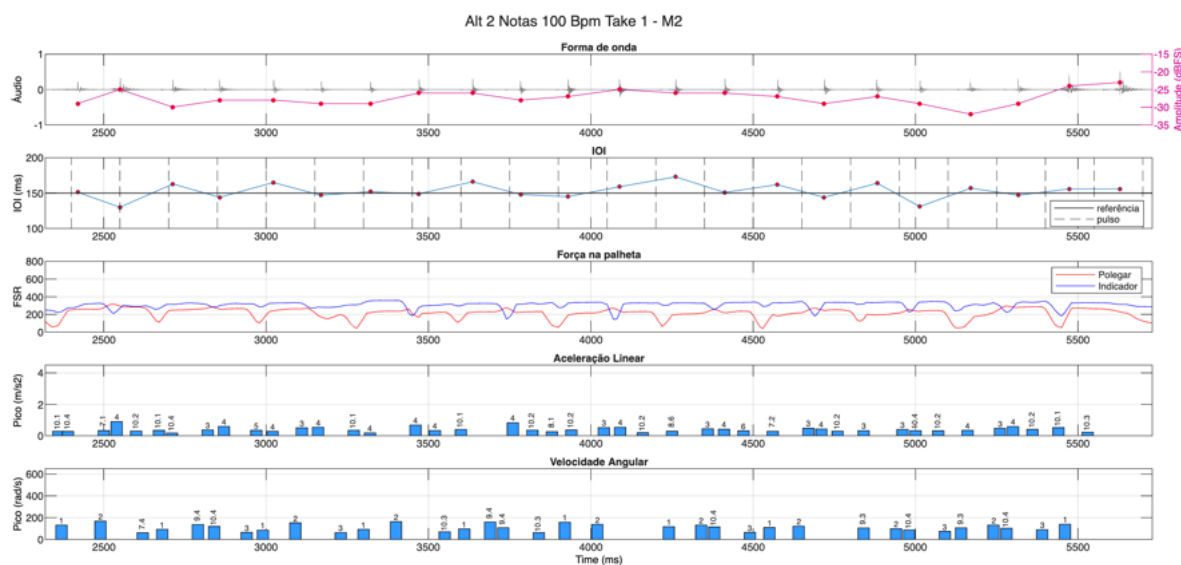


Figura 230: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.

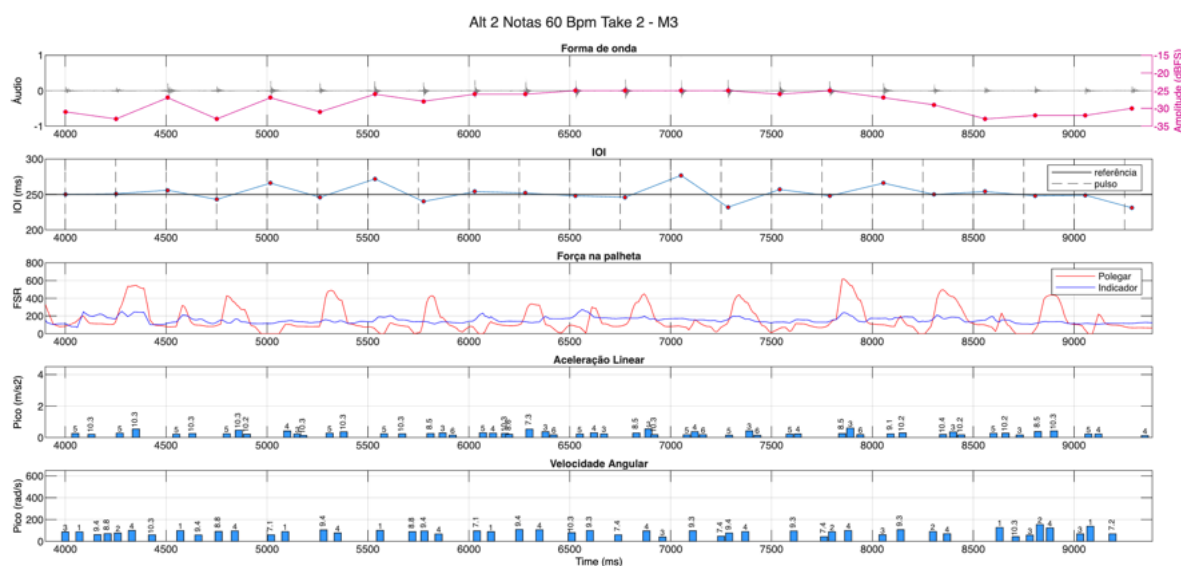


Figura 231: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.

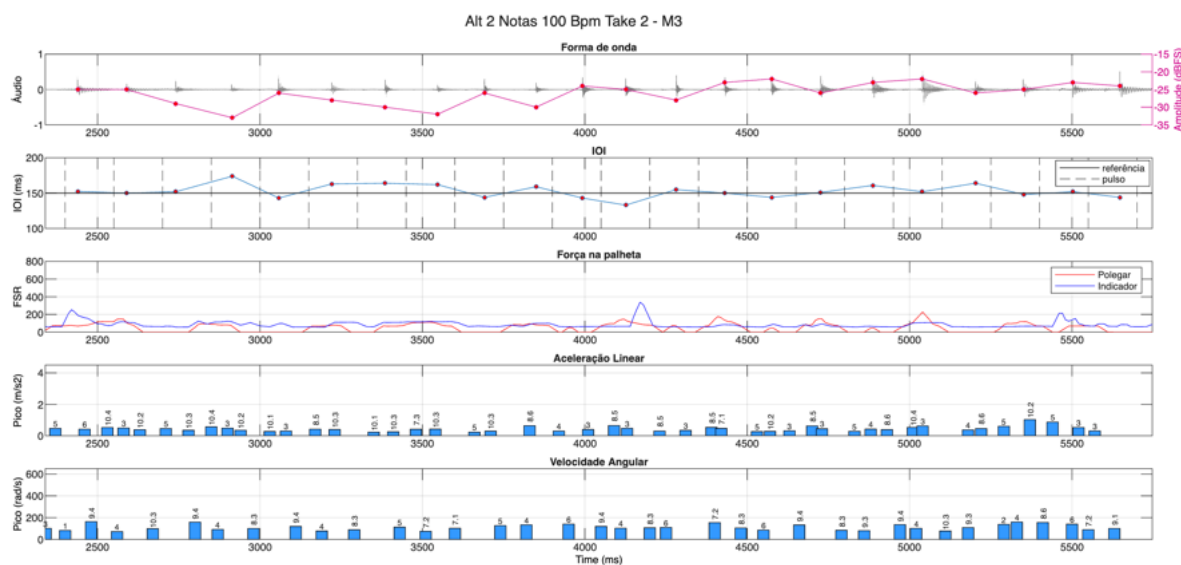


Figura 232: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.

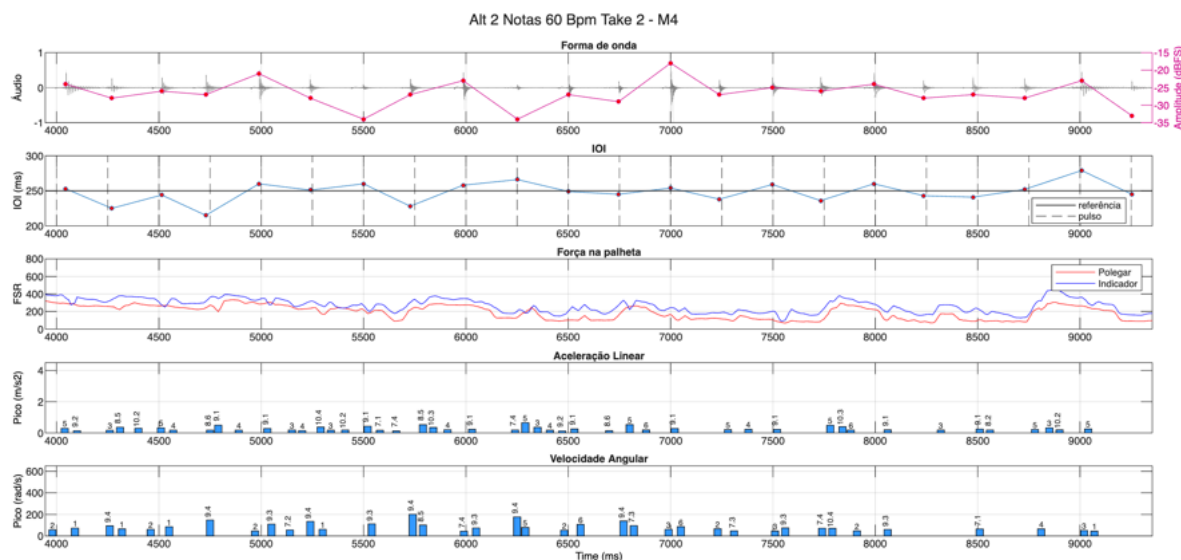


Figura 233: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M4.

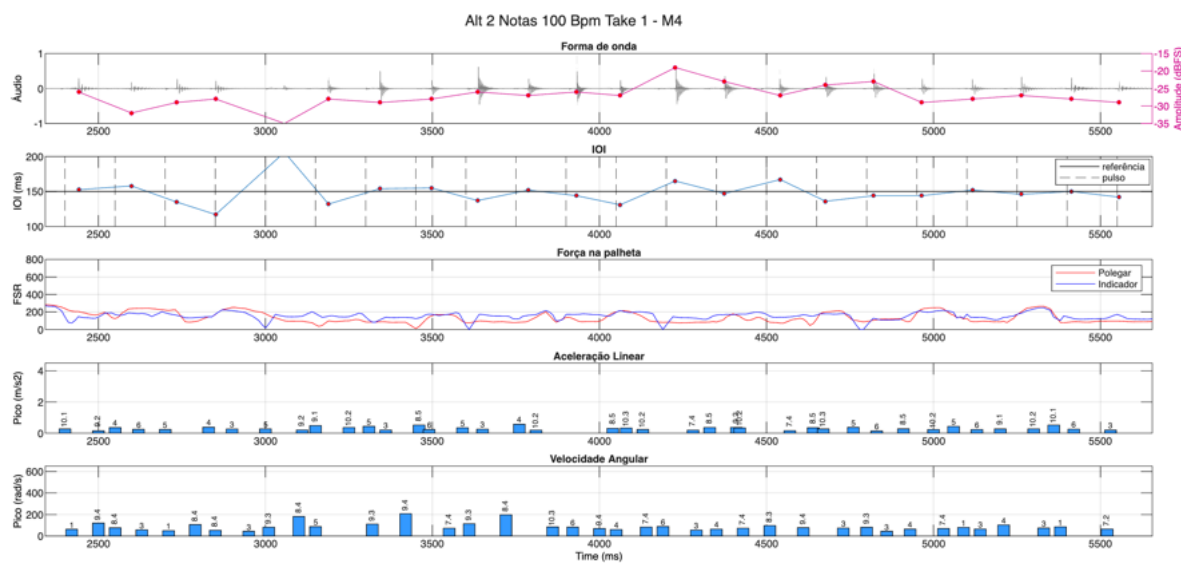


Figura 234: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M4.

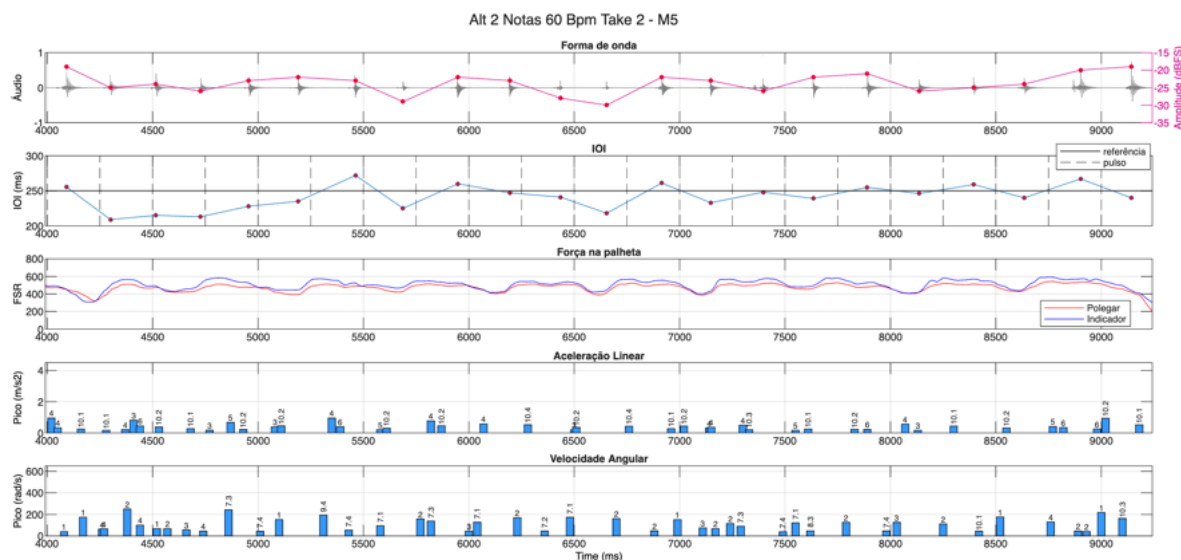


Figura 235: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.

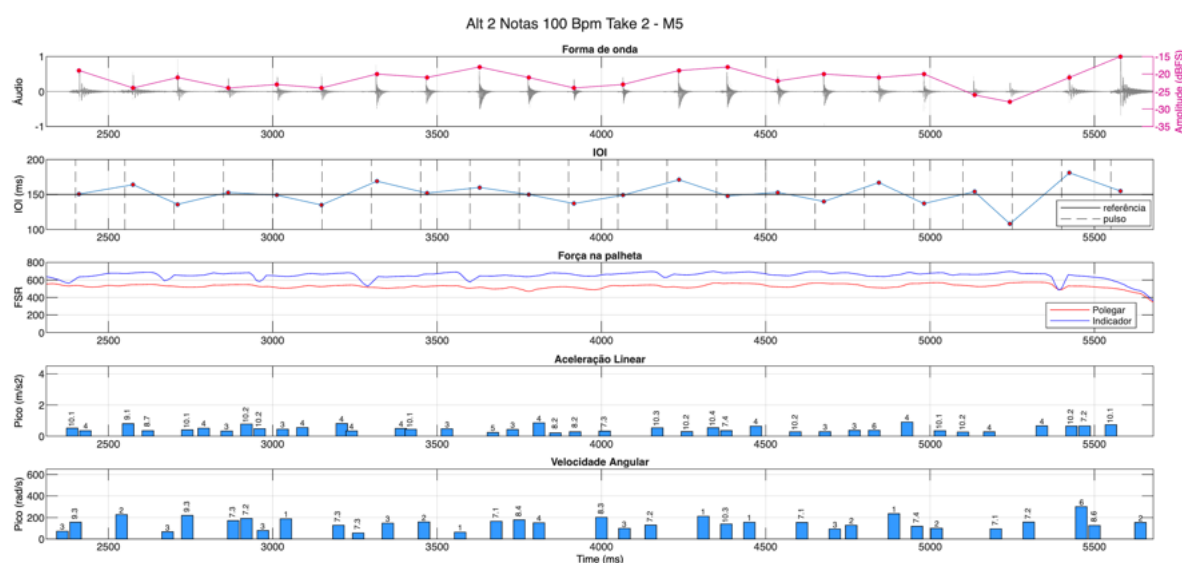


Figura 236: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 2 notas por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.

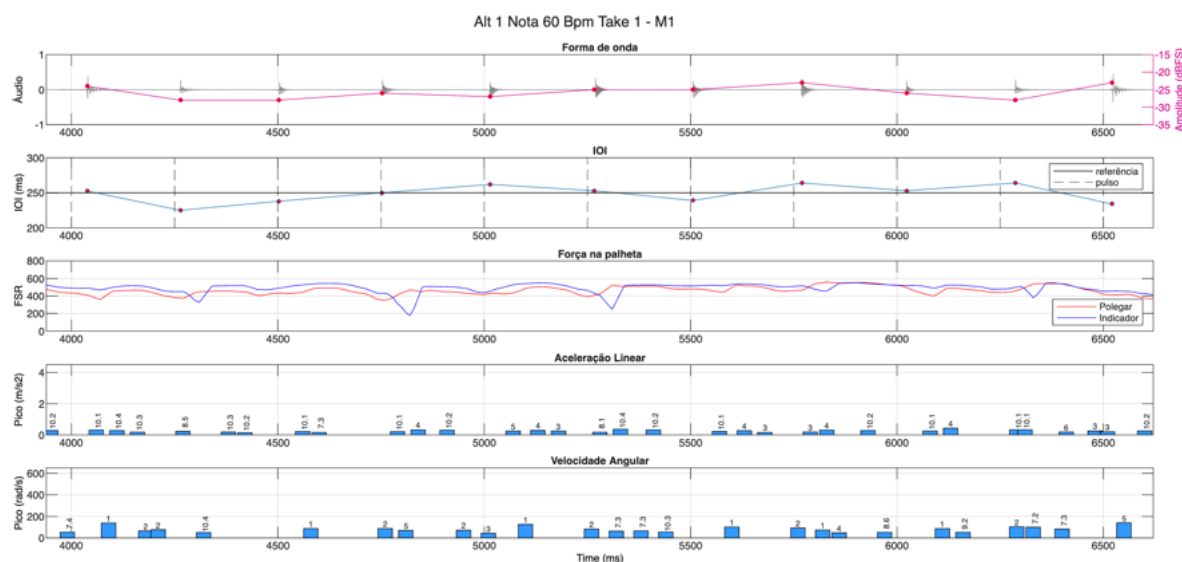


Figura 237: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.

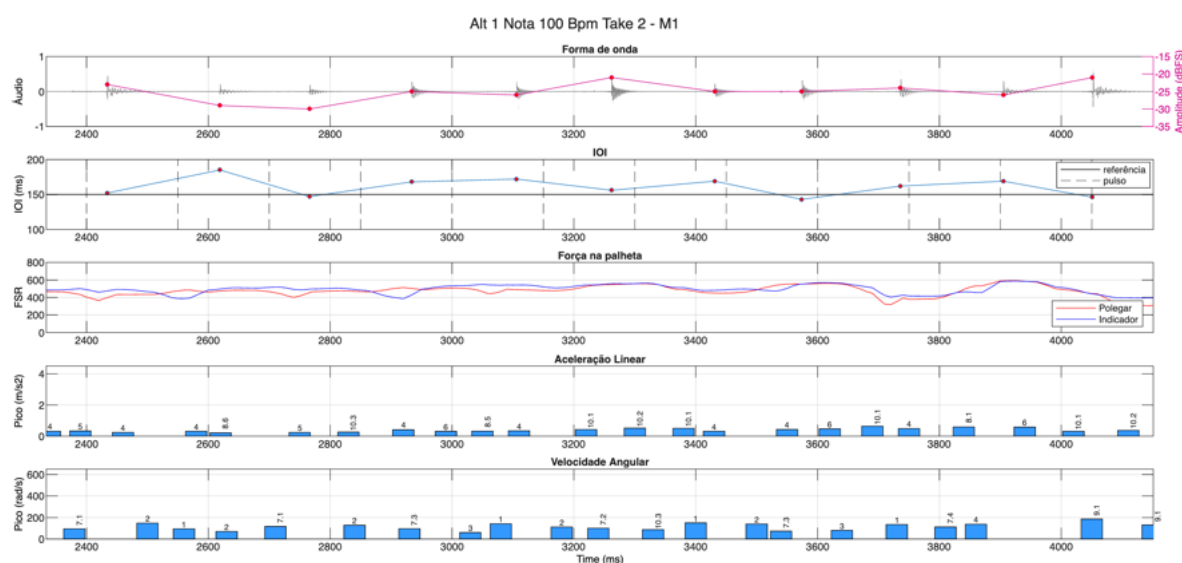


Figura 238: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

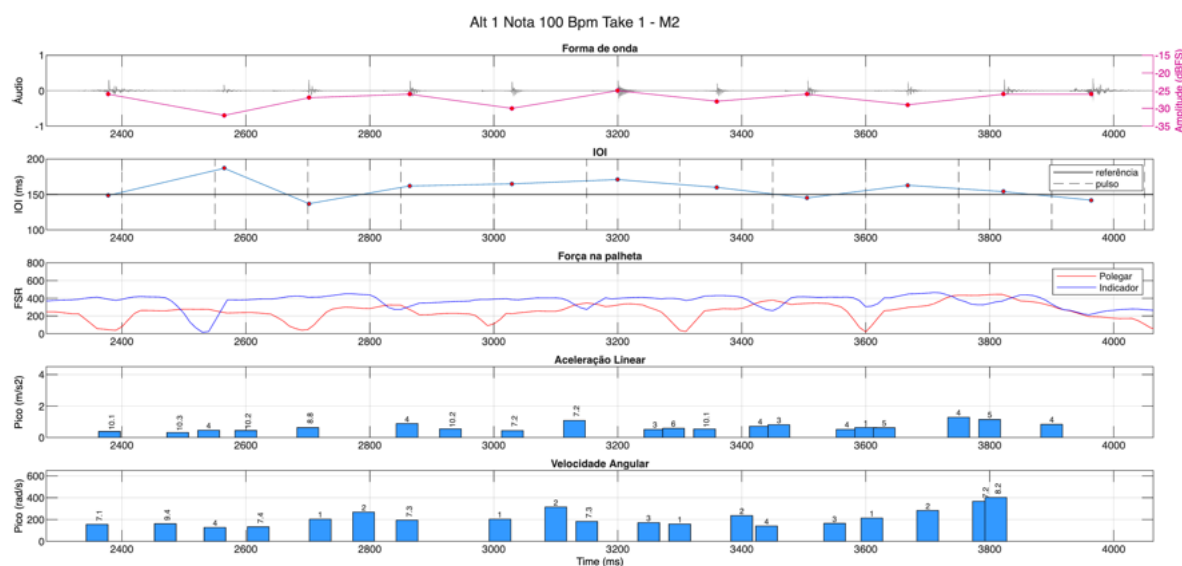


Figura 239: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.

