

Análise Quantitativa da Expressividade Musical
com Base em Medidas Acústicas e do Gesto Físico

Euler Teixeira

3 de Junho de 2010

Resumo

A expressividade musical é um conceito de difícil quantificação em parâmetros objetivos e é ainda geralmente analisada de forma subjetiva, por músicos ou pesquisadores com experiência musical. Atualmente há uma crescente busca por métodos e descritores concretos para extrair, quantificar, analisar e sintetizar essas intenções expressivas. Isso vem sendo feito principalmente através da análise de áudio das execuções musicais, buscando estabelecer relações entre as intenções expressivas do intérprete e características acústicas e estruturais da obra interpretada.

O objetivo desse trabalho é complementar esse método de análise acústica, incorporando também as informações visuais sobre a execução na investigação das intenções expressivas do músico, desenvolvendo uma metodologia e uma ferramenta computacional para a análise dos gestos físicos realizados por ele.

A estratégia adotada consiste em rastrear pontos de interesse nos movimentos corporais de clarinetistas de formação erudita, durante a execução de peças clássicas de Mozart, buscando definir gestos físicos coerentes e recorrentes a partir de uma segmentação desses movimentos e estabelecer um paralelo para essas informações entre uma execução notadamente livre e expressiva e outra mais restrita do mesmo trecho musical e também entre trechos de característica distinta dentro de cada peça executada, com base em aspectos estatísticos, geométricos, temporais e musicais.

As informações obtidas com o uso dessa análise de movimento poderão ser usadas em conjunto com os descritores acústicos, visando a obtenção de uma metodologia integrada de parametrização e quantificação das intenções expressivas dos músicos, que poderá ser incorporada a sistemas de síntese, reconhecimento, ensino e análise de música, e também utilizada no desenvolvimento de teorias nas áreas de musicologia, cognição e fisiologia humanas.

Abstract

Musical expressiveness is a concept of difficult quantification in terms of objective parameters, and it's still usually analyzed subjectively by musicians or musically experienced researchers. Today there is a growing interest in concrete methods and cues used to extract, quantify, analyze and synthesize these expressive intentions. This have been done mainly trough audio analysis of music performances, trying to establish relations between the musician's expressive intentions and the acoustical and structural characteristics of the musical piece.

The goal of this study is to complement this acoustical analysis method, by incorporating visual information about the performances in the investigation of the musician's expressive intentions, developing a methodology and a computational tool to analyze his physical gestures.

The strategy used consists of tracking points of interest in the body movements of clarinetists, while performing classical pieces by Mozart, aiming to define coherent and recurrent physical gestures based on a segmentation of this movements, and to establish a comparison for these data between a freely expressive performance and a controlled performance of the same musical piece and also between characteristically different parts of each piece, based on statistical, geometrical, temporal and musical aspects.

The information obtained from this movement analysis can then be used altogether with the acoustical parameters, in order to achieve an integrated methodology to quantify the musician's expressive intentions, that could be incorporated to musical synthesis, recognition, teaching and analysis systems, and also used in the development of theories related to musicology and human cognition and physiology.

Conteúdo

1	Introdução	5
2	Fundamentação Teórica	8
2.1	Parâmetros Acústicos	8
2.1.1	Pitch	8
2.1.2	Envoltória de Energia	10
2.2	Parâmetros Musicais	11
2.2.1	Representação Musical da Altura	11
2.2.2	Representação Musical da Duração	12
2.3	Parâmetros do Movimento Físico	13
2.3.1	Corpo Rígido Descrito em 6DoF	13
2.3.2	Distância Euclidiana no Espaço	14
3	Experimentação	15
3.1	Considerações Iniciais	15
3.2	Aquisição de Dados	17
3.3	Considerações Adicionais	19
4	Resultados	21
4.1	Pré-Processamento dos Dados	21
4.2	Segmentação dos Movimentos	22
4.2.1	Estimativa da Velocidade	22
4.2.2	Execuções Segmentadas	23
4.3	Análise Estatística dos Segmentos	26
4.3.1	Velocidade Média de Cada Segmento	26
4.3.2	Duração Total de Cada Segmento	27
4.4	Análise Geométrica dos Segmentos	28
4.4.1	Execução com o Metrônomo	29

4.4.2	Execução Livre	29
4.4.3	Gestos Físicos	32
5	Discussão	33
5.1	Segmentação de Movimento	33
5.1.1	Metodologia de Segmentação	33
5.1.2	Comparação entre os Trechos da Peça Musical	35
5.1.3	Comparação entre as Execuções	37
5.2	Gestos Físicos	39
5.2.1	Natureza dos Gestos	39
5.2.2	Comparação entre os Trechos da Peça Musical	41
5.2.3	Comparação entre as Execuções	43
6	Conclusão	47