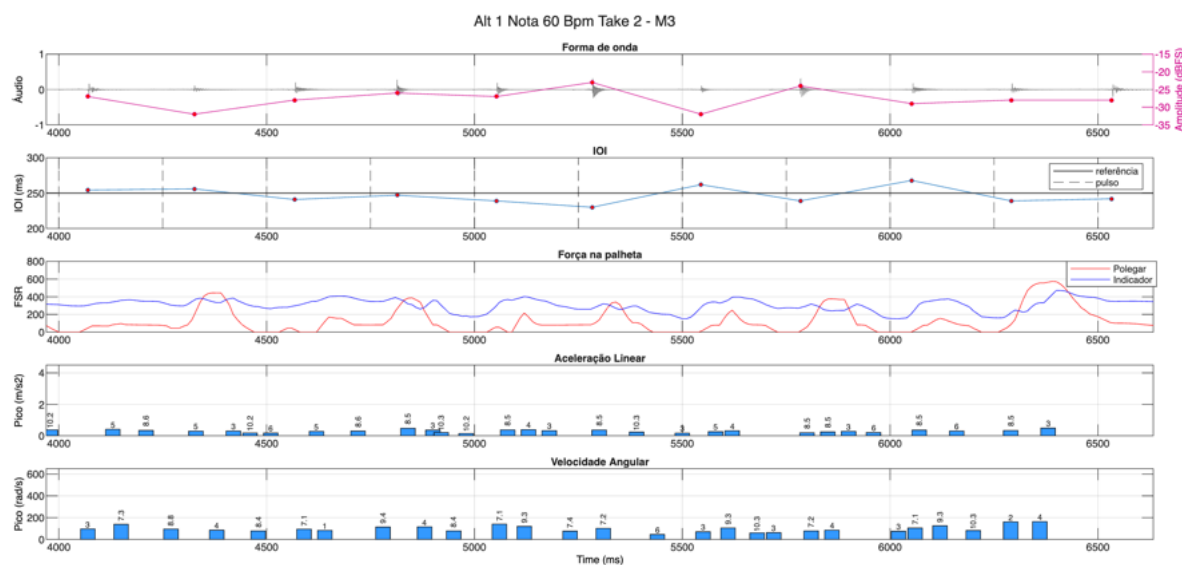


Figura 240: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.

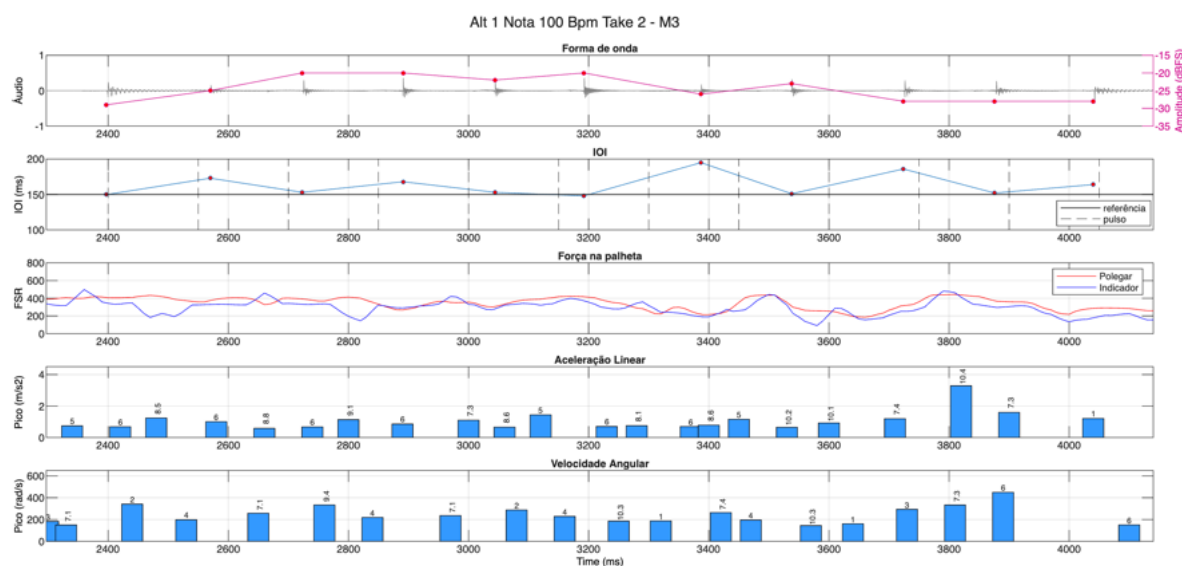


Figura 241: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.

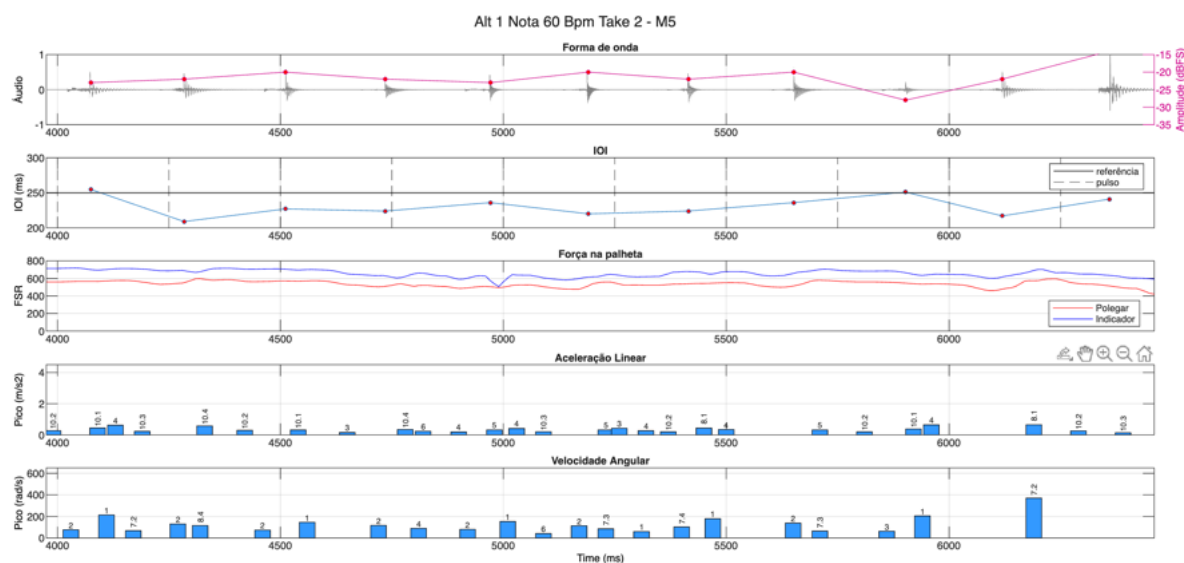


Figura 242: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.

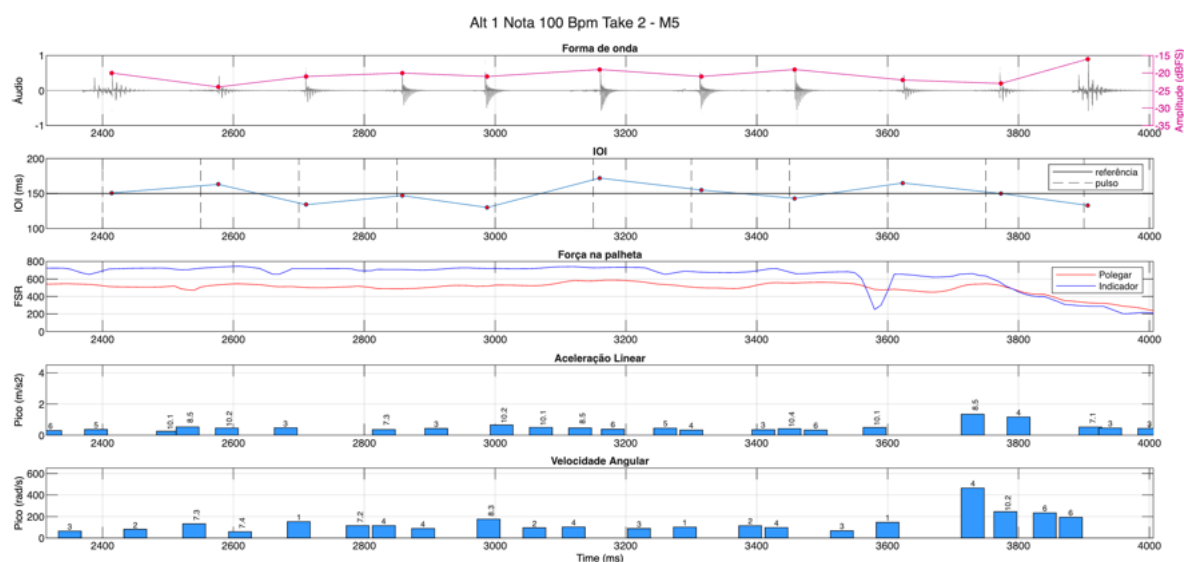


Figura 243: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica alternada com 1 nota por corda, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.

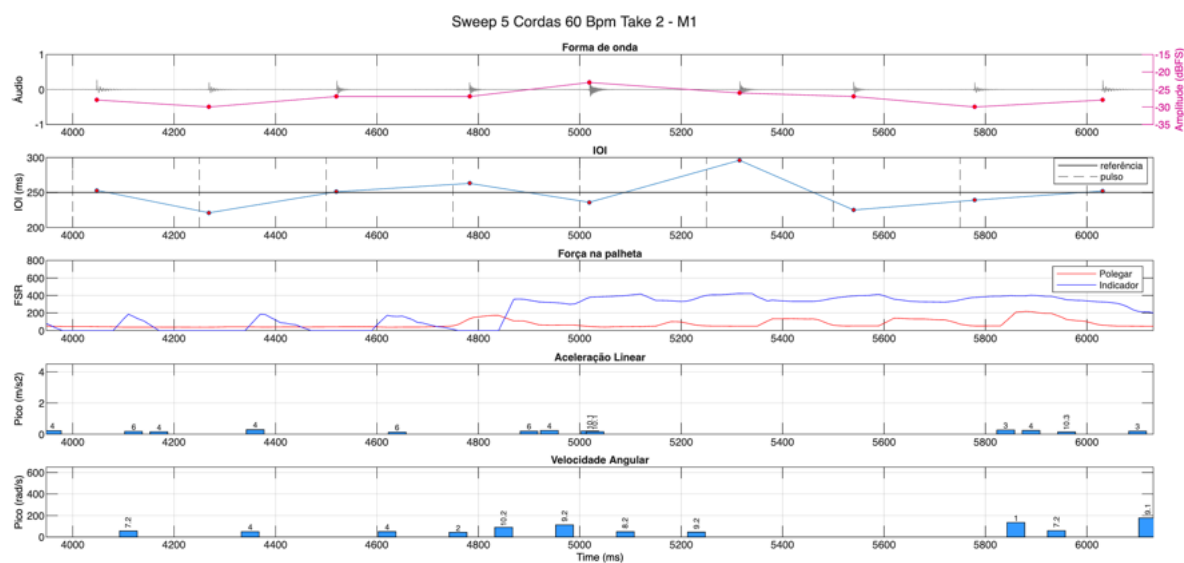


Figura 244: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.

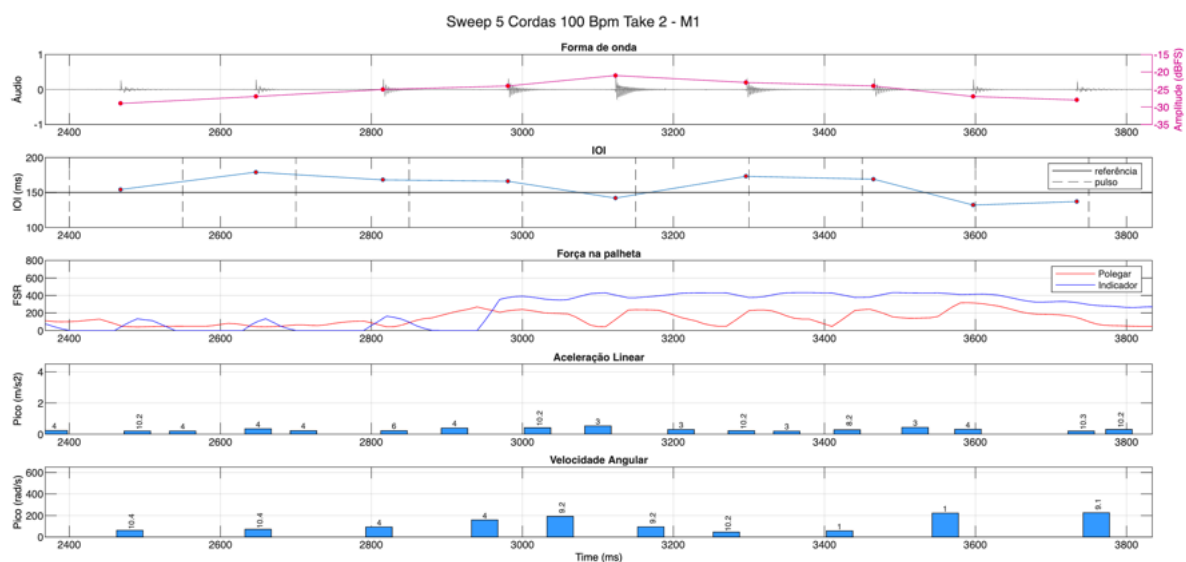


Figura 245: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

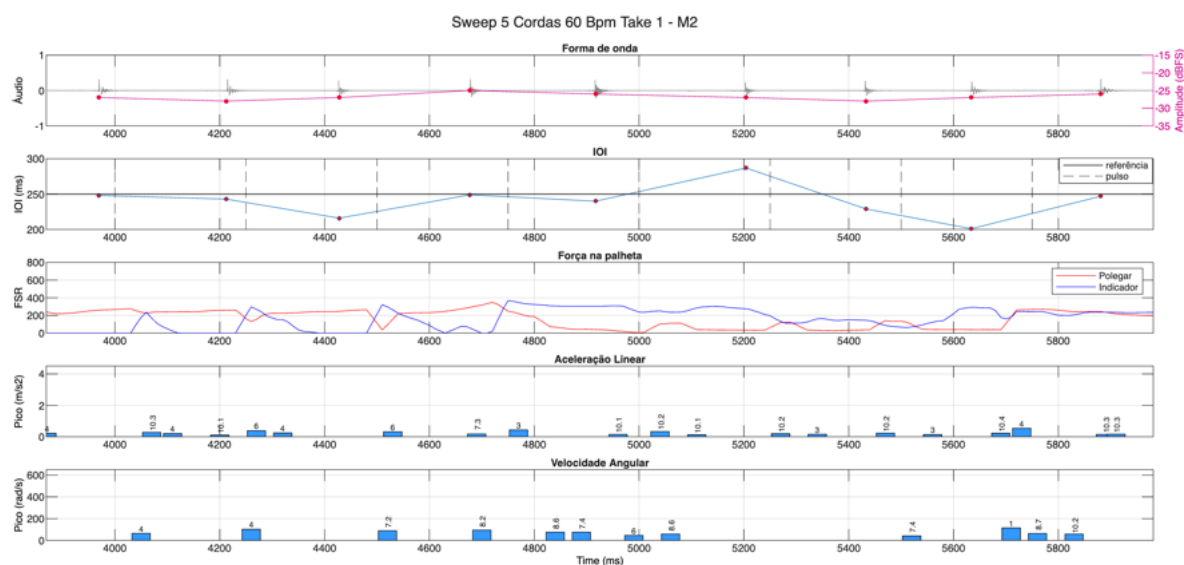


Figura 246: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.

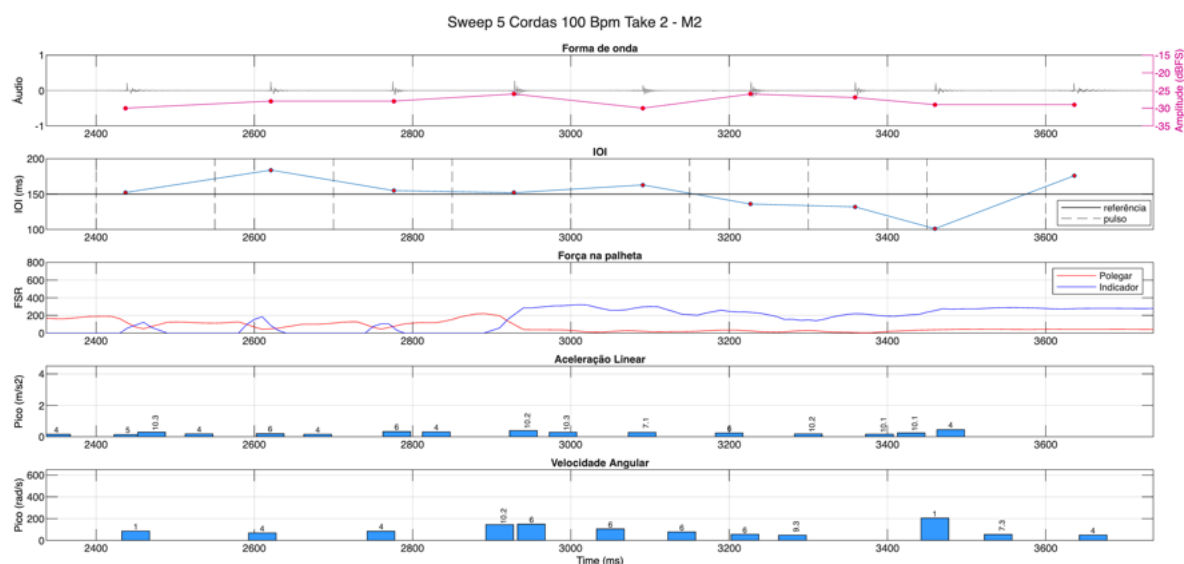


Figura 247: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.

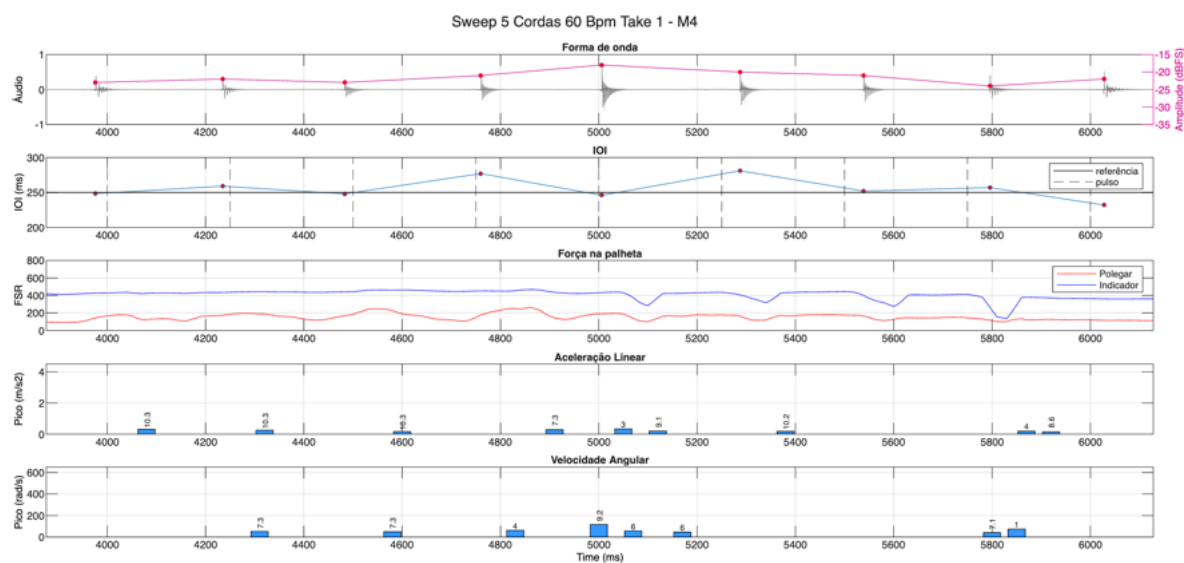


Figura 248: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.

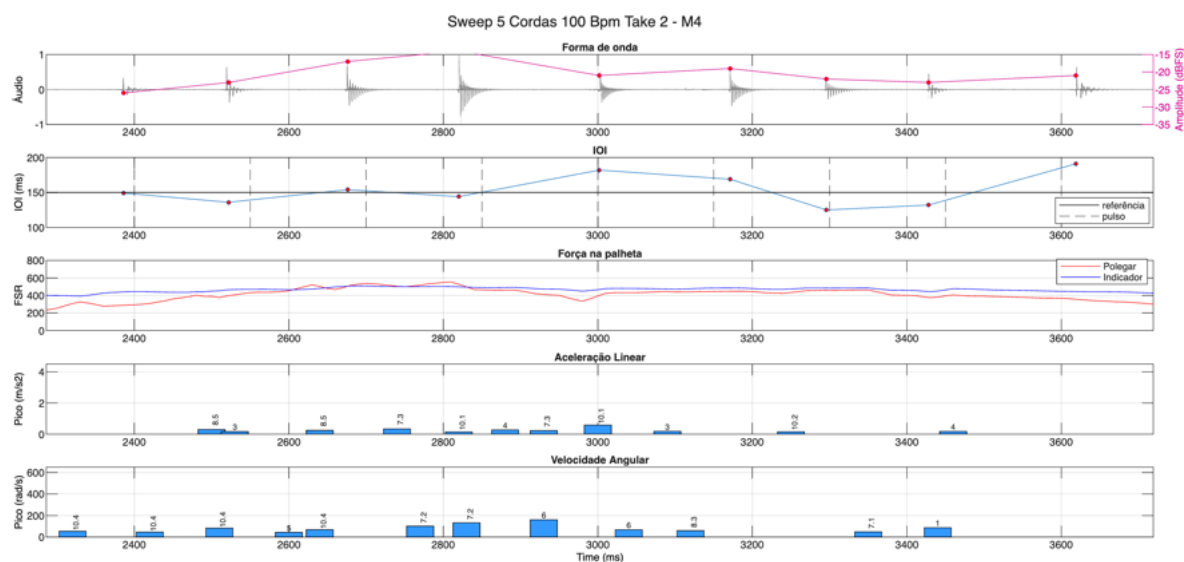


Figura 249: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M4.

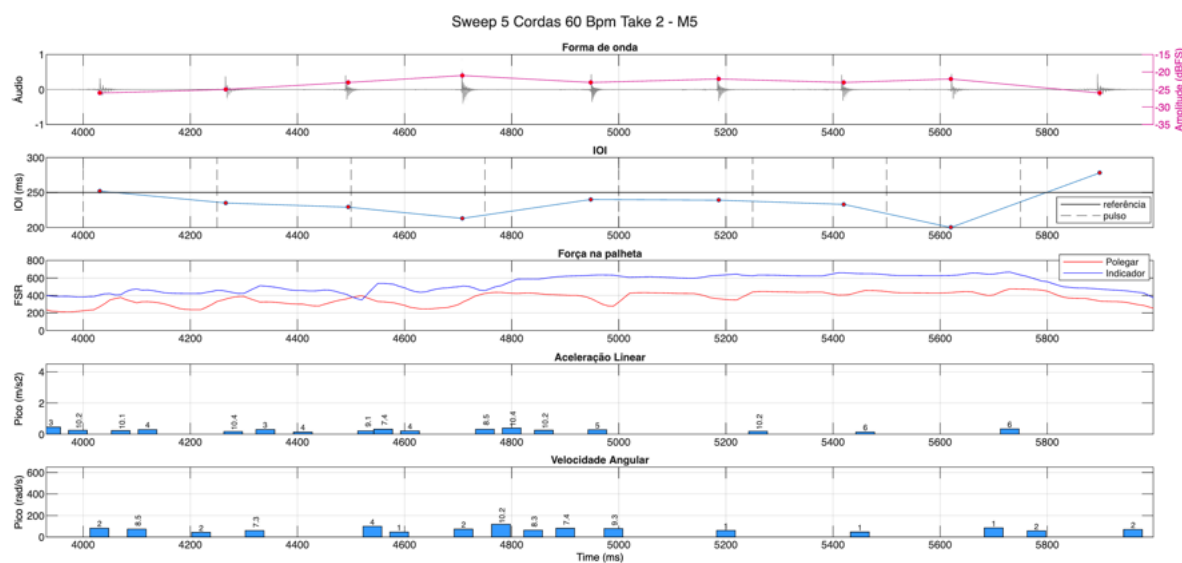


Figura 250: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.

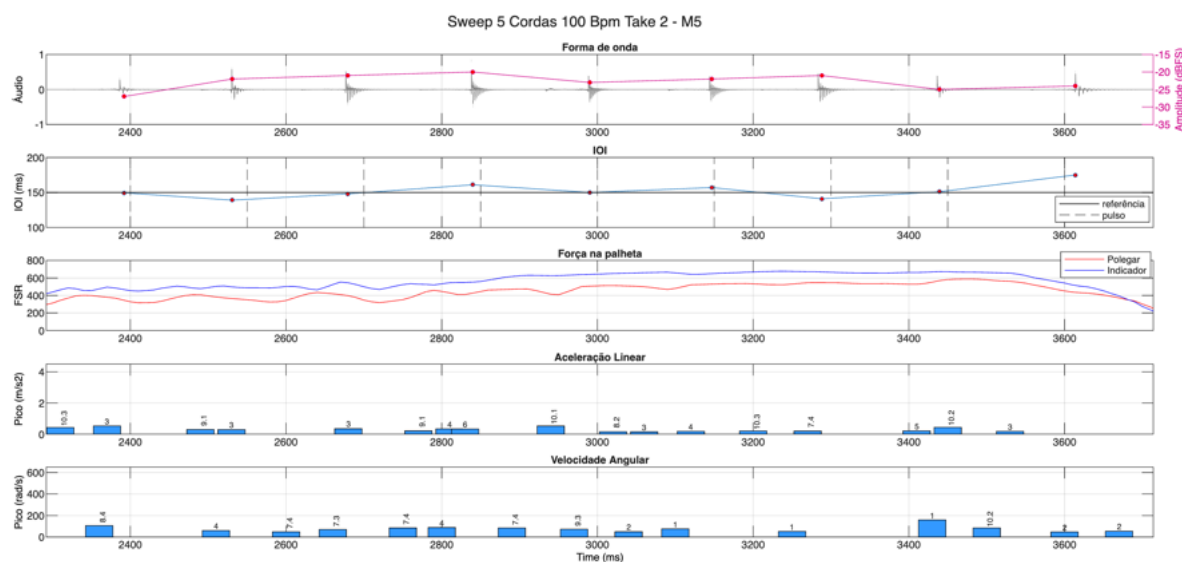


Figura 251: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 5 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.

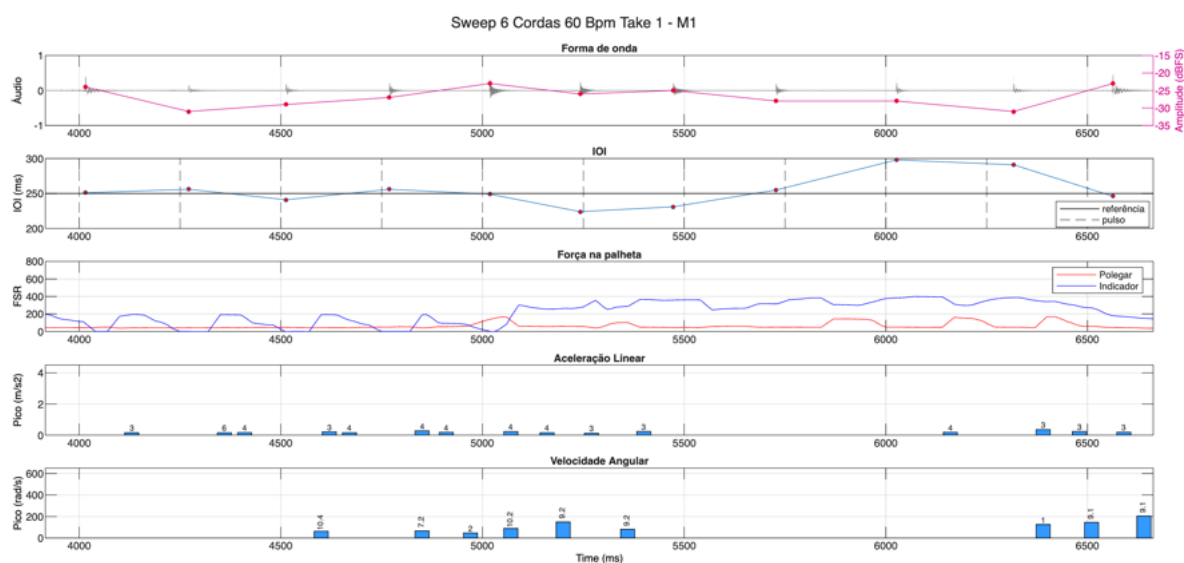


Figura 252: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M1.

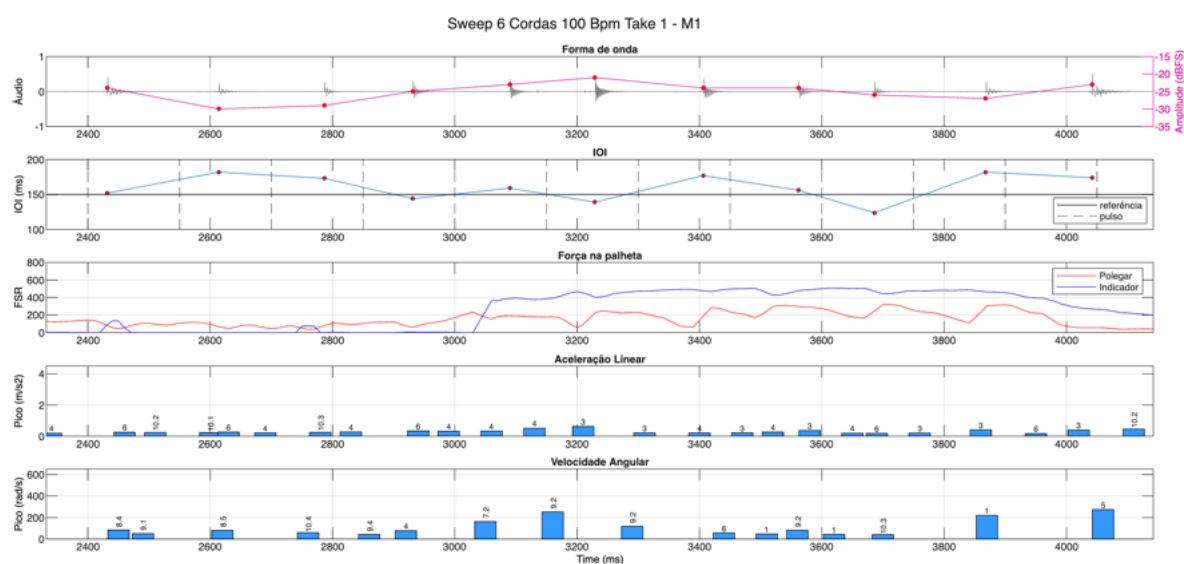


Figura 253: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M1.

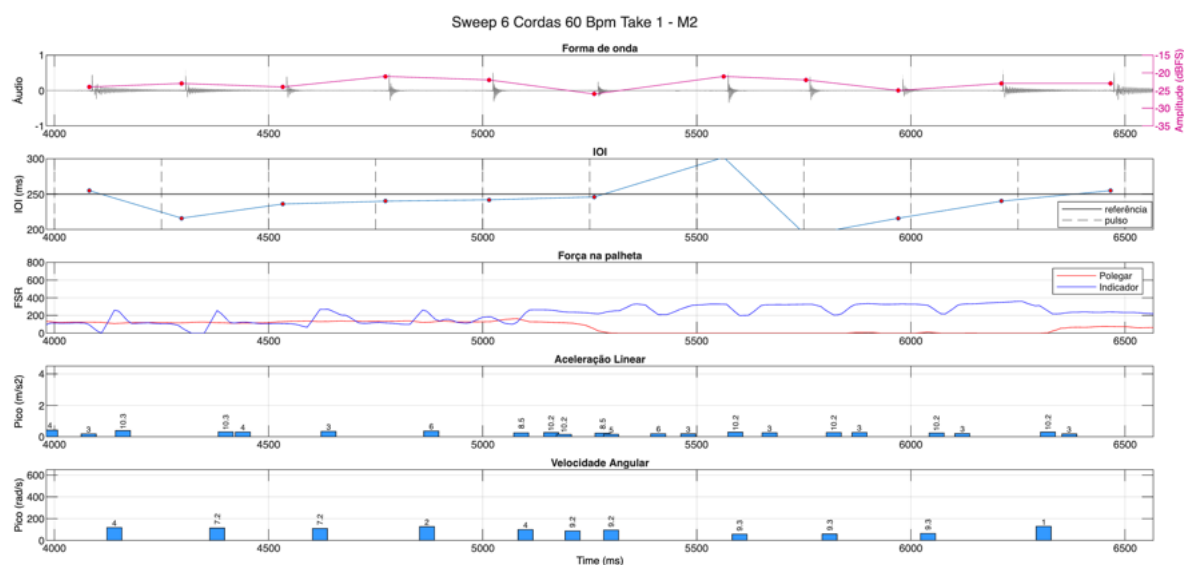


Figura 254: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.

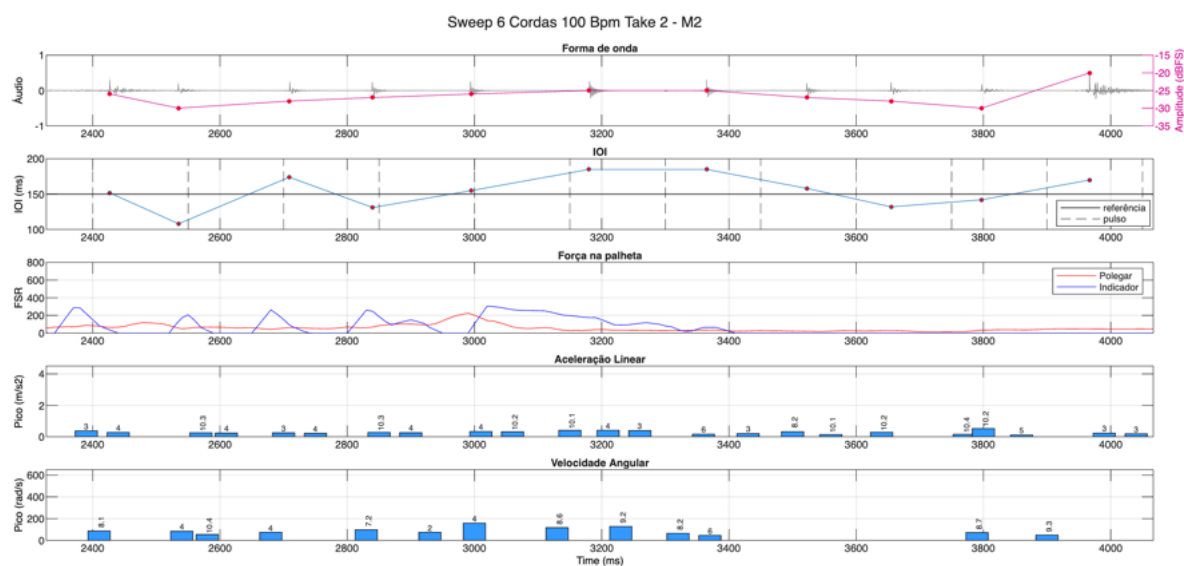


Figura 255: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M2.

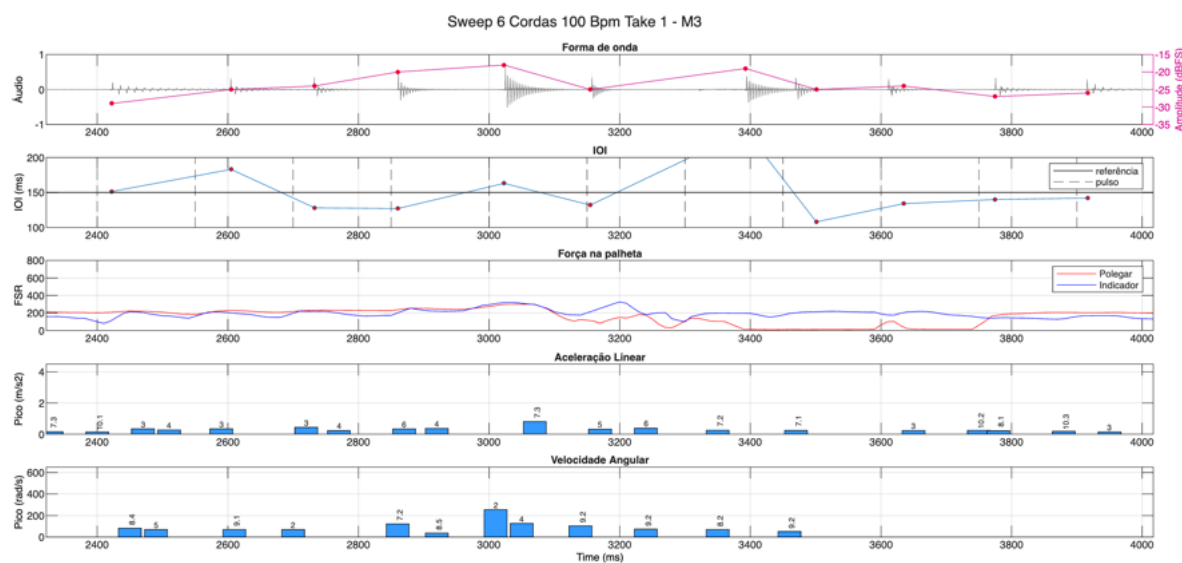


Figura 256: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 1 por M3.

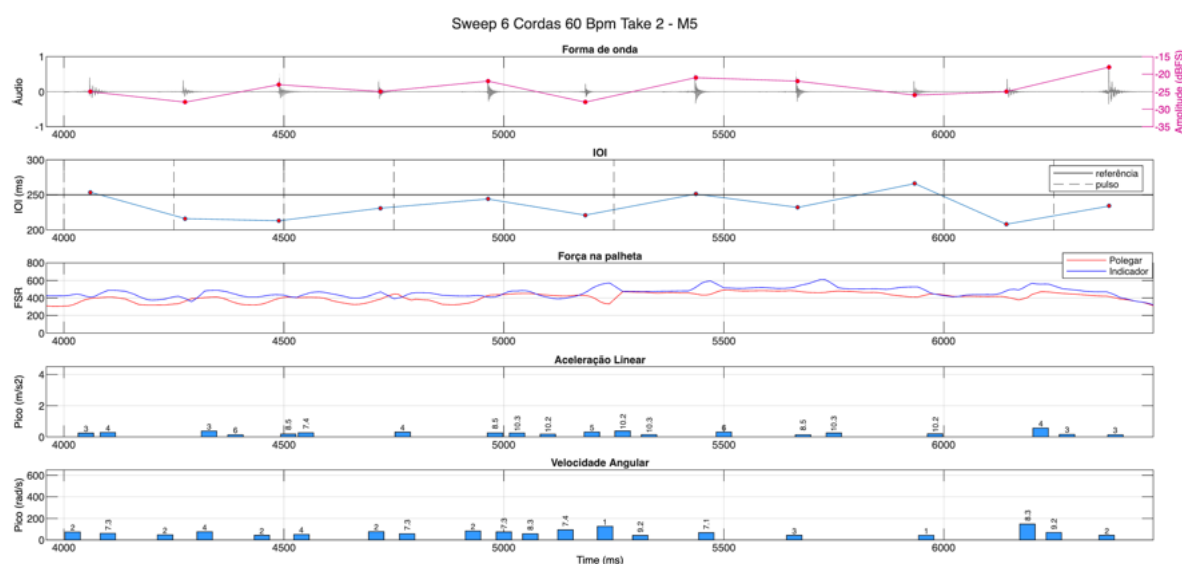


Figura 257: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.