Lista de Figuras

2.1	Pitch e o espectro de frequências de uma nota.	9
2.2	Envoltória de energia de uma nota musical.	10
2.3	Representação musical da altura das notas.	11
2.4	Representação musical da duração das notas.	12
2.5	Um exemplo de dois compassos quaternários.	12
2.6	Os seis graus de liberdade de um corpo rígido.	14
3.1	Um quadro do vídeo usado no rastreamento de pontos em imagens 2D para captura dos movimentos de clarinetistas.	16
3.2	Excerto selecionado do quinteto para clarineta e cordas em Lá Maior Kv. 581 de Mozart.	17
3.3	Fotografia do experimento de execução da peça musical com e sem metrônomo usando o Optotrak para captura de movimentos da cabeça do clarinetista.	18
3.4	Conjunto de dados de saída em 6DoF para uma coleta do Optotrak.	20
4.1	Módulo da velocidade resultante da cabeça estimada usando a distância euclidiana (mm/amostra).	23
4.2	Resultado da segmentação de movimento pelo critério dos mínimos de velocidade - Execução com o metrônomo em mínima.	24
4.3	Resultado da segmentação de movimento pelo critério dos mínimos de velocidade - Execução com o metrônomo em semínima.	25
4.4	Resultado da segmentação de movimento pelo critério dos mínimos de velocidade - Execução livre.	25
4.5	Trecho musical selecionado para estudo subdividido em frases.	26
4.6	Velocidade média em cada segmento de movimento (mm/amostra) com as frases musicais delimitadas por traços verticais.	27
4.7	Duração total em cada segmento de movimento (s) com as frases musicais delimitadas por traços verticais.	28

4.8	Trecho musical usado na análise geométrica dos segmentos.	29
4.9	Execução com o metrônomo - Trajetória espacial do gesto 1 em 3D(mm). 30	
4.10	Execução com o metrônomo - Trajetória espacial do gesto 2 em 3D(mm). 30	
4.11	Execução com o metrônomo - Trajetória espacial do gesto 3 em 3D(mm). 31	
4.12	Execução livre - Trajetória espacial do gesto 1 em 3D (mm).	31
4.13	Execução livre - Trajetória espacial do gesto 2 em 3D (mm).	32
5.1	Fluxo óptico extraído por análise de imagens em 2D de execuções livres da peça por 3 clarinetistas distintos, com as frases musicais delimitadas em verde.	36
5.2	Evolução do ângulo azimutal esférico (graus) ao longo das trajetórias dos gestos verticais na execução com o metrônomo e seus valores de desvio padrão.	42
5.3	Progressões harmônicas de resolução ao final das duas primeiras frases da peça musical.	44
5.4	Localização e agrupamento dos gestos na execução com o metrônomo. 45	
5.5	Localização e agrupamento dos gestos na execução livre.	45

Capítulo 1

Introdução

A expressividade musical é um conceito de difícil quantificação em parâmetros objetivos e é ainda geralmente analisada de forma subjetiva, por músicos ou pesquisadores experientes no assunto. No entanto, nos últimos anos houve uma procura por formas de mensurá-la e explicá-la de acordo com parâmetros quantitativos (Gabrielsson, 2003). Este problema vem sendo estudado por uma ampla gama de pesquisadores, tais como musicólogos, psicólogos, cientistas de computação, engenheiros e físicos.

Estudos nesse sentido já demonstraram que os músicos utilizam pequenos desvios de durações, articulações, intensidade, *pitch* e timbre, em relação aos valores nominais registrados na partitura, para comunicar ao ouvinte suas intenções expressivas em relação à peça executada (Gabrielsson, 1995; Juslin, 1997, 2000). Sem esse conteúdo expressivo a execução perde todo o seu caráter humano e individual a cada instrumentista. Até mesmo ouvintes inexperientes conseguem perceber esses desvios com certa facilidade, o que faz com que uma execução musical tecnicamente correta, mas inexpressiva, seja menos apreciada que uma execução expressiva da mesma peça.

Atualmente já existem inclusive sistemas de síntese musical que são capazes de executar peças a partir de partituras digitais ou arquivos midi. Ainda assim, incorporar a eles essas informações expressivas é uma tarefa complexa e subjetiva, o que faz com que uma peça sintetizada, apesar de correta, sempre soe estranha e robótica aos ouvintes, especialmente aqueles com experiência musical.

Por esses motivos e também com o objetivo de propor um novo conceito de ferramenta para a pedagogia do instrumento musical, é muito importante desenvolver métodos e descritores concretos para extrair, quantificar, analisar e sintetizar essas intenções expressivas.

Isso vem sendo feito até então principalmente através da análise de áudio das execuções musicais, extraindo informação de conteúdo musical do próprio som, ao

invés da partitura (Maestre and Gómez, 2005; Loureiro et al., 2007). Esse método busca estabelecer relações entre as intenções expressivas do intérprete e características acústicas e estruturais da obra interpretada, identificando os parâmetros acústicos capazes de descrever o conteúdo expressivo em termos dos desvios citados anteriormente e reconhecendo padrões na evolução temporal destes descritores (De Poli et al., 2004).