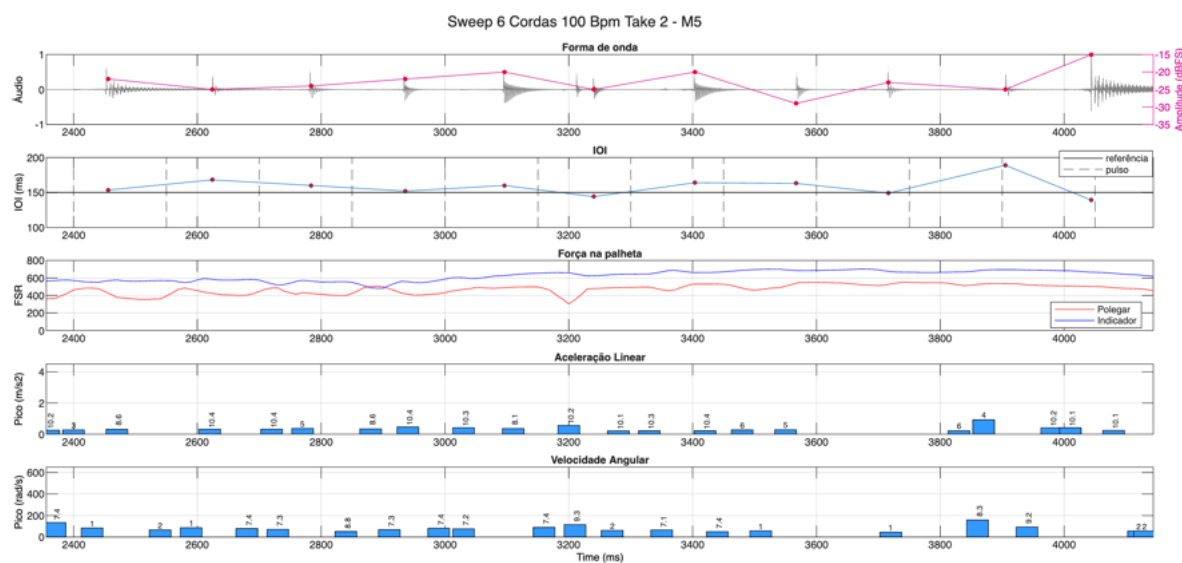


Figura 258: Amplitude, IOI, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *sweep picking* com 6 cordas, realizado a 100 bpm, no take 2 por M5.

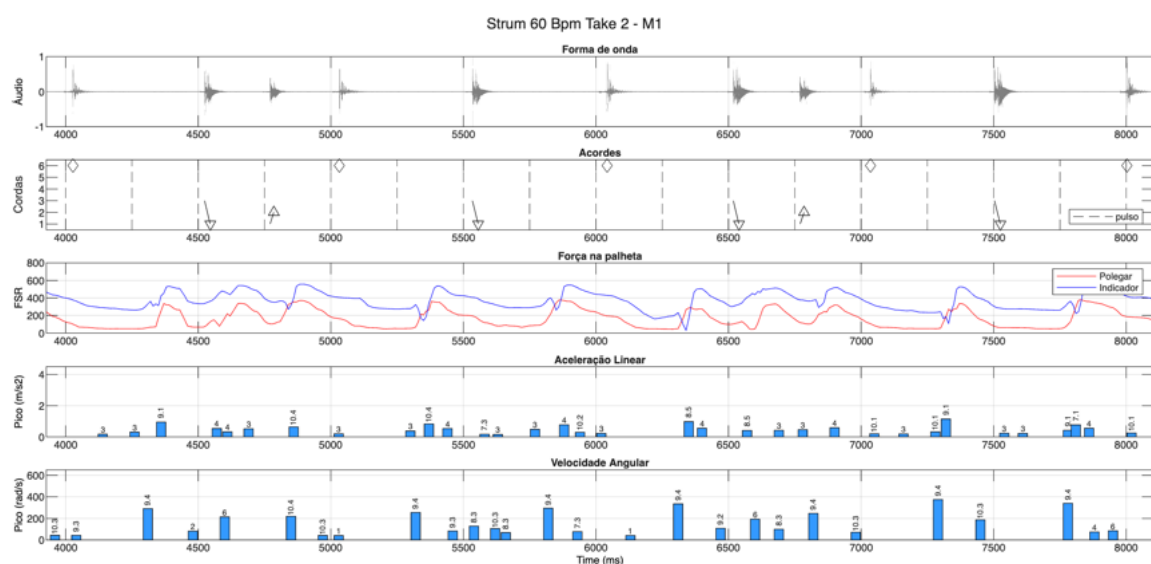


Figura 259: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 2 por M1.

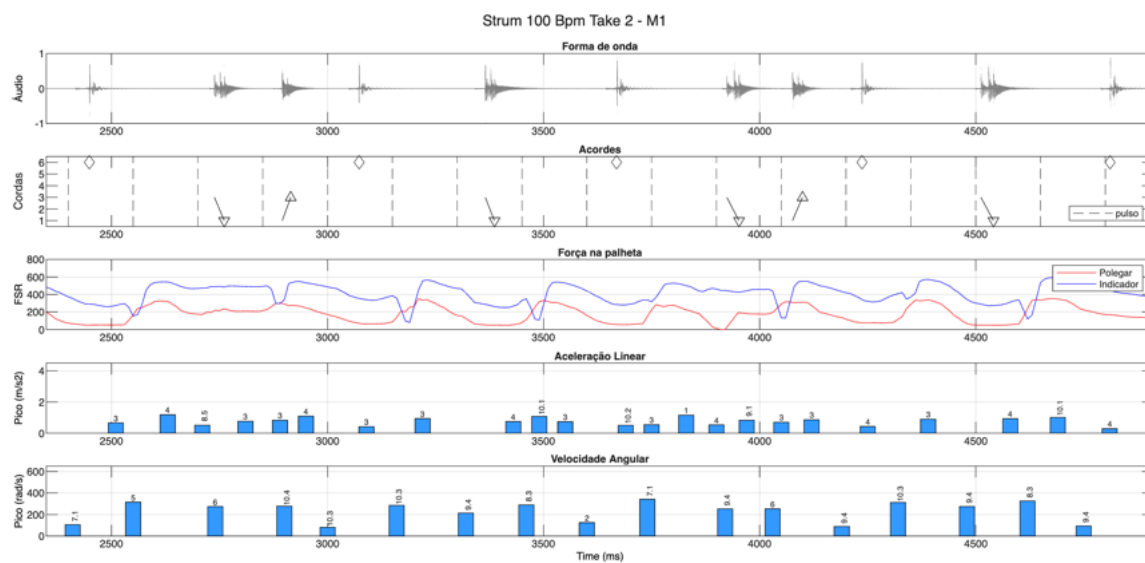


Figura 260: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 2 por M1.

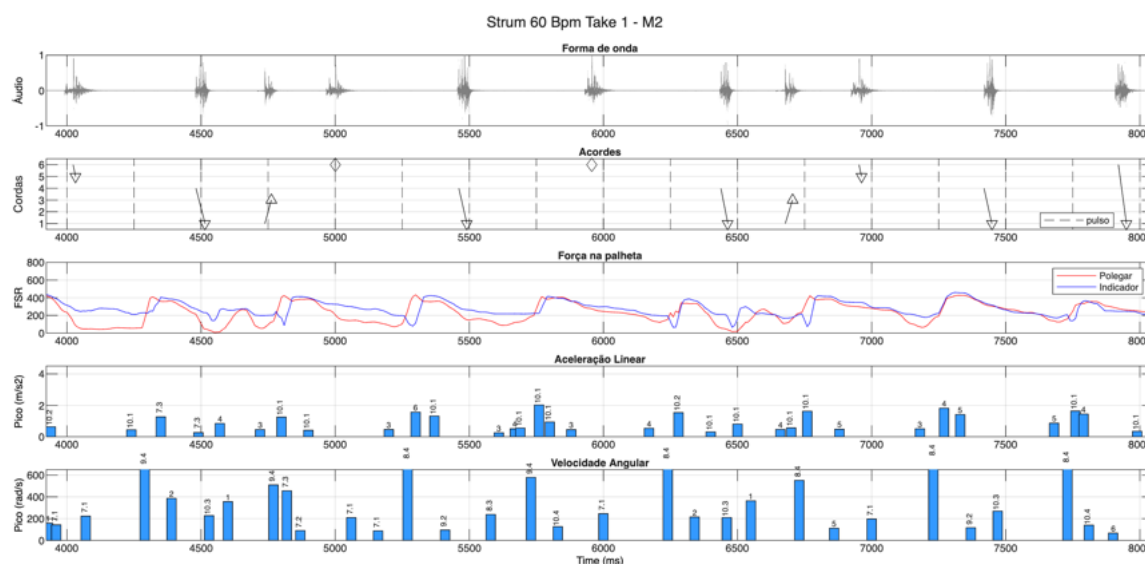


Figura 261: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 1 por M2.

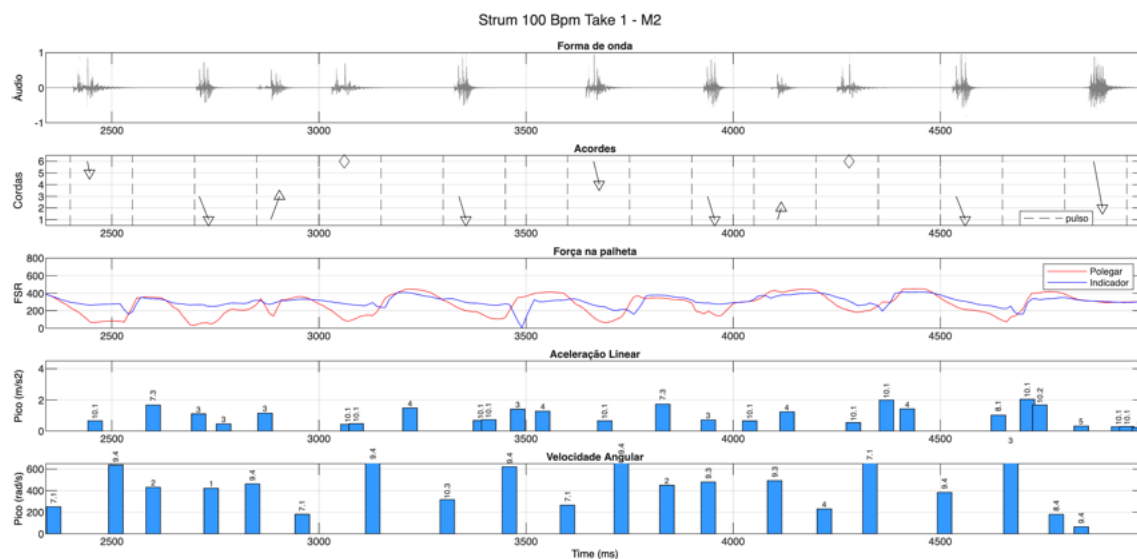


Figura 262: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 1 por M2.

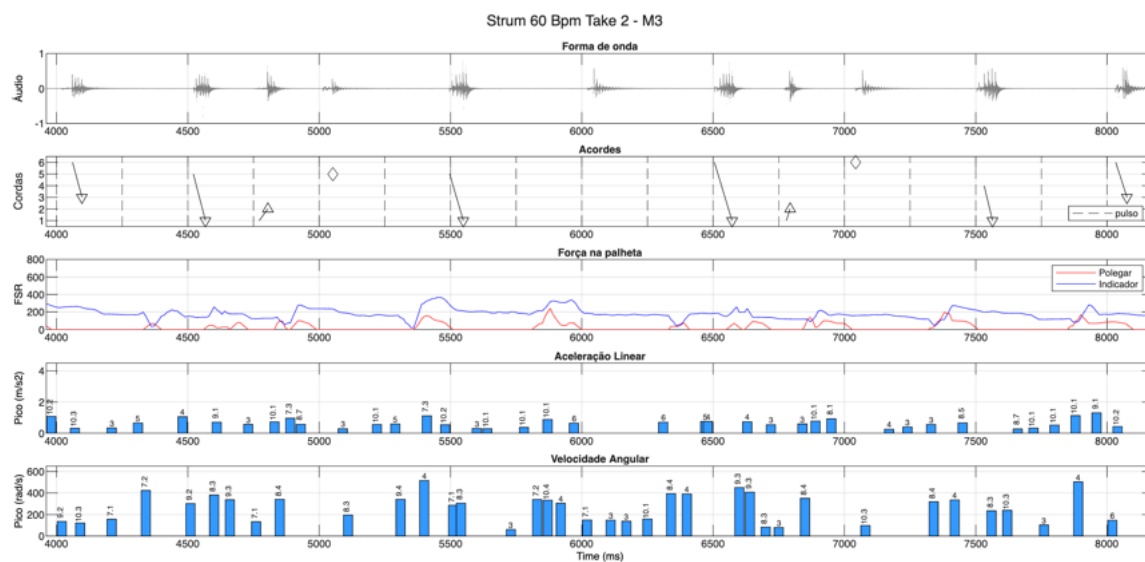


Figura 263: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 2 por M3.

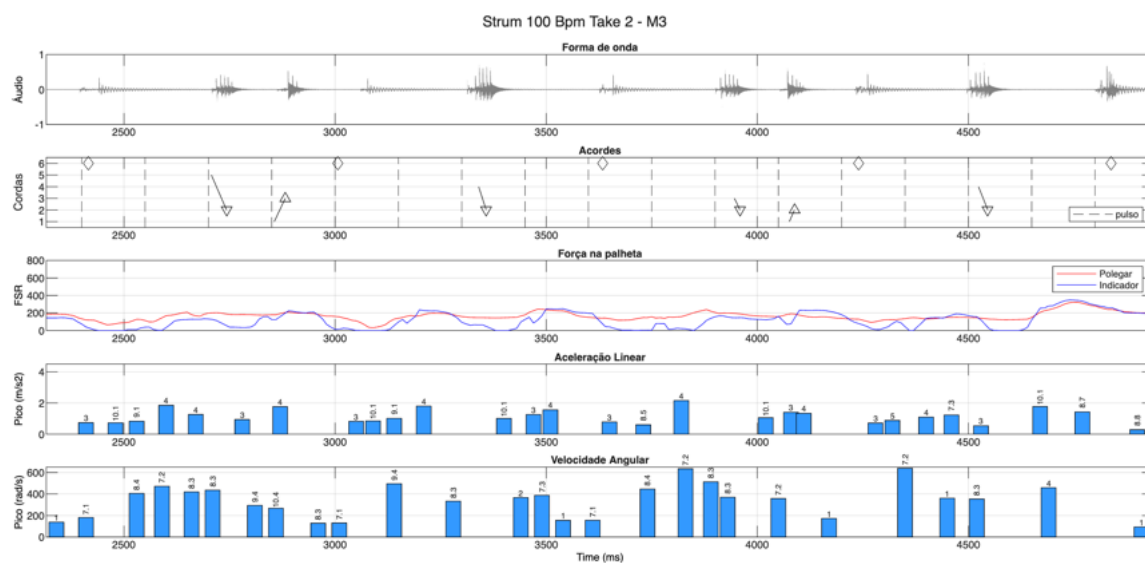


Figura 264: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 100 bpm, no take 2 por M3.

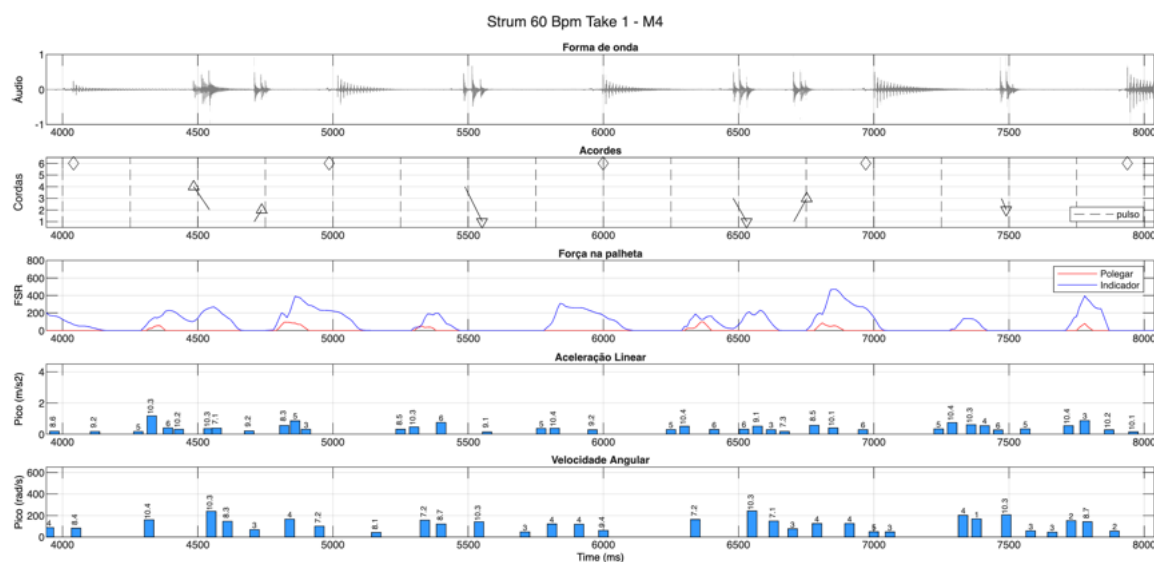


Figura 265: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 1 por M4.

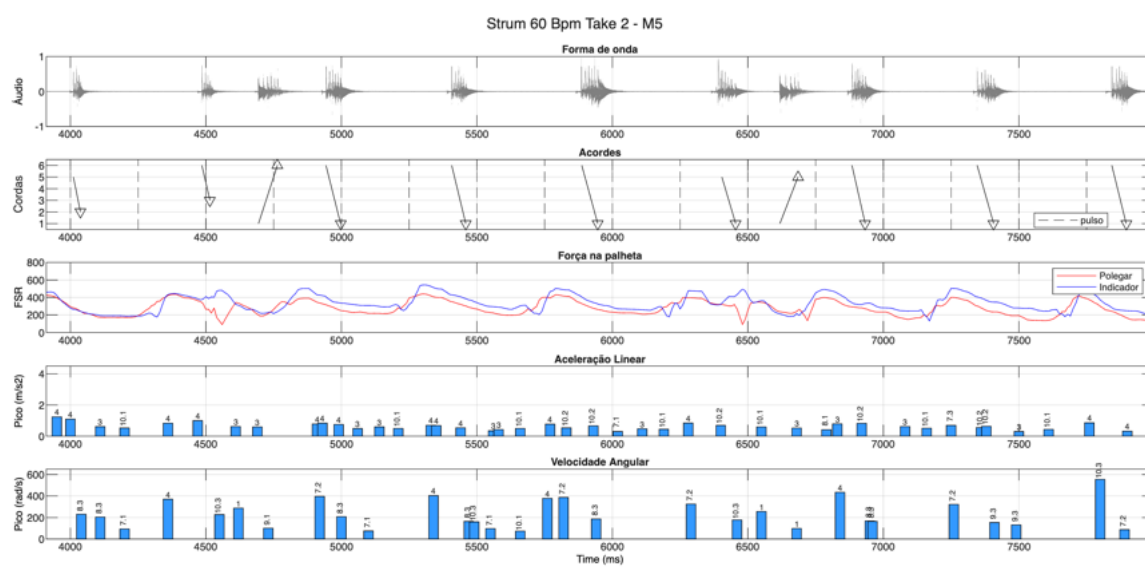


Figura 266: Amplitude, Acordes, FSR, Picos de Aceleração Linear e Picos de Velocidade Angular na técnica de *strumming*, realizado a 60 bpm, no take 2 por M5.

D GUIART

## Transcrição Simbólica em Tempo Real e Transformação Interativa Usando um Violão de Cordas de Nylon Hexafônico

Existe uma rica variedade de instrumentos musicais e atividades que podem ser agrupados sob o termo genérico *guitar*<sup>1</sup>, seja em uma perspectiva histórica ou em uma abordagem mais contemporânea. Dicotomias conceituais, como acompanhamento versus solo, música popular versus música de concerto, clássico versus contemporâneo, acústico versus elétrico e cordas de nylon versus aço, ajudam a ilustrar o vasto campo de atividades no qual o violão está inserido. Contudo, os músicos frequentemente abraçam ambos os polos de qualquer uma dessas dicotomias. Essa abertura contribuiu para o crescimento de um ambiente onde conceitos, técnicas e tecnologias são disseminados de maneira dinâmica e fluida.

Um desenvolvimento técnico recente é o uso de captadores individuais por corda (chamados de “hexafônicos”, já que a maioria dos violões modernos possui seis cordas), tanto em formas magnéticas quanto piezoelétricas, cujo uso foi documentado desde o início dos anos 1980, se não antes (GRAHAM; HARDING, 2015). Desde então, houve uma série de esforços individuais e produtos comerciais dedicados a guitarras ou violões hexafônicos, com cordas de aço ou nylon.

Os violões clássicos possuem um formato característico e um corpo totalmente ressonante, sendo predominantemente tocados com cordas de nylon. Contudo, essas cordas também são utilizadas em estilos musicais que vão além do que poderia ser chamado de música clássica, e outros tipos de violões também são encordoados com nylon. Portanto, neste texto, utilizaremos ambos os adjetivos (clássico e de cordas de nylon) para nos referirmos ao mesmo instrumento, escolhendo o termo mais adequado para cada contexto.

Nos últimos anos, desenvolvemos o GuiaRT, um setup musical interativo baseado em um violão de nylon equipado com captadores piezo hexafônicos. Ele consiste em um conjunto modular de ferramentas em tempo real para a extração de descritores de áudio de baixo nível e para a variação e acionamento de segmentos selecionados durante uma performance; os dados simbólicos são produzidos por algoritmos especialmente escritos ou adaptados para a identificação e caracterização dos sons mais típicos produzidos pelo

---

<sup>1</sup>Optamos por deixar o termo em inglês, pois se refere tanto a violão quanto guitarra

violão. Esses dados simbólicos consistem em uma lista de eventos com valores numéricos para diferentes atributos. Nesta pesquisa, usamos o termo “transcrição” para nos referirmos à extração dos dados simbólicos, sem implicar uma conversão para notação musical ou tablatura. Como as características típicas de cada som do violão são transcritas com diferentes latências, o GuiaRT não foi projetado como um controlador refinado de latência zero para síntese ou controle de som; por outro lado, a maioria de suas funcionalidades pode ser explorada em situações interativas.

Diversos pesquisadores já trabalharam com guitarras/violões equipados(as) com captadores individuais por corda, chamados de hexafônicos. Wessel, Wright e Schott (2002) descreveram uma performance de trio improvisada na qual um dos músicos toca uma guitarra Gibson com captadores piezo fabricados pela RMC. Os músicos exploram tanto as saídas de áudio analógicas quanto os dados simbólicos, emitidos via MIDI por um conversor. Puckette (2007a) também explorou as novas possibilidades oferecidas pela individualização dos sinais das cordas, utilizando uma guitarra Steinberger/Gibson e captadores individuais da Roland. Em um patch de Pure Data, ele incorporou suas próprias rotinas de detecção de ataque, estimativa de pitch e waveshaping, além de efeitos sonoros mais convencionais. De Lima e Ramalho (2008) trabalharam na extração de padrões rítmicos na música de bossa nova, utilizando um violão acústico conectado a um analisador de pitch da Roland. Frisson et al. (2009) propuseram um conjunto de ferramentas de performance para uma guitarra multimodal aumentada, utilizando um instrumento elétrico com captadores hexafônicos, rastreamento de trastes e sensores de pressão. O’Grady e Rickard (2009) usaram um instrumento hexafônico elétrico em um procedimento de transcrição automática baseado em restrições não-negativas. Reboursière et al. (2012) desenvolveram ferramentas — algumas funcionando em tempo real — para a identificação de técnicas da mão direita e esquerda, usando um violão de cordas de nylon da Godin com captadores piezo da RMC. Angulo, Giraldo e Ramirez (2016) combinaram dados musicais extraídos de uma guitarra hexafônica com estratégias de visualização programadas na linguagem Processing. Xi et al. (2018) desenvolveram um conjunto de dados anotados de gravações polifônicas de um violão acústico equipado com captadores magnéticos hexafônicos.

Embora não utilizem captadores individuais, outros trabalhos também desenvolveram ferramentas para extrair características musicais de gravações monofônicas (de uma

única voz) de violão (por exemplo, Traube e Depalle (2003); Özaslan et al. (2011); Hjerrild e Christensen (2019); Hjerrild, Willemsen e Christensen (2019); Bastas et al. (2022)). Foulon, Roy e Pachet (2014) desenvolveram um método para classificar modos de tocar violão — linhas de baixo, acordes, melodias — a partir de gravações de diferentes tipos de violão. A transcrição de gravações polifônicas para tablatura de violão é proposta por Barbancho et al. (2012b) e por Kehling et al. (2014), e para digitação de acordes por Barbancho et al. (2011a).

Comparado a trabalhos semelhantes, nossa contribuição reside no desenvolvimento de uma interface acústico-digital construída sobre um violão de cordas de nylon, sem modificar suas características fundamentais de execução, e oferecendo uma representação simbólica da maioria das características de sua produção sonora. Inicialmente descrevemos as influências, motivações e métodos de pesquisa, seguidas pela estrutura e características fundamentais do setup. Em seguida, discutimos as estratégias implementadas para estimar descritores de baixo nível e os parâmetros correspondentes. Depois disso, descrevemos as ferramentas desenvolvidas para a transformação interativa de trechos transcritos, incluindo o uso de descritores de nível médio, a definição de texturas básicas, o design de variações, as opções de acionamento e alguns processamentos de áudio personalizados. Esses recursos podem apresentar uma qualidade idiossincrática inevitável; por outro lado, são essenciais para uma compreensão completa de uma configuração musical interativa.

### **Motivações e influências**

Este projeto tem raízes em uma experiência musical pessoal com o violão, que abrangeu prática instrumental, composição, exploração eletroacústica e programação, normalmente com sobreposições entre essas áreas. Uma influência inicial foi o programa Jam Factory (ZICARELLI, 1987), que improvisava em tempo real sobre materiais musicais tocados em dispositivos MIDI. Apenas um ano após o lançamento desse software, a Yamaha lançou o Disklavier, um piano acústico equipado com MIDI. As possibilidades de executar simultaneamente música e comandos digitais em um instrumento acústico, como no *Duet for One Pianist* de Risset (RISSET; DUYNE, 1996), também deixaram uma profunda impressão em nossa memória, assim como o *Voyager* de George Lewis (LEWIS, 2000), uma solução híbrida que explora a análise em tempo real do som de um trombone e usa essas informações para gerar mensagens MIDI de forma algorítmica para sintetizadores digitais

e até mesmo um Disklavier. GuiaRT é o resultado de esforços contínuos na construção de um violão de nylon aumentado capaz de criar versões modificadas da música tocada no momento. As capacidades de transcrição (no sentido mencionado anteriormente) foram um ponto de partida importante para nós. Nessa busca, a segmentação e a caracterização básica dos eventos musicais são essenciais; no caso dos sons do violão, isso significa detecção de início da nota (*onset*) e estimativa de altura e amplitude. Para a detecção de início, exploramos diferentes ferramentas descritas por Bello et al. (2005) e escolhemos, após experimentação intensa, uma abordagem mencionada por Puckette (2007b): a comparação de valores de pico com valores médios. Também descobrimos que as ferramentas para estimativa de altura desenvolvidas por Puckette, Apel e Zicarelli (1998) funcionaram melhor para nossos propósitos. A caracterização adicional dos sons do violão inspira-se no trabalho de Reboursière et al. (2012) e de Peeters et al. (2011), a partir dos quais adaptamos algumas ferramentas. Embora se possa encontrar uma literatura significativa sobre a extração de características musicais de gravações de violão/guitarra, a maior parte dela não se aplica facilmente a ambientes interativos.

Uma observação de Puckette (2007a) sobre sintetizadores de guitarra também influenciou nosso planejamento de estratégias interativas: “Tais instrumentos cometem muitos erros audíveis, e também sofrem com a latência adicional que vem do analisador de altura.” Tentamos minimizar erros semelhantes, evitando estimar descritores de áudio no início de cada evento musical. Características sonoras distintas exigem intervalos de latência variáveis para uma estimativa confiável, como mostrado na seção Extração de Descritores de Baixo Nível. Essa opção não compromete a precisão da transcrição rítmica, que se baseia apenas na detecção de início. Por outro lado, alguns gestos de performance, como pressões de pedal e ataques de notas, podem ativar processamentos no sistema com uma latência mínima.

A exploração de dados musicais simbólicos em sistemas musicais interativos já conta com uma tradição relativamente longa, cobrindo uma variedade de vocabulários musicais e estratégias criativas envolvendo métrica e tonalidade, diversas regras composicionais e improvisação livre (por exemplo, Rowe (1993); Essl (1996); Risset e Duyne (1996); Winkler (1998); Lewis (2000); Rowe (2001)). O GuiaRT também se baseia em dados simbólicos, atualizando e adaptando ideias apresentadas na dissertação de mestrado de Freire (1993), que descreve a manipulação de acordes de violão (listas de pares

de corda e traste) na composição de obras instrumentais. Essas ferramentas exploram características topológicas do violão, seguindo estratégias composicionais utilizadas por Leo Brouwer e Heitor Villa-Lobos, entre outros.

### **Implementação interativa**

Embora possamos apontar as influências e motivações por trás do desenvolvimento do GuiaRT, a visão geral do desenho da pesquisa foi sistematizada apenas posteriormente, devido à variedade de tópicos e limitações de cronograma em cada fase do processo. Um fator sempre presente foi a opção por uma linguagem de programação em tempo real e interativa desde o início, que guiou todos os processos subsequentes. Nossos primeiros resultados estavam ligados ao campo da musicologia empírica, analisando técnicas específicas de mão direita no violão, com uma forte ênfase no processamento de áudio. Após isso, identificamos diversos pontos de contato com as áreas de interação humano-computador e novas interfaces musicais.

Nessas áreas, é comum utilizar um design iterativo, alternando entre estágios de implementação, avaliação e modificação, até alcançar um resultado satisfatório (GUREVICH, 2016; HOLLAND et al., 2019). No presente caso, até agora distinguimos três fases distintas desse ciclo iterativo, a primeira dedicada à extração de características elementares dos eventos musicais tocados no violão: inícios, finais, alturas e amplitudes. A segunda fase focou na identificação de diferentes sonoridades, como sons ligados e percussivos, pizzicatos, harmônicos e vibratos. A última fase abordou a transcrição de trechos selecionados tocados por diversos violonistas e o uso interativo das ferramentas desenvolvidas.

Um intenso acoplamento mecânico entre as cordas de nylon do violão, que causa considerável interferência, apresentou o primeiro e inesperado desafio. Em uma abordagem de tentativa e erro, apoiados pela literatura sobre processamento de áudio adaptativo (ZÖLZER, 2011), finalmente desenvolvemos estratégias para lidar com essa situação em diversas texturas do violão. Com a ajuda dessas ferramentas, pudemos analisar técnicas variadas como tremolos, acordes em bloco e dedilhados, e trechos de melodia com acompanhamento de baixo (FREIRE; NÉZIO, 2013; FREIRE; NÉZIO; REIS, 2014; FREIRE et al., 2018). Um novo conjunto de problemas surgiu com sonoridades como harmônicos, pizzicatos, legatos e vibratos, para os quais os trabalhos mencionados foram um ponto de

partida sólida. Para essa tarefa, usamos múltiplos ciclos curtos e iterativos. Após gravar amostras de som de diversos músicos, programamos protótipos de ferramentas DSP para sua identificação inequívoca. Os músicos foram então convidados a testar a confiabilidade das ferramentas em tempo real, o que inevitavelmente trouxe sonoridades limítrofes à tona; nesse procedimento de ida e volta, foi possível incluir parâmetros adicionais e refinar suas configurações até que resultados satisfatórios emergissem para as instâncias mais típicas. Na terceira fase, diferentes violonistas selecionaram e gravaram trechos musicais, sendo suas escolhas guiadas por dificuldades técnicas ou habilidades individuais. Nesses casos, a avaliação foi equilibrada entre a fidelidade da transcrição e o grau de precisão da performance. Essa experiência proporcionou um conjunto básico de parâmetros para diferentes técnicas, sobre os quais pudemos conceber um caminho rápido para cenários interativos. Fallman (2003) distingue três abordagens para a interação humano-computador: uma conservadora, guiada por princípios científicos; uma abordagem pragmática ou de resolução de problemas; e uma abordagem “romântica”, voltada para a criação de obras de arte. As duas primeiras fases do nosso projeto correspondem à abordagem pragmática, com algumas influências da abordagem conservadora, enquanto a terceira fase aponta para a abordagem romântica.

Duas contribuições metodológicas merecem menção aqui. O tratamento do acoplamento mecânico entre as cordas (veja a próxima seção) exigiu uma estratégia em que a análise de cada corda precisava considerar uma possível atividade nas outras cinco, com uma parametrização não linear. Acreditamos que esta solução foi o resultado da prática em um ambiente interativo que favoreceu o teste rápido de diferentes parâmetros e texturas musicais. A aplicação de ciclos iterativos com base em “dados ao vivo” também fornece um ambiente privilegiado para desenvolver um setup capaz de lidar com diferentes modos de tocar e níveis de habilidade. De modo geral, nosso setup deriva da acumulação de ferramentas simples em um modo progressivamente complexo, levando a um instrumento aumentado que cobre a maioria dos aspectos da técnica de violão sem exigir esforços adicionais dos músicos, além do uso de pedais.

## **Princípios e estrutura do GuiaRT**

Nosso setup possui módulos para transcrição da música tocada em um violão de nylon, para análise e transformação de trechos selecionados, para processamento de áudio

e para estratégias de disparo e performance personalizáveis. Também estão disponíveis diferentes opções de visualização de dados. Antes de apresentar as principais características da configuração, é importante discutir os diferentes tipos de sons que podem ser produzidos em um violão de nylon, muitos dos quais podem ser capturados por captadores piezoelétricos. Como o GuiaRT opera em tempo real, sua entrada esperada é um fluxo de seis canais de áudio não segmentados.

## A Variedade de Sons Produzidos em um Violão de Nylon

No violão, o contato direto entre as cordas e os dedos de ambas as mãos permite a criação de eventos sonoros variados. Geralmente, a mão direita é responsável pelas condições iniciais e pela energia necessária para colocar uma corda em vibração, enquanto a mão esquerda controla seu comprimento efetivo. As técnicas da mão direita incluem controle de amplitude, posição do ataque — normal, sul tasto, sul ponticello — e a escolha de diferentes tipos de ataque: várias combinações de carne e unha, toque livre ou apoiado, pizzicato e sons percussivos. Por outro lado, características como ligados (*hammer-on* e *pull-off*), *bend*, vibrato e glissando são atribuídas às técnicas da mão esquerda. Os finais de nota podem ser obtidos por decaimento natural ou pela ação de interrupção de uma ou ambas as mãos. Preparar um novo ataque com um dedo da mão direita em uma corda que já está vibrando normalmente causa um final de nota, devido a uma breve pausa forçada na oscilação. Soltar um dedo da mão esquerda da escala sem bloquear a vibração — um tipo de *pull-off* suave — também pode determinar um final de nota. A ocorrência de transientes nos finais de nota não é incomum, exceto para aqueles obtidos pelo decaimento natural.

Harmônicos podem ser alcançados pela ação de uma ou ambas as mãos, como será detalhado a seguir. A interferência de uma ação exercida em uma corda específica sobre as outras cordas — silenciosas ou em vibração — não deve ser negligenciada, mesmo quando nenhuma ressonância é produzida. Por fim, um conjunto de sons sem altura definida — desejados ou indesejados — também está presente em muitas performances no violão, devido a ruídos de arranhões, trastejamento, tambora, percussão no tampo, contato acidental de ambas as mãos com as cordas, etc. Se alguns desses sons geralmente indesejados são facilmente mascarados pela atividade musical presente nas outras cordas durante a execução, eles são, ainda assim, destacados pelos captadores individuais de cordas. Nos-

sas estratégias de programação buscam identificar a maioria desses sons e oferecer opções para evitar alguns deles. É importante notar que muitas técnicas estendidas — como percussão em diferentes partes do instrumento ou tocar do lado da pestana em uma corda parada — não são bem capturadas por esses captadores, que estão fixos no cavalete. Sua posição fixa também prejudica a captura do que poderíamos chamar de som completo de um violão clássico, que inclui também as ressonâncias do corpo e da cavidade de ar, todas misturadas no ambiente ao redor.

## Hardware e software

O GuiaRT é inteiramente baseado no processamento em tempo real de áudio multicanal fornecido por um violão hexafônico de cordas de nylon, e o sistema é construído com diversos elementos de hardware e software. Seguindo a mesma estratégia adotada pela maioria dos pesquisadores e artistas mencionados acima, decidimos começar praticamente do zero, em vez de usar um sistema hexafônico comercialmente disponível. O projeto começou em 2011 com um violão espanhol Alhambra (modelo E-533, ano 1978) e captadores piezoelétricos LRBaggs. Em 2016, adquirimos um novo instrumento — um Yamaha CG182 — e captadores RMC para ambos os instrumentos. Os violões também possuem uma entrada XLR de 7 pinos na lateral inferior do corpo, que transmite os seis sinais de saída independentes, não balanceados e de alta impedância (Figura 1).

Para casar as impedâncias e balancear os sinais, atualmente usamos direct boxes Behringer, cujas saídas são enviadas para uma interface de áudio Focusrite (modelo Saffire Pro40), onde são digitalizadas a uma frequência de amostragem de 48 kHz com resolução de 24 bits. Esta é uma configuração adequada para a aquisição de sinal, construída com equipamentos de áudio prontamente disponíveis em nosso laboratório. Outras configurações também são possíveis, sendo os requisitos principais o casamento de impedância (essencial para cabos mais longos e ambientes com ruído de RF) e o uso de sinais balanceados.

O ambiente de programação é o Max, da Cycling '74, com objetos adicionais de terceiros gratuitos desenvolvidos para processamento de sinal. Como o GuiaRT está em desenvolvimento há vários anos, tomamos o cuidado de manter todos os módulos atualizados, sendo atualmente totalmente compatível com máquinas de 64 bits. Processamentos de sinal adicionais personalizados também são realizados no Max e podem utilizar o áudio

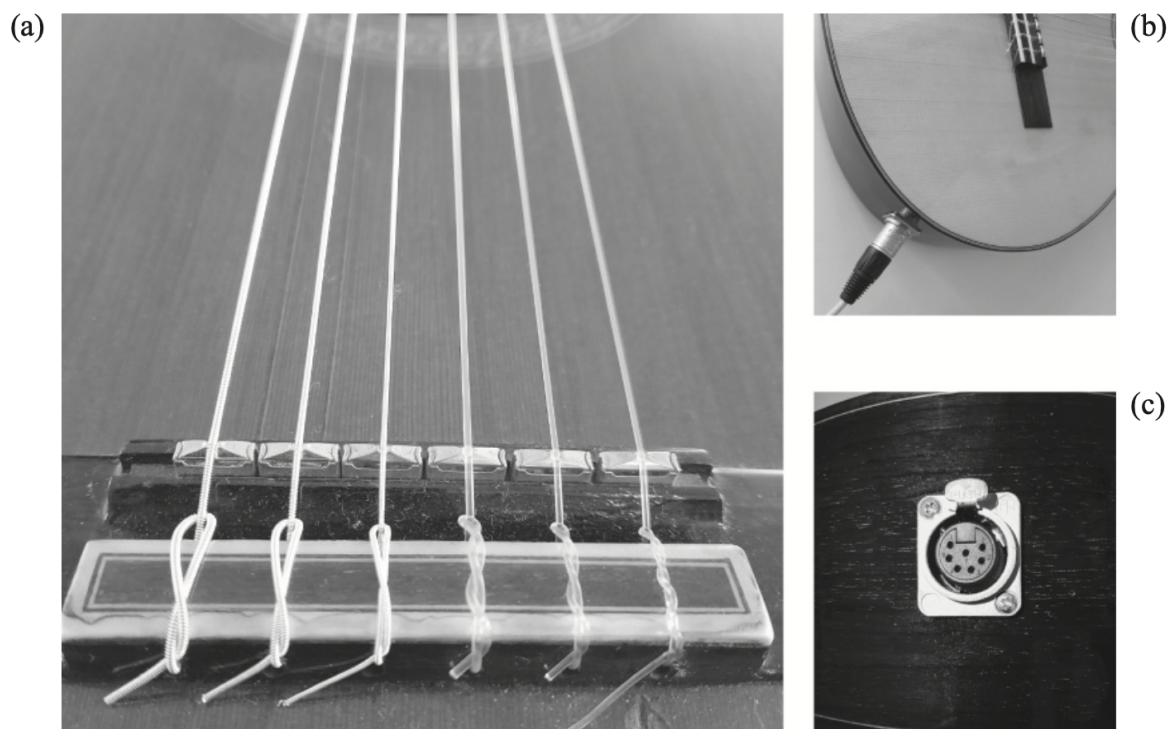


Figura 1: Captadores piezoelétricos instalados em um violão Alhambra (a); violão Yamaha com cabo conectado (b); conector de 7 pinos (c).

captado tanto pelos captadores individuais quanto por um microfone de contato AKG C-411 preso ao tampo, próximo à ponte. Nossa configuração também utiliza um instrumento virtual comercial carregado no sampler Kontakt, por razões a serem explicadas a seguir.

O processamento médio de CPU exigido para o uso completo do GuiaRT é facilmente suportado por computadores recentes, utilizando a seguinte configuração no Max: tamanho do vetor de sinal e de I/O de 64 samples, *scheduler* em modo overdrive e uso da interrupção de áudio para eventos de controle.

Durante uma performance, o violonista deve selecionar as passagens a serem transcritas pelo setup, o que normalmente é feito com o uso de um pedal de sustain. Pedais de sustain adicionais podem ser utilizados para selecionar presets e redefinir as funções dos outros pedais, conforme será discutido na seção "Expansão da Performance ao Vivo". Sensores de variação contínua, como pedais de volume e unidades de movimento inercial (sensores de movimento), podem ser facilmente adicionados ao setup.

Os dois violões que utilizamos apresentam forte acoplamento mecânico entre as cordas, e esta é uma característica importante a ser levada em conta na extração de eventos sonoros. Não apenas os sons ressonantes, mas também os transientes podem

produzir níveis de energia em uma corda em repouso (cross-talk) que são superiores aos produzidos por toques suaves na mesma corda. As medidas tomadas para minimizar essas influências serão descritas na próxima seção. Esse acoplamento também nos impediu de usar apenas o áudio captado em tempo real como saída principal de som. A reprodução de uma nota fora de seu contexto original, como na reordenação de um motivo, pode soar muito estranha quando revela as interferências causadas pelas demais cordas durante a execução; interligações individuais entre captadores e alto-falantes também causam a mesma estranheza. Ainda notamos diferenças tímbricas significativas entre os sons acústicos e captados, além de dificuldades em segmentar com precisão a maioria das notas ligadas. Por isso, optamos por utilizar uma biblioteca de áudio especializada — Nylon Guitar de Ilya Efimov — como saída de áudio principal do GuiaRT. Esta biblioteca é capaz de fornecer os diversos sons extraídos por nossos algoritmos, com uma qualidade sonora semelhante aos violões em uso.

### Níveis básicos de áudio

A maioria dos níveis de amplitude no GuiaRT é expressa em dBFS, utilizando um valor de referência de 1.0 para a estimativa de valores de pico e RMS. Em algumas operações que exigem a multiplicação de um sinal por um fator, usamos valores de amplitude fora da escala dB. O controle de ganho na interface de áudio (cujo valor máximo é 10) é ajustado para 3.5 em todas as cordas. As curvas de amplitude RMS são calculadas com diferentes tamanhos de janela e superposição, dependendo de sua função nos algoritmos. Essas curvas serão referidas como “rms(tamanho da janela):(fator de superposição)”; portanto, uma curva rms1024:4 indica uma envoltória calculada a cada 1024 pontos, com uma superposição de 256 pontos. Esta é a curva utilizada para estimar as amplitudes das notas e o ruído de fundo.

A configuração atual apresenta um ruído de fundo de aproximadamente  $-80$  dB para cada corda. Até o momento, diferentes instrumentistas têm conseguido produzir notas com ataques entre  $-40$  e  $-7$  dB. Esse intervalo dinâmico está de acordo com o descrito por Gieseler, Lombardi e Weyer (1984). Abaixo de  $-65$  dB, não há mais informações relevantes sobre os sons em decaimento. Esses níveis são importantes para definir o valor de um piso de fundo variável, discutido a seguir na seção de Detecção de Onset. A saída de frequência fundamental “bruta” do objeto fiddle~ de Puckette (PUCKETTE; APEL;

ZICARELLI, 1998) é usada para estimar as frequências fundamentais tocadas em cada corda. O limite inferior de amplitude para a saída de sinais brutos neste objeto é expresso em uma escala dB positiva, que adiciona 100 aos valores de dBFS. Portanto,  $-65$  dBFS no GuiaRT corresponde a 35 dB no fiddle~.

### Extração dos descritores de baixo nível

O elemento musical básico de baixo nível do GuiaRT é um som discreto produzido em qualquer corda, com pelo menos um tempo de início, uma duração, um valor de amplitude, uma frequência fundamental e um valor para o centroide espectral. Quando a estimativa de uma nova frequência fundamental não é possível, o evento é classificado como percussivo ou até como arranhado (*scratch*), e adota a frequência do último evento na mesma corda (na inicialização, um valor MIDI arbitrário de 100 é definido para a frequência fundamental de todas as cordas). Além disso, seu início pode ser caracterizado como um ligado ou *slide*. Para eventos típicos, cujas durações excedem o limite determinado por um limiar de reataque, mais atributos são calculados: indicadores da presença (*flags*) ou ausência de harmônicos, pizzicatos, bends e articulações de vibrato. A maioria dessas características possui limiares para sua detecção, embora algumas, como desvios microtonais, pizzicatos, arranhões, harmônicos e bends ou vibratos, oferecem a opção de poderem ser detectados ou não.

O início de qualquer evento é determinado pela ocorrência de um transiente ou por uma mudança súbita, de pelo menos um semitom, na frequência fundamental. Uma lista de todos os atributos do evento é criada no final e armazenada em um buffer específico, assim como os dados relacionados a bend e vibrato. As sonoridades resultantes de ressonâncias por simpatia não são consideradas eventos independentes, embora possam apresentar um espectro com rica evolução temporal. Optamos por lidar com essas sonoridades nas rotinas de processamento de áudio do GuiaRT.

Os sinais de áudio produzidos por cada corda individual são pré-processados antes do início dos procedimentos reais de extração de baixo nível. Esses processos preliminares podem ser divididos em três categorias principais: (1) mixagem seguida de detecção de pico, (2) cálculo de média e (3) filtragem. Para cada corda, é criada uma submixagem das demais cordas, e o pico do sinal somado é calculado a cada 10 ms, sendo expresso em dBFS. Os processos de cálculo de média são amplamente utilizados e já foram descritos

na seção de Princípios e Estrutura do GuiaRT. A filtragem é aplicada para a detecção de ataques, pizzicatos, harmônicos e slides, com configurações diferentes para cada tarefa (e, em muitos casos, para cada corda).

## Detecção de Onset

Para o processo de detecção de onset, aplicamos dois filtros passa-banda de segunda ordem ao sinal de cada corda e mixamos suas saídas. Os valores de pico são extraídos desse sinal em intervalos que variam de 3 a 1 ms (da corda mais grave para a mais aguda) e são utilizados na comparação que descreveremos a seguir. O filtro passa-banda de baixa frequência foca nas frequências fundamentais de cada corda, com uma frequência central de um trítone acima da corda solta. O filtro passa-banda de alta frequência concentra-se na energia dos transientes e possui um fator de atenuação maior para as cordas mais graves, que geralmente são encapadas com metal. Os valores padrão para esses filtros estão ilustrados na Tabela 1. Os parâmetros dos filtros para os outros processos de estimativa serão discutidos, um a um, a partir da seção de Estimativa de Amplitude e Detecção de Offset.

Tabela 1: Configurações de afinação e filtro de cada corda. Afinação padrão e frequências de corte do filtro em Hz, ganho do filtro em dB.

Corda	Afinação Padrão	Filtro Baixas Freq			Filtro Altas Freq			
		Cutoff	Gain	Fator Q	Cutoff	Gain	Fator Q	Atenuação
6	82.5	116.5	-1.7	1.5	6K	8.0	2.5	0.9
5	110	155.6	-1.7	1.5	6K	8.0	2.5	0.9
4	147	207.7	-1.7	1.5	6K	8.0	2.5	0.9
3	196	277.2	-1.7	2.5	10K	8.0	2.5	1.0
2	247	349.2	-1.7	2.5	10K	8.0	2.5	1.0
1	330	466.2	-1.7	2.5	10K	8.0	2.5	1.0

A maioria dos sons de violão é caracterizada por um ataque acentuado seguido por uma ressonância em decaimento. Para fins práticos, podemos assumir que seus inícios, ou onsets, podem ser representados pelo pico de ataque (BELLO et al., 2005). Esses onsets causam um transiente distinto e um pico explícito no sinal, o que facilita sua detecção. Por outro lado, há uma série de fatores desafiadores que devem ser levados

em consideração para uma detecção confiável de onsets: acoplamento mecânico entre as cordas, ressonâncias, diferentes tipos de toque, amplos intervalos dinâmicos e de altura, além da fácil produção de sons indesejados. Desenvolvemos um conjunto de variáveis para lidar com esses desafios.

A estratégia básica utilizada para a detecção de ataques baseia-se na comparação entre a amplitude de pico do sinal filtrado de cada corda e um limiar adaptativo, usando um Schmitt Trigger (um trigger de duplo limiar). O limiar adaptativo é o valor mais alto escolhido entre um piso de fundo variável e o valor RMS para a corda em análise. O uso desse limiar adaptativo apresenta várias vantagens: permite um amplo intervalo dinâmico, evita interferência de ruído de fundo e ajuda a evitar falsos onsets devido à atividade intensa em outras cordas. Janelas de tamanhos diferentes (512, 1024 ou 2048 pontos, com um fator de sobreposição de dois) são usadas para estimar continuamente os valores RMS da corda em foco, e normalmente os valores mais altos são utilizados para as cordas mais graves. O piso de fundo variável depende de forma não linear dos valores de pico das demais cordas e de um parâmetro que expressa a força do acoplamento, que pode ser ajustado de forma independente para cada corda.

A comparação também é afetada por outros parâmetros. O limiar de ataque é um fator multiplicador para o comparador adaptativo, ajudando a lidar com músicos que possuem diferentes estilos de execução. Esse produto define o limiar alto no Schmitt Trigger. O número de pontos de um filtro de média móvel aplicado à série de picos de amplitude pode variar de um (sem filtragem) a dez. Esse parâmetro ajuda a ignorar contatos indesejados com as cordas durante a preparação ou finalização de uma nota. A profundidade de decaimento é um fator multiplicador aplicado ao limiar alto do Schmitt Trigger para derivar o limiar baixo. Ela representa a largura entre os dois limiares (um valor de 1.0 significa que ambos os limiares são os mesmos), e pode ser ajustada para diferentes velocidades de execução.

Existem mais dois parâmetros relacionados à detecção de onset: um limiar de reataque — um intervalo de tempo mínimo permitido entre dois eventos consecutivos na mesma corda — e um valor mínimo de amplitude, usado para validar um evento em seu término. O limiar de reataque determina, por um lado, os valores rítmicos mais curtos esperados em qualquer corda; por outro lado, ele adia, por um curto período, a estimativa de valores de amplitude e de altura. Esses valores também informam análises

subsequentes. Por esses motivos, o limiar de reataque deve estar entre 45 e 80 ms.

Nomeamos o intervalo de tempo desde o início detectado até o ponto definido pelo limiar de reataque como “intervalo de ataque”, um conceito mais abstrato e inclusivo do que o termo “porção de ataque” de um som. O intervalo de ataque engloba completamente eventos muito curtos cujos finais ocorrem dentro de seus limites, assim como inícios ligados. O termo também enfatiza sua importância para a qualificação de eventos mais longos do tipo ataque-ressonância: eventos cujos finais ocorrem após o intervalo de ataque, mas cujas principais características já são expressas em sua porção inicial.

Todo o processo permite que a detecção de início ocorra, em média, com uma margem de erro de 10 ms e é esquematizado no lado esquerdo da Figura 2. Eventos cujos inícios são definidos por uma mudança súbita na frequência fundamental — notas ligadas — serão discutidos na seção de Eventos Específicos com Altura Definida.

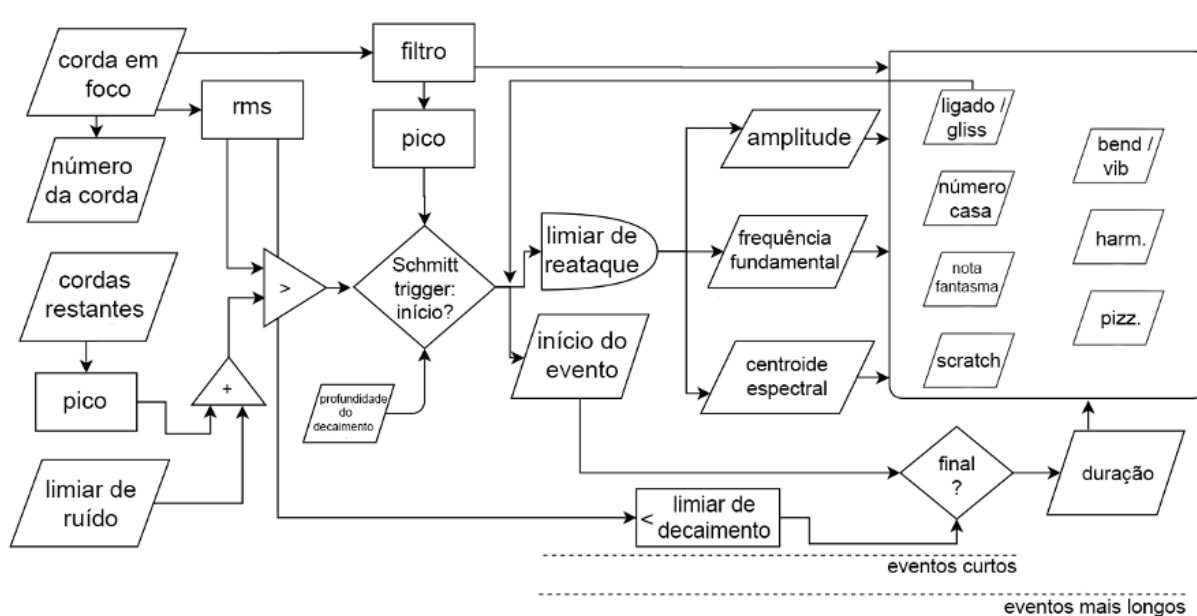


Figura 2: Fluxograma para a extração de descritores de baixo nível. Eventos curtos são qualificados por sua amplitude, frequência fundamental (ou uma flag de evento de altura não definida) e centroide espectral. A identificação de harmônicos, pizzicatos, bends e vibrato se aplica apenas a eventos com durações suficientemente longas.

## Estimativa de Amplitude e Detecção de Offset

Para cada corda, o GuiaRT calcula continuamente uma curva rms1024:4, que representa um bom equilíbrio entre o intervalo de análise e a taxa de atualização. O valor de

pico dessa curva dentro do intervalo de ataque representa a estimativa da amplitude para cada evento. Aqui, não estamos interessados em um correlato preciso para a intensidade percebida, o que exigiria correções relacionadas não apenas à seletividade de frequência do ouvido, mas também ao mascaramento (ZWICKER, 1961). Em vez disso, nosso foco é uma medida comparativa do esforço despendido pelo intérprete para aquele evento.

O offset pode ocorrer de duas maneiras: com o início de um novo evento na mesma corda ou quando o nível do sinal caiu abaixo de um limiar. Para o offset, utilizamos uma curva rms256:1, que permite a detecção de breves pausas entre eventos na mesma corda. É possível definir um limiar para a amplitude mínima durante o decaimento e, assim, restringir ou expandir o que é considerado a duração do som em decaimento. Existem situações em que um novo ataque não é precedido por uma pausa na corda, como nas técnicas de dedilhado e rasgueado; nesses casos, o offset é inteiramente determinado pelo próximo ataque. Se a amplitude de qualquer sinal de corda diminuir além desse limiar dentro do intervalo de ataque, um evento curto é criado com apenas os atributos básicos: amplitude, frequência fundamental (ou um rótulo sem altura) e centroide espectral.

### **Estimativa da frequência fundamental**

A saída bruta de uma análise FFT de 2.048 pontos realizada pelo fiddle~ fornece informações sobre a altura para diferentes processos. Após o intervalo de ataque, o GuiaRT extrai um valor para a frequência fundamental desse fluxo. Os tempos de reataque são comumente definidos entre 45 e 80 ms, o que permite uma estimativa precisa da frequência, mesmo para as cordas mais graves. A frequência fundamental — expressa em números inteiros de notas MIDI, arredondados — e o número do traste são armazenados na lista de eventos. A frequência estimada exata é enviada para a rotina de bend/vibrato para processamento adicional, enquanto sua variação em relação à escala temperada também é armazenada. A *scordatura* pode ser utilizada, e um número de traste zero é utilizado para cordas soltas. Usamos números de traste por razões práticas, que ficarão claras na discussão sobre harmônicos e na seção dedicada à análise e variação de trechos. Um parâmetro adicional é o maior traste esperado em uma performance. Valores que excedem esse limite não passarão pelo algoritmo. Nesses casos, o valor estimado para o último evento é utilizado, exceto quando se trata de harmônicos (sejam naturais ou artificiais).

O descritor centroide espectral está relacionado ao brilho de um som e pode ser

usado para uma qualificação aproximada de seu timbre. Na configuração atual, ele é utilizado para qualificar um brilho geral para cada evento e também como uma ferramenta para detectar arranhões. Qualificações tímbricas adicionais são dificultadas pelas diferenças significativas existentes entre os sons acústicos e aqueles provenientes dos captadores. Usamos a rotina de processamento de sinal de áudio nativa *gen~.centroid* fornecida pela Cycling '74 a partir do Max versão 6, com um tamanho de janela de 1.024 pontos e um fator de sobreposição de dois. A estimativa do centroide é calculada duas vezes para cada evento. Primeiro, definimos um valor absoluto do centroide espectral, que é o valor de pico que ocorre no intervalo de ataque. Se o evento durar mais de 120 ms, um novo valor é calculado e substitui o último, escolhendo desta vez o valor de pico de um filtro de média móvel de cinco pontos. Esse valor é então expresso como um centroide espectral ajustado para  $f_0$ , após sua divisão pela frequência fundamental (SCHUBERT; WOLFE, 2006).

### Eventos Específicos com Altura Definida

Se um evento continua após o intervalo de ataque, três procedimentos diferentes começam a analisar o fluxo de frequência: um é dedicado a articulações do tipo ligado, outro a curvas de bend e vibrato, e o último a harmônicos. Se uma mudança súbita de pelo menos 60 cents entre duas frequências sucessivas é detectada, um algoritmo dedicado aos sons ligados procurará mais informações antes de validar um novo evento. Existem três possibilidades de notas ligadas: de uma nota presa para outra nota presa de chegada (dentro de 4 trastes), de uma corda solta para uma nota de chegada, e de uma nota para uma corda solta. Para cada caso, é possível determinar um limiar, que é comparado à diferença entre a amplitude da primeira nota e o valor RMS do sinal da corda no momento de detecção do salto. Somente diferenças que excedem os limiares estabelecidos podem criar um novo ataque, que reinicia todo o processo de estimativa de características. Como a estimativa e a detecção de uma nova frequência fundamental ocorrem um pouco mais tarde do que a mudança real, subtraímos 32 ms (1,5 vezes a taxa de atualização do *fiddle~* para uma análise de janela de 2.048 pontos) do tempo inicial calculado para o evento ligado. Tentamos taxas de atualização mais baixas para o fluxo de frequências fundamentais, usando *sigmund~*, um objeto mais recente de Puckette para análise de alturas, mas isso não melhorou a estimativa dos ligados; pelo contrário, borrava o salto

esperado no fluxo de frequências.

Nas cordas mais graves envoltas em metal, é possível diferenciar entre articulações ligadas e deslizadas, sendo que os últimos ocorrem apenas em passos de semitom. Para essa detecção, inspecionamos a curva rms512:1 de uma nota ligada — atrasada em 100 ms e filtrada em alta frequência com uma frequência de corte de 10 kHz — para procurar picos causados pelo dedo deslizante logo antes da próxima nota. Em uma fase de pós-processamento, múltiplos passos na mesma direção podem ser agrupados sob um único e longo glissando. Os indicadores utilizados são 0 para articulações regulares, 1 para notas deslizadas e 2 para slides. Se a detecção do transiente e as condições de ligado forem igualmente atendidas para um evento, o primeiro a ser detectado é escolhido.

Bend e vibrato referem-se às modulações da frequência fundamental feitas pelos violonistas após o ataque, sendo o primeiro caracterizado por uma trajetória e o último por uma oscilação. Ambas as técnicas são amplamente exploradas em diferentes ramos da música popular, principalmente com violão e guitarra, enquanto na tradição clássica o vibrato é uma técnica padrão em alguns estilos, mas os bends aparecem apenas como uma “técnica estendida”. O método para violão moderno de cordas de nylon escrito por Carlevaro (1979) é um dos poucos que cobrem as técnicas de vibrato com algum detalhe, dividindo-as em dois tipos: transversal e longitudinal, cada uma mais propensa a ser usada em diferentes partes do braço do violão. Seus resultados sonoros não são muito diferentes. Na nossa configuração baseada em nylon, usamos uma abordagem que pode parecer muito simples para violonistas que exploram bends, mas que pode ser substituída por dados mais precisos quando necessário. Construimos uma função de ponto de quebra com os valores mínimo e máximo para cada inflexão detectada do fluxo contínuo de frequências. No offset do evento, todos os valores de tempo são normalizados para a duração total, e toda a lista é indexada em um buffer específico. Esse índice é então anexado à lista que contém os outros descritores do evento atual.

Os sons de pizzicato têm uma frequência fundamental, e assumimos que eles são filtrados em baixa frequência pela ação da palma da mão direita (uma ideia adaptada de Reboursière et al. (2012)) e que esse filtro é menos eficaz no ataque do que na fase de ressonância. Portanto, nosso algoritmo compara os níveis de um sinal filtrado em dois momentos diferentes e verifica se sua diferença excede um certo limiar. Para essa tarefa, usamos filtros passa-alta de segunda ordem com configurações diferentes para cada corda

e um intervalo de comparação de 80 ms.

Os sons harmônicos são preparados pela leve pressão dos dedos da mão esquerda em pontos específicos de uma corda. Esses pontos estão localizados em nós vibracionais, que ocorrem em divisões inteiras do comprimento efetivo da corda (sua porção vibrante). Na literatura sobre instrumentos de cordas arqueadas, existe uma clara divisão entre harmônicos naturais e artificiais, sendo que os primeiros são produzidos em cordas soltas, enquanto os últimos são produzidos em cordas pressionadas. No violão, a técnica de harmônico pinçado confunde um pouco essa divisão; embora seja principalmente destinada à produção de harmônicos artificiais, ela também pode ser aplicada a cordas soltas. Nessa técnica, os dedos da mão direita são responsáveis pela leve pressão na corda — que pode ser solta ou pressionada — e também pelo ataque. Mesmo em cordas soltas, o som resultante da técnica pinçada pode estar mais relacionado a harmônicos artificiais do que a harmônicos naturais.

No GuiaRT, procuramos harmônicos naturais até o sexto parcial, que gera uma frequência duas oitavas e uma quinta perfeita acima da corda solta. Esses harmônicos correspondem aos trastes reais ou virtuais 12, 19, 24, 28 e 31. (Um “traste virtual” indica uma nota que tem a mesma altura como se fosse tocada ao pressionar a corda no “traste real”, mas que na verdade é um harmônico tocado em outra posição da corda.) Não há um limite superior fixo para as frequências fundamentais produzidas por harmônicos artificiais no violão de nylon, mas a biblioteca de áudio que usamos oferece esse tipo de som entre os trastes virtuais 12 e 27. Para qualquer corda, isso varia de uma oitava a duas oitavas e uma terça menor acima da corda solta. Além das informações fornecidas pelo parâmetro de maior traste, temos estratégias para lidar com a diferenciação entre sons regulares (flag 0) e harmônicos, e entre harmônicos naturais (flag 1) e artificiais (flag 2).

Notas entre os trastes 12 e 19 (o último traste em nossos violões) podem ocorrer tanto de forma regular quanto como harmônicos. Assim como nos pizzicatos, os harmônicos perdem grande parte de seu brilho após um ataque claro. Portanto, implementamos um algoritmo análogo, com diferentes frequências de corte e tempos de comparação. Para os números de traste 12 ou 19, ocorre uma comparação adicional. Esta é uma comparação mais delicada, pois nesses trastes os músicos conseguem confundir as diferenças tímbricas entre harmônicos naturais e artificiais. Para essa tarefa, aplicamos

duas abordagens diferentes. Normalmente, podemos observar nas cordas mais graves um som mais áspero durante o ataque dos harmônicos artificiais, o que pode ser refletido no aumento da diferença entre os valores máximo e mínimo do sinal filtrado passa-alta. Outra característica comum é que o nível do segundo parcial (do som harmônico) é mais alto na articulação pinçada do que no caso natural, devido ao ponto de contato usado no ataque. Esse princípio é utilizado para as cordas mais agudas.

Embora os sons harmônicos e pizzicatos sejam muito diferentes em registro e na forma como soam, elas compartilham uma decaída espectral semelhante. O uso de sua combinação não é raro nas cordas mais graves, principalmente no 12<sup>o</sup> traste, e as características de pizzicato prevalecem na cor tonal final. Por causa desse fato, em cada offset de nota dentro do alcance dos sons harmônicos, tomamos uma decisão adicional sobre os sons pizzicato e harmônicos, dependendo de sua duração e da corda em que são tocados. A duração máxima para pizzicato é definida entre 120 e 300 ms (com os valores mais altos para as cordas mais graves), e a duração mínima para harmônicos é entre 100 e 250 ms. Os casos híbridos mantêm as flags de ambas as articulações.

### **Sons Sem Altura Definida**

Como os sons de pizzicato (ou abafados), os sons percussivos (também chamados de ghost notes ou x-notes) e os sons de arranhado são mutuamente exclusivos, usamos uma única flag para indicar sua presença, atribuindo o valor 0 para notas regulares, 1 para tons abafados, 2 para x-notes e 3 para arranhados. Se a configuração não conseguir detectar uma nova frequência fundamental durante o intervalo do ataque, o evento é inicialmente classificado como uma x-note, embora possa ser testada posteriormente para um status de arranhado. Espera-se que os arranhados ocorram em violões de nylon apenas nas cordas 4, 5 e 6, que normalmente são envolvidas com metal. Se uma x-note for detectada nessas cordas e seu centroide espectral absoluto exceder um limiar de arranhado (cerca de 400 Hz), sua flag é alterada de 2 para 3. Alternativamente, eventos muito curtos, que possuem uma frequência fundamental, mas duram no máximo 80 ms, também podem ser caracterizados como arranhados se seu valor absoluto do centroide espectral exceder o mesmo limiar.

## Latência

A partir do que foi exposto, é fácil observar que as diferentes características de um evento sonoro no GuiaRT são extraídas em momentos distintos. A descrição completa só é finalizada no momento do offset. A Figura 3 ilustra as latências usadas para a estimativa de cada descritor. Também é possível utilizar um subconjunto deles para finalidades específicas. Por exemplo, desenvolvemos uma exibição semelhante a um piano roll que usa as informações geradas no final do intervalo de ataque para marcar o início de uma nota (frequência e amplitude), assim como a curva de amplitude contínua durante sua duração, plotada em tempo real. Com essa exibição, é fácil visualizar as durações efetivas das notas tocadas, uma ferramenta útil na construção de uma performance. (Isso, e outros exemplos das funcionalidades do GuiaRT, podem ser vistos e ouvidos em <https://musica.ufmg.br/lapis/projects/guiart>.)

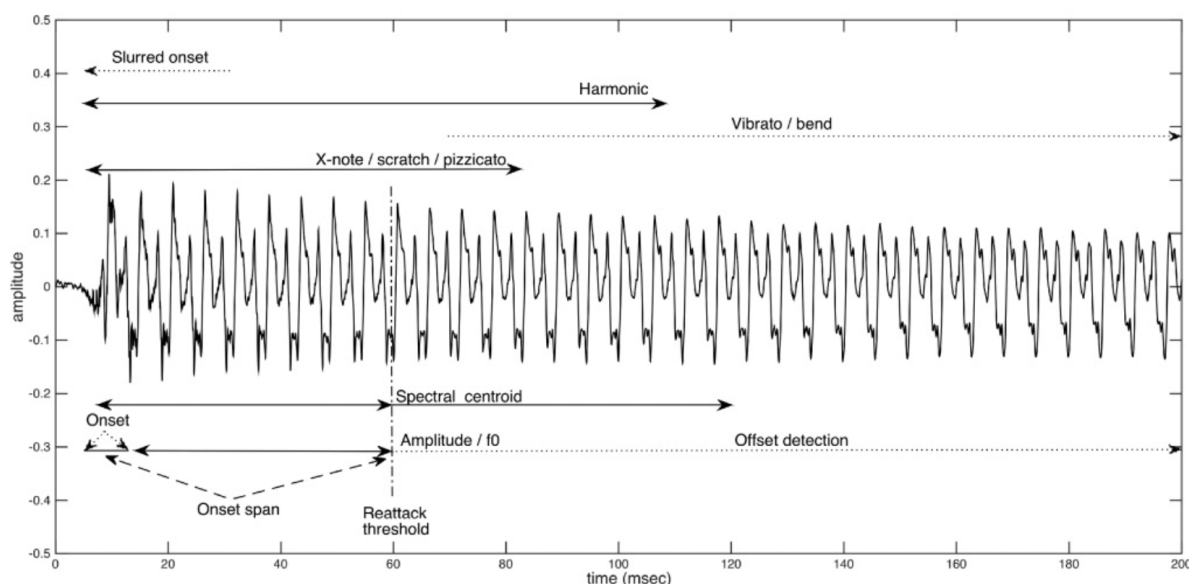


Figura 3: Latências na estimativa de descritores de baixo nível. O limiar de reataque pode variar em torno de 60 ms. A detecção de offset pode ocorrer dentro do intervalo de ataque para sons muito curtos. Para sons mais longos, o centroide espectral é reestimado após 120 ms.

Outras possibilidades incluem o envio de dados discretos e contínuos selecionados para outros programas e dispositivos através de MIDI, Open Sound Control (OSC), etc. A maioria dos parâmetros é estimada durante ou logo após o intervalo de ataque, o que não deve ser uma surpresa, considerando a tipologia dos sons do violão. Em palavras

de Pierre Schaeffer, podemos afirmar que “todo tipo de som de percussão-ressonância tem seu timbre característico imediatamente a partir do momento do ataque” e que “o ouvido percebe, ou presume, que todas as características que se desenvolvem através da ressonância já estavam presentes na fase de [ataque] sustentação” (SCHAEFFER, 2017, p.134).

Somos capazes de analisar e extrair as características mais importantes dos sons do violão nos primeiros 100 a 150 ms. Para alguns descritores, como slides, pizzicato e harmônicos, também utilizamos um sinal filtrado em alta frequência e com atraso para incluir a evolução espectral imediatamente anterior ao pico detectado na estimativa do descritor. Após detectar um transiente de ataque, é necessário aguardar um pouco — ou seja, a duração do intervalo de ataque — para que haja um acúmulo de energia e estabilização da afinação, antes de estimar a amplitude e a frequência fundamental. Com um pouco mais de tempo, podemos diferenciar entre sons normais, pizzicato e harmônicos. Por outro lado, características intencionais que variam ao longo do tempo, como bends e vibratos, necessitam de uma duração adequada para se desenvolverem.

### **Formato Dos Dados Extraídos**

Os trechos a serem transcritos são escolhidos através de um pedal. A pressão do pedal indica o tempo zero da seção, enquanto a liberação marca o final. O fluxo completo do processo de estimativa está ilustrado na Figura 2. Para cada evento no trecho, é gerada uma lista completa de descritores em seu offset. A lista inclui:

- Tempo inicial (em ms); o momento em que o evento começa.
- Corda utilizada: A corda do violão que foi tocada.
- Número da nota MIDI arredondado: A representação MIDI da nota.
- Número da casa: O número da casa onde a nota foi tocada.
- Duração (em ms): O tempo que o evento dura.
- Amplitude (em dBFS): O nível de amplitude do evento.
- Flag de deslize: Indica se houve um deslize na articulação.

- Centroide espectral ajustado por  $f_0$ : O valor do centroide espectral ajustado pela frequência fundamental.
- Flag para pizzicato, x-note ou arranhado: Classifica o tipo de som.
- Flag harmônico: Indica se o evento é um harmônico.
- Índice para bend ou vibrato: Informação sobre modulações de afinação.
- Desvio de  $f_0$  da escala temperada: A diferença da afinação em relação à escala temperada.

A Figura 4 ilustra os dois primeiros compassos do primeiro movimento da *Sonata* de Leo Brouwer (1990). Os dados extraídos podem ser vistos na Tabela 2. A partir desses dados, é possível analisar diferentes aspectos da performance, como expressão rítmica, duração real de cada evento, dinâmicas e articulações. A lista completa pode ser enviada como mensagens MIDI para a biblioteca de áudio carregada como um instrumento VSTi dentro do Max, com as respectivas chaves para as diferentes articulações, proporcionando um feedback rápido e confiável ao processo de transcrição. Alterações de microafinação são enviadas como mensagens de pitch-bend.

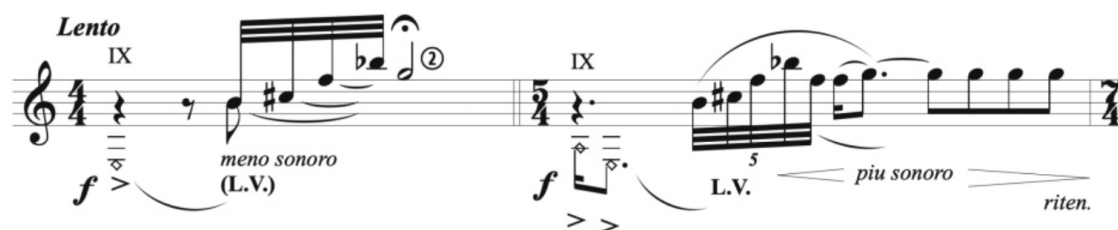


Figura 4: Dois primeiros compassos da Sonata de Leo Brouwer (1990)

### Configuração de Parâmetros

É sempre um desafio chegar a conclusões sólidas quando se trabalha com um setup destinado a operar em tempo real e com músicos que têm diferentes origens e níveis de experiência. Novos músicos trazem seu toque e expectativas pessoais, o que pode abrir uma nova série de problemas de programação. A maioria dos violonistas que contribuiu

Tabela 2: Dados extraídos do início de uma gravação hexafônica da Sonata de Brouwer (1990)

Evento	Início (ms)	Corda	Nota MIDI	Casa	Dur. (ms)	Amp. dBFS	Slur flag	Centro. Espec.	Pizz. flag	Harm. flag	Curva Bend	Desvio f0
1	359	6	68	28	3533	-20	0	1.40	0	1	0	-0.01
2	2331	4	59	9	2605	-20	0	2.07	0	0	0	0.08
3	2477	3	61	6	1723	-19	0	1.61	0	0	0	-0.13
4	2527	2	65	6	274	-20	0	1.42	0	0	0	-0.07
5	2649	1	70	6	1682	-20	0	1.52	0	0	0	-0.05
6	2824	2	67	8	1657	-19	0	1.52	0	0	0	-0.09
7	6509	5	73	28	1682	-15	0	1.11	0	1	0	-0.01
8	7036	6	68	28	2830	-20	0	1.35	0	1	0	-0.01
9	10051	4	59	9	2821	-18	0	2.08	0	0	0	0.03
10	10165	3	61	6	1550	-18	0	1.57	0	0	0	-0.08
11	10249	2	65	6	230	-19	0	1.57	0	0	0	-0.02
12	10356	1	70	6	1425	-20	0	1.62	0	0	0	-0.06
13	10480	2	65	6	134	-20	0	1.89	0	0	0	-0.03
14	10615	2	65	6	297	-17	0	1.96	0	0	0	-0.03
15	10882	2	67	8	1033	-23	1	1.17	0	0	0	-0.09
16	11993	2	67	8	722	-19	0	1.37	0	0	0	-0.01
17	12783	2	67	8	983	-21	0	1.30	0	0	0	-0.02
18	13852	2	67	8	1314	-24	0	1.20	0	0	0	-0.04

para o desenvolvimento de nosso sistema são estudantes de graduação ou pós-graduação da nossa Escola de Música, e não é fácil alcançar um compromisso entre o que deve ser uma performance justa e uma transcrição justa. Os músicos gostam de testar os limites dos procedimentos em tempo real, tanto em situações empíricas quanto criativas, e essa prática acaba ajudando a refinar os algoritmos em desenvolvimento. Durante um período considerável, gravamos diferentes trechos, considerados pelos violonistas como exemplos de suas habilidades mais idiossincráticas, para avaliar e melhorar a eficiência de nossas ferramentas e testar os limites de uma parametrização padrão.

As gravações selecionadas abrangem um repertório amplo de técnicas e estilos, incluindo obras de Alonso Mudarra, J. S. Bach, Joaquín Turina, Villa-Lobos, Alexandre Tansman, Brouwer, Garoto, Pink Floyd e Oasis, bem como padrões de acompanhamento da música popular latino-americana. Elas foram gravadas, na maioria, com o violão Yamaha, utilizando cordas novas de alta tensão da marca Hannabach. Além disso, também usamos alguns trechos antigos gravados em ambos os violões (com captadores LRBaggs e RMC), sem casamento de impedância. A fidelidade das transcrições foi avaliada conjuntamente pelos pesquisadores e músicos, todos considerando que foi alcançada uma extração justa de ataques, dinâmicas, notas e articulações para cada trecho selecionado, sem prejuízo do conteúdo musical. As versões originais dos trechos e os resultados das transcrições estão disponíveis em nosso site.

Embora cada parâmetro usado nos processos de estimativa possa ser ajustado individualmente para cada corda, preferimos, por razões práticas, dividir sua coleção em três categorias principais: “fundamentais”, “gerais” e “específicos ao contexto”. Os parâmetros fundamentais são aqueles cujos valores permanecem fixos para todos os músicos após o processo de refinamento e estão principalmente relacionados às rotinas de pré-processamento de média e filtragem do sinal. Os parâmetros gerais são mantidos os mais estáveis possíveis para diferentes violonistas e estão relacionados à detecção de inícios e terminos de notas. Após testes intensivos, chegamos a uma configuração que funciona bem para a detecção de inícios e terminos na maioria de nossas gravações e apresentações ao vivo. Eles são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros Gerais do GuiaRT

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tamanho RMS	2048, 1024, or 512
Limiar de ataque	1.6
Média dos picos	3
Profundidade do decaimento	1.2
Limiar de reataque	60 ms
Amplitude mínima	-30 dB
Limiar do decaimento	-45 dB
Força de acoplamento	4
Micro-afinação	on

Os parâmetros específicos ao contexto estão relacionados à estimativa de diferentes articulações e utilizam portas (*gates*) e limiares. Os diferentes tipos de ligadura não possuem uma porta dedicada, pois também contribuem para a detecção de inícios, e seus limiares devem ser reajustados para diferentes estilos e texturas. Configurações e refinamentos adicionais dependem das técnicas e articulações em uso. Deve-se ter cuidado com puxadas (*pull-offs*) falsas e possível assincronia entre os dedos de ambas as mãos ao atacar uma nota, bem como com transientes de término em mudanças de acordes frequentes ou difíceis. Além disso, amplitudes contrastantes devem ser compensadas em acordes bloqueados. Algumas técnicas especiais, como o movimento rápido do polegar para baixo e para cima na mesma corda e acordes rápidos dedilhados, podem exigir uma configuração especial de filtro para os inícios. Há um menu dedicado à configuração de parâmetros, e cada configuração pode ser armazenada como um preset. Por fim, é essencial lembrar que os parâmetros de alguns filtros e para a detecção de slides e

arranhões dependem de fatores diversos, como a marca das cordas, a idade e o desgaste das cordas, o uso das unhas para ataques e os estilos de execução.

Diante de todos esses fatores, é claro que nosso processo de avaliação é qualitativo, realizado em situações musicais específicas com parametrização dedicada. Apesar disso, o GuiaRT pode representar uma ferramenta de anotação eficaz para estudos quantitativos que dependem de bancos de dados fixos.

### **Expandindo a Performance ao Vivo**

Nossas transcrições fornecem dados musicais simbólicos, permitindo diferentes abordagens interativas. Decidimos desenvolver uma abordagem baseada em características específicas da técnica de violão — principalmente a escolha de cordas e trastes — que podem ser caracterizadas como topológicas. Embora os valores rítmicos e espectrais não sejam quantizados ou categorizados, ainda consideramos que a tarefa lida com dados simbólicos. Inicialmente, planejamos gerar novos trechos musicais a partir de descritores de nível médio, mas posteriormente adotamos estratégias transformativas (ROWE, 1993). Esta abordagem está ligada ao paradigma do “player” de Rowe — a criação de músicos virtuais adicionais — mas a adição de processamento de sinal também traz o paradigma do “instrumento” — a extensão do instrumento — para o jogo. A ideia básica é oferecer ao violonista a possibilidade de tocar com instrumentos virtuais, cujos materiais musicais são variações de trechos selecionados por um pedal durante a performance ao vivo. Como a maioria dos sistemas interativos, este trabalho está em constante transformação; ainda assim, em seu estado atual, o GuiaRT pode fornecer a diferentes usuários um ponto de partida sólido para sua exploração criativa.

### **Descritores de Nível Médio e Texturas Básicas**

Em 2015, desenvolvemos uma série de descritores de nível médio para análise em tempo real de texturas musicais tocadas no violão, divididos em várias categorias: global, específico de violão, rítmico e outros relacionados ao conteúdo de altura e espectro, amplitudes e articulações (FREIRE; CAMBRAIA, 2015). Embora a ideia original fosse usar esses descritores para sintetizar novas texturas, acabamos usando alguns deles para definir de maneira simples algumas texturas elementares, caracterizadas pela técnica mais evidente no trecho analisado. Os descritores incluem a proporção de acordes em relação

a todos os eventos, o tamanho mais proeminente do acorde (número de notas) e o índice de sobreposição. Um acorde é definido como um conjunto de eventos com uma diferença máxima de 50 ms entre si. O índice de sobreposição refere-se a uma característica típica da música de violão, que é a sonoridade simultânea de diferentes cordas, mesmo em uma melodia única. Ele é calculado pela razão entre a soma das durações de todos os eventos e a duração total do trecho. A Tabela 4 apresenta as texturas básicas e as condições para cada uma ocorrer. Outros descritores de nível médio, como as classes de alturas mais frequentemente tocadas e os intervalos entre inícios de notas (IOIs) ou a média do centroide espectral, também são usados para diferentes propósitos, principalmente em estratégias de acionamento.

Tabela 4: Estimativa das texturas básicas do GuiaRT

<b>Texturas</b>	<b>Acordes (%)</b>	<b>Índice de Sobreposição</b>	<b>Tamanho do Acorde Mais Presente</b>
Melodia	$\leq 10$	$\leq 2.1$	–
Arpeggio	$\leq 10$	$> 2.1$	–
Melodia ressonante	$10 < x \leq 70$	$> 2.5$	$\leq 3$
Contra-ponto	$10 < x \leq 70$	$\leq 2.5$	$\leq 3$
Melodia com acordes	$10 < x \leq 70$	–	$> 3$
Acordes percussivos	$> 70$	$\leq 3.5$	–
Acordes abafados/strummed	$> 70$	$> 3.5$	–

## Conjunto de Variações

Desenvolvemos oito procedimentos de variação, que podem ser agrupados em duas categorias principais: uma que preserva o ritmo e outra que preserva o conteúdo de altura nos trechos. Entre as variações que preservam o conteúdo rítmico, duas operam diretamente nos números das cordas, que podem ser invertidos (da grave para a aguda e vice-versa) ou embaralhados. Também é possível espelhar os números dos trastes em torno de um valor escolhido; nesse caso, cordas soltas e sons harmônicos permanecem inalterados. Outra variação impõe um conjunto de classes de alturas de quatro elementos em todas as notas; o conjunto pode ser extraído do próprio trecho ou inserido de uma fonte externa. Para transformações rítmicas, usamos dois tipos de retrogradação: em

um, invertemos a estrutura temporal com base nos ataques; no outro, a estrutura temporal é invertida ao transformar os términos em inícios. Como os dois procedimentos de retrogradação são aplicados a estruturas potencialmente polifônicas, geralmente é difícil prever o resultado geral. Outra variação rítmica deriva do embaralhamento dos IOIs e das durações realizadas em cada corda. Finalmente, há uma variação que não altera o conteúdo geral de alturas ou o ritmo do trecho, mas embaralha os números dos trastes em cada corda, reordenando as notas enquanto o ritmo é mantido.

Essas variações podem ser encadeadas à escolha do performer. Para tornar isso possível, cada buffer que contém uma transcrição usa dois buffers adicionais para as variações. Essa funcionalidade também permite que o músico faça uma nova gravação no buffer principal enquanto ainda toca uma variação do trecho mais recentemente transcrito.

A escolha das variações merece atenção especial. Após a caracterização da textura do trecho recém-transcrito, realiza-se um sorteio ponderado para selecionar o tipo de variação que será aplicado. Durante essa seleção, um conjunto de restrições pode limitar as escolhas de variações, e um fator de probabilidade para a ocorrência dos dados originais — em vez de uma variação — também pode influenciar o processo. Quando a produção de uma variação é concluída, um novo sorteio é realizado.

Também é possível alterar o nível dinâmico geral dos instrumentos virtuais durante a performance ao vivo de diferentes formas: definindo um novo intervalo de amplitude ou mapeando — de forma direta ou inversa — o valor médio das amplitudes da performance ao vivo para as variações. Alterações de andamento também podem ser definidas dentro de um intervalo pré-determinado ou controladas por dados de sensores.

## **Instrumentos Virtuais e Acionamento**

Os instrumentos virtuais realizam as variações por meio de diferentes gatilhos. Cada instância de um instrumento virtual se vincula a um trecho específico (e às variações correspondentes), acessível também a outros players virtuais. Em uma nova gravação, é possível optar por silenciar a variação atual. Dados já armazenados em cada buffer podem ser excluídos ou misturados com os novos dados recebidos. Até agora, usamos no máximo três instrumentos virtuais em composições e improvisações, um número que permite uma modificação considerável da densidade musical, mas com controle razoável sobre toda a performance.

O violonista pode usar gatilhos diretos e indiretos, sendo os diretos ataques em cordas específicas, que fornecem controle preciso sobre as camadas e seus tempos. Esse controle pode incluir paradas rápidas e reinícios feitos de maneira semelhante. Gatilhos indiretos ajudam a oferecer situações musicais com uma estrutura rítmica mais flexível, pois apresentam alguma latência ou imprevisibilidade. Um exemplo desse tipo de gatilho é a execução de uma sequência de notas (ou um acorde) em três cordas diferentes. Outras possibilidades derivam da análise dos trechos mais recentemente transcritos, como tocar uma das classes de altura mais proeminentes ou executar valores rítmicos na faixa dos IOIs mais frequentemente tocados.

### **Processamento Adicional de Áudio**

Apesar do grande número de plug-ins disponíveis para processamento de áudio, desenvolvemos alguns algoritmos que aproveitam características específicas de nosso setup e contribuem para a identidade sonora do GuiaRT. O primeiro é um prolongamento artificial dos sons, que ajuda a superar uma queixa comum dos violonistas, a falta de sustentação. O processo começa com a gravação de um buffer de áudio acionado por um pedal. Para sons prolongados de violão, essa ativação deve ocorrer logo após o ataque; optamos por gravar 650 ms do som subsequente, para evitar uma diferença perceptível na amplitude no início e no final do buffer. Em seguida, aplica-se um procedimento de sobreposição e adição com janelas, em um processo semelhante a uma síntese granular quase síncrona em câmera lenta. Escolhemos um fator de sobreposição de três com uma janela triangular de 550 ms, que cria um trêmulo suave e natural. O ponto inicial de cada segmento de janela varia entre 40 e 70 ms a partir do início do buffer em cada iteração, o que contribui para um leve efeito de *chorus*, evitando repetições estritas. A mudança de afinação é obtida alterando-se a velocidade de leitura. O intervalo apreciável de tempo entre as iterações ajuda a evitar a percepção de uma coloração tímbrica provocada pelo filtro de pente. Como é realizado inteiramente no domínio do tempo, esse procedimento não garante a continuidade de fase. Ainda assim, ele produz um prolongamento convincente na maioria das situações: com cordas dedilhadas, instrumentos de sopro e vibrafones, entre outros (consulte nosso site). Este instrumento foi programado há cerca de 20 anos, e acreditamos que oferecia resultados melhores do que os recursos contemporâneos baseados no domínio de frequência. Consideramos essa ferramenta como

uma versão simplificada de abordagens atuais do domínio do tempo, como aquelas que utilizam ruído “velvet” (D’ANGELO; GABRIELLI et al., 2018; VÄLIMÄKI; RÄMÖ; FLORES, 2018; LÁZARO, 2020). Utilizamos até três vozes diferentes, que podem ser selecionadas atacando cordas específicas. A quantidade e a direção do desvio de afinação podem ser modificadas por notas tocadas em cordas específicas, por um pedal de volume ou por outro sensor. Esses tons prolongados podem ser ainda processados por modulação de amplitude, cujas frequências de modulação são controladas pelas notas tocadas durante a performance.

Outro tipo de processamento envolve a exploração de ressonâncias nas cordas graves, obtido de duas maneiras: amplificação extra do sinal dessas cordas enquanto se toca apenas as cordas agudas, ou por meio de síntese. Um algoritmo simples e eficiente para sintetizar sons de cordas dedilhadas passou por uma série de modificações e melhorias desde sua primeira descrição por Karplus e Strong (1983), modelando aspectos como o ponto de excitação, o papel da ponte na reflexão e difusão, rigidez da corda, modos de dedilhado e interação com o corpo (KARJALAINEN; VÄLIMÄKI; TOLONEN, 1998; LAURSON et al., 2001). Aqui, utilizamos o algoritmo de Karplus-Strong para simular ressonâncias por simpatia nas cordas graves, conforme proposto por Jaffe e Smith (1983). Essas cordas graves podem ser as mesmas do instrumento/interace (da quarta à sexta corda) ou cordas virtuais adicionais afinadas em frequências pré-definidas. Usamos um filtro para simular o acoplamento na ponte, dois filtros para controlar de forma independente os conteúdos altos e baixos e um coeficiente para influenciar a taxa de decaimento total. Uma mixagem das cordas agudas (da primeira à terceira) dos performers ao vivo ou virtuais serve como entrada para o modelo. A equalização de um performer virtual pode ser afetada pela média do centroide espectral do trecho executado. Não há um preset para espacialização, que é feita separadamente para cada apresentação, dependendo dos recursos utilizados pelo GuiaRT e das condições de cada local.

## Considerações

O GuiaRT se baseia em quase uma década de experiência com dois violões de nylon, dois modelos de captadores piezoelétricos e sinais de áudio com diferentes níveis e impedâncias. Vários músicos, com formações e níveis de habilidade diversificados, utilizaram o sistema e expressaram entusiasmo quanto às suas possibilidades e aos avanços nas

áreas de composição, improvisação e pedagogia. Estudos dedicados lançaram novas luzes sobre técnicas específicas de violão, especialmente em seus aspectos rítmicos. Além de seu uso em diferentes situações de improvisação, foram compostas obras especialmente para o sistema (disponíveis em nosso site) e com instrumentos ampliados similares (MENESES; FREIRE; WANDERLEY, 2018). Os instrumentos ampliados continuam sendo utilizados em nosso laboratório e em diversos espaços de performance. Cada um dos três principais eixos do sistema — ampliação de um instrumento acústico, estimativa em tempo real de descritores de áudio de baixo nível e composição interativa — oferece possibilidades de desenvolvimento e aperfeiçoamento.

Como a funcionalidade do instrumento acústico permanece inalterada, a única exigência técnica adicional para violonistas é a integração de pedais em uma prática musical expressiva. Músicos do repertório clássico também precisam se familiarizar com a amplificação. A principal desvantagem do nosso sistema é a necessidade de uma modificação invasiva no violão; até agora, esse é o preço a se pagar por um procedimento confiável de transcrição em tempo real e a possibilidade de utilizar dados simbólicos.

A ampliação de um instrumento musical por meio do processamento interativo de seu áudio apresenta desafios específicos, devido não apenas às sutilezas da produção mecânica do som, mas também à sua integração em um quadro sonoro expandido. Nosso sistema demonstra que uma implementação iterativa, fundamentada em esforços na prática musical, no processamento de áudio e na programação criativa, pode gerar resultados satisfatórios em todas essas áreas; neste caso, com o estabelecimento de uma interface musical acústico-digital a partir de um violão de nylon.

## REFERÊNCIAS

- ANGULO, I.; GIRALDO, S.; RAMIREZ, R. Hexaphonic Guitar Transcription and Visualisation. In: *Proceedings of the 2nd International TENOR Conference*. United Kingdom: [s.n.], 2016.
- BARBANCHO, A. M. et al. Automatic transcription of guitar chords and fingering from audio. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, IEEE, v. 20, n. 3, p. 915–921, 2011a.
- BARBANCHO, I. et al. Inharmonicity-based method for the automatic generation of guitar tablature. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, IEEE, v. 20, n. 6, p. 1857–1868, 2012b.
- BASTAS, G. et al. A few-sample strategy for guitar tablature transcription based on inharmonicity analysis and playability constraints. In: IEEE. *ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. [S.l.], 2022. p. 771–775.
- BELLO, J. P. et al. A tutorial on onset detection in music signals. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, v. 13, n. 5, p. 1035–1047, set. 2005. Number: 5 Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- CARLEVARO, A. *Escuela de la Guitarra*. Buenos Aires: Barry Editorial, 1979.
- D'ANGELO, S.; GABRIELLI, L. et al. Efficient signal extrapolation by granulation and convolution with velvet noise. In: *Proc. 21st Int. Conf. Digital Audio Effects (DAFx-18), Aveiro, Portugal*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 107–112.
- ESSL, K. Lexicon-Sonate: an Interactive Realtime Composition for Computer-Controlled Piano. *Array (Communications of the ICMA)*, v. 16:1, p. 19–27, 1996.
- FALLMAN, D. Design-oriented human-computer interaction. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 225–232.
- FOULON, R.; ROY, P.; PACHET, F. Automatic classification of guitar playing modes. In: SPRINGER. *Sound, Music, and Motion: 10th International Symposium, CMMR 2013, Marseille, France, October 15-18, 2013. Revised Selected Papers 10*. [S.l.], 2014. p. 58–71.
- FREIRE, S. *Composition through computer programming: a sonological experience*. Dissertação (Mestrado) — Royal Conservatory, Holland, Institute of Sonology, 1993.
- FREIRE, S. et al. Strumming on an Acoustic Nylon Guitar: Microtiming, Beat Control and Rhythmic Expression in Three Different Accompaniment Patterns. In: *Proceedings of the 15th Sound and Music Computing Conference*. Limassol: SMC, 2018. p. 575–580. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1422685>.
- FREIRE, S.; CAMBRAIA, P. Analysis of Musical Textures Played on the Guitar by Means of Real-time Extraction of Mid-level Descriptors. In: *Proceedings of the 12th Sound and Computing Conference*. Zenodo, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.851077>.

FREIRE, S.; NÉZIO, L. Study of the Tremolo Technique on the Acoustic Guitar: Experimental Setup and Preliminary Results on Regularity. In: *Proceedings of the 10th Sound and Music Computing Conference*. Estocolmo: SMC, 2013. p. 329–334. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.850407>.

FREIRE, S.; NÉZIO, L.; REIS, A. Analysis of the Simultaneity, Voice/layer Balance and Rhythmic Phrasing in Works for Guitar by Rodrigo, Brouwer and Villa-Lobos. In: *Proceedings of the 11th SMC and 40th ICMC*. Atenas: SMC/ICMC, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.850753>.

FRISSON, C. et al. *Multimodal Guitar: Performance Toolbox and Study Workbench*. [S.l.], 2009. Issue: 2:3.

GIESELER, W.; LOMBARDI, L.; WEYER, R.-D. *Instrumentation in der Musik des 20. Jahrhunderts*. [S.l.]: Moeck, 1984.

GRAHAM, R.; HARDING, J. Septar: Audio breakout circuit for multichannel guitar. In: NEW INTERFACES FOR MUSICAL EXPRESSION: NIME. *Proc: NIME Conference Proceedings*. Louisiana, USA. June 2015. [S.l.], 2015. v. 2015, p. 581–584.

GUREVICH, M. Diversity in nime research practices. *Leonardo*, MIT Press The MIT Press, 1 Rogers Street, Cambridge MA 02142-1209, USA . . . , v. 49, n. 1, p. 80–81, 2016.

HJERRILD, J. M.; CHRISTENSEN, M. G. Estimation of guitar string, fret and plucking position using parametric pitch estimation. In: IEEE. *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. [S.l.], 2019. p. 151–155.

HJERRILD, J. M.; WILLEMSSEN, S.; CHRISTENSEN, M. G. Physical models for fast estimation of guitar string, fret and plucking position. In: IEEE. *2019 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)*. [S.l.], 2019. p. 155–159.

HOLLAND, S. et al. *New Directions in Music and Human-Computer Interaction*. [S.l.]: Springer, 2019.

JAFFE, D. A.; SMITH, J. O. Extensions of the karplus-strong plucked-string algorithm. *Computer Music Journal*, JSTOR, v. 7, n. 2, p. 56–69, 1983.

KARJALAINEN, M.; VÄLIMÄKI, V.; TOLONEN, T. Plucked-string models: From the karplus-strong algorithm to digital waveguides and beyond. *Computer Music Journal*, JSTOR, v. 22, n. 3, p. 17–32, 1998.

KARPLUS, K.; STRONG, A. Digital synthesis of plucked-string and drum timbres. *Computer Music Journal*, JSTOR, v. 7, n. 2, p. 43–55, 1983.

KEHLING, C. et al. Automatic tablature transcription of electric guitar recordings by estimation of score-and instrument-related parameters. In: *DAFx*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 219–226.

LAURSON, M. et al. Methods for modeling realistic playing in acoustic guitar synthesis. *Computer Music Journal*, JSTOR, v. 25, n. 3, p. 38–49, 2001.

- LÁZARO, C. M. The velvet cloud: Infinite sustain and reverberation using velvet noise. Denmark, 2020.
- LEWIS, G. Too Many Notes: Computers, Complexity and Culture in Voyager. *Leonardo Music Journal*, v. 10, p. 33–39, 2000.
- LIMA, E. T. d.; RAMALHO, G. On Rhythmic Pattern Extraction in Bossa Nova Music. In: *Proceedings of ISMRI 2008*. [S.l.: s.n.], 2008.
- MENESES, E.; FREIRE, S.; WANDERLEY, M. GuitarAMI and GuiaRT: two independent yet complementary projects on augmented nylon guitars. In: *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Virginia: Virginia Tech, 2018. p. 222–227. ISBN 978-1-949373-99-8. ISSN: 2220-4806. Disponível em: [http://www.nime.org/proceedings/2018/nime2018\\_paper0049.pdf](http://www.nime.org/proceedings/2018/nime2018_paper0049.pdf).
- O'GRADY, P. D.; RICKARD, S. T. Automatic Hexaphonic Guitar Transcription Using Non-Negative Constraints. In: *Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications*. [S.l.: s.n.], 2009.
- ÖZASLAN, T. H. et al. Exploring Music Contents (CMMR: International Symposium on Computer Music Modeling and Retrieval). In: YSTAD, S.; ARAMAKI, M.; JENSEN, R. K.-M. K. (Ed.). [S.l.]: Springer, 2011. p. 219–241. Section: Identifying Attacks Articulations in Classical Guitar.
- PEETERS, G. et al. The timbre toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 130, n. 5, p. 2902–2916, 2011.
- PUCKETTE, M. Patch for guitar. In: *Proceedings of Pure Data Convention*. [S.l.: s.n.], 2007a.
- PUCKETTE, M. *The theory and technique of electronic music*. [S.l.]: World Scientific, 2007b.
- PUCKETTE, M.; APEL, T.; ZICARELLI, D. Real-time audio analysis tools for Pd and MSP. In: *International Computer Music Conference Proceedings*. [S.l.]: Citeseer, 1998.
- REBOURSIÈRE, L. et al. Left and Right-hand Guitar Playing Techniques Detection. In: *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. [S.l.: s.n.], 2012.
- RISSET, J.-C.; DUYNE, S. V. Real-Time Performance Interaction with a Computer-Controlled Acoustic Piano. *Computer Music Journal*, v. 20:1, p. 62–75, 1996.
- ROWE, R. *Interactive Music Systems: Machine Listening and Composing*. [S.l.]: MIT Press, 1993.
- ROWE, R. *Machine Musicianship*. [S.l.]: MIT Press, 2001.
- SCHAEFFER, P. *Treatise on Musical Objects: an Essay across Disciplines*. [S.l.]: University of California Press, 2017.
- SCHUBERT, E.; WOLFE, J. Does Timbral Brightness Scale with Frequency and Spectral Centroid? *Acta Acustica United with Acustica*, v. 92, p. 820–825, 2006.

- TRAUBE, C.; DEPALLE, P. Extraction of the Excitation Point Location on a String Using Weighted Least-Square Estimation of a Comb Filter Delay. In: *Proceedings of 6th International Conference on Digital Audio Effects*. [S.l.: s.n.], 2003.
- VÄLIMÄKI, V.; RÄMÖ, J.; FLORES, F. E. Creating endless sounds. In: UNIVERSITY OF AVEIRO. *International Conference on Digital Audio Effects*. [S.l.], 2018. p. 32–39.
- WESSEL, D.; WRIGHT, M.; SCHOTT, J. Situated Trio: An Interactive Live Performance for a Hexaphonic Guitarist and Two Computer Musicians with Expressive Controllers. In: *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Ireland: [s.n.], 2002.
- WINKLER, T. *Composing Interactive Music: Techniques and Ideas Using Max*. [S.l.]: MIT Press, 1998.
- XI, Q. et al. Guitarset: a Dataset for Guitar Transcription. In: *Proceedings of the 19th ISMIR Conference*. [S.l.: s.n.], 2018.
- ZICARELLI, D. M and jam factory. *Computer Music Journal*, JSTOR, v. 11, n. 4, p. 13–29, 1987.
- ZÖLZER, U. *DAFX: Digital Audio Effects*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- ZWICKER, E. Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). *J. Acoustical Society of America*, v. 33, n. 2, p. 248, 1961. Number: 2.