O objetivo desse trabalho é complementar esse método de análise acústica, incorporando também as informações visuais sobre a execução na investigação das intenções expressivas do músico. Em outras palavras, isso significa desenvolver uma metodologia e uma ferramenta computacional para a análise dos gestos físicos realizados pelo músico, capaz de extrair parâmetros dos seus movimentos corporais que possam ser associados de forma quantitativa às intenções expressivas empregadas por ele ao executar a música (Fenza et al., 2005; Camurri et al., 2001, 2004), bem como à própria estrutura da peça tocada. Esse tipo de investigação também vem sendo feito com sucesso no estudo da fala (Barbosa et al., 2008) e da dança (Naveda and Leman, 2008), examinando o acoplamento entre as suas componentes acústicas e visuais.

Observando uma execução musical nota-se que os movimentos corporais realizados pelos músicos, além de serem em muitos casos essenciais à própria produção sonora em seu instrumento, estão intimamente ligados a aspectos expressivos impostos por eles ao tocá-la (Vines et al., 2003). Essa é uma área de estudo muito nova e ainda não existe uma forma objetiva de extrair e quantificar essas informações dos movimentos, mas é bem razoável supor que elas se encontram presentes e são muito pertinentes para complementar a análise acústica de intenções expressivas (Davidson, 1993, 1995).

Para tentar estabelecer uma relação entre os aspectos visuais da performance e as intenções expressivas do intérprete dois passos são fundamentais (Camurri et al., 2004; Dahl and Friberg, 2007). Primeiramente, rastrear pontos de interesse no movimento corporal do intérprete durante a execução, buscando padrões perceptíveis de evolução temporal e espacial em suas trajetórias e tentando definir gestos físicos coerentes e recorrentes a partir desses dados. Posteriormente, estabelecer um paralelo para essas informações entre uma execução notadamente livre e expressiva e outra mais restrita, usada como caso de controle, e também entre trechos de característica distinta dentro de cada peça executada, levando em conta aspectos estatísticos, geométricos, musicais e temporais.

Dessa forma é possível investigar onde as informações de expressividade estão presentes nos movimentos do músico, como elas se comportam e qual a sua relação com o conteúdo e a estrutura musical da peça tocada (Wanderley et al., 2005). Esse método será definido e aplicado nesse estudo, usando como base os movimentos corporais de

clarinetistas de formação erudita, executando peças do repertório clássico para o seu instrumento.

As informações obtidas com o uso dessa análise de movimento poderão ser usadas futuramente, em conjunto com os descritores acústicos obtidos a partir do áudio das mesmas execuções, visando a obtenção de uma metodologia integrada, robusta e eficiente de parametrização e quantificação das intenções expressivas dos músicos, que poderá ser então incorporada a sistemas de síntese, reconhecimento, ensino e análise de música e também utilizada no desenvolvimento de novas teorias nas áreas de musicologia, cognição e fisiologia humanas.

A definição dos casos estudados, pontos corporais de interesse, peças musicais utilizadas, assim como todos os aspectos dos experimentos realizados nessa pesquisa e da ferramenta computacional desenvolvida para analisar os dados serão descritos em detalhe posteriormente nesse texto, juntamente com os resultados obtidos e as discussões e conclusões feitas a respeito dessas informações.

O texto está estruturado em cinco capítulos, além dessa introdução, descrevendo respectivamente, a fundamentação teórica da pesquisa, os experimentos realizados, os resultados analisados, um discussão sobre os resultados, e uma conclusão.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Nesse capítulo, alguns conceitos necessários para o entendimento completo do estudo serão definidos e ilustrados. Primeiramente serão mostrados alguns descritores acústicos fundamentais para a análise de áudio das peças, seguidos por uma breve introdução sobre aspectos musicais pertinentes à discussão. Ao final, algumas definições importantes utilizadas na extração e análise dos movimentos corporais também serão explicadas.

2.1 Parâmetros Acústicos

2.1.1 Pitch

O *pitch*, ou altura, está intimamente relacionado com a frequência fundamental percebida de um som ou nota musical, pelo nosso sistema auditivo. Ele é um dos parâmetros fundamentais usados para descrever uma nota, ao lado do timbre¹, da duração, e do nível de pressão sonora (*loudness* ou volume).

Uma fonte sonora complexa possui um espectro de frequências constituído por vários picos e vales. O nosso ouvido consegue detectar univocamente o *pitch* desse som, desde que seu espectro de frequências possua uma estrutura aproximadamente harmônica, com os picos ocorrendo em frequências múltiplas de um valor fundamental. A não ser em alguns casos isolados, principalmente com fontes sonoras muito graves, o nosso ouvido percebe o *pitch* como sendo a frequência fundamental dessa estrutura, ou o primeiro dos picos harmônicos do espectro. A Figura 2.1 ilustra essa definição.

¹O conceito de timbre ainda é uma questão em aberto. Segundo a Sociedade Acústica dos Estados Unidos o timbre é definido como a diferença entre dois sons de mesma duração, intensidade e altura.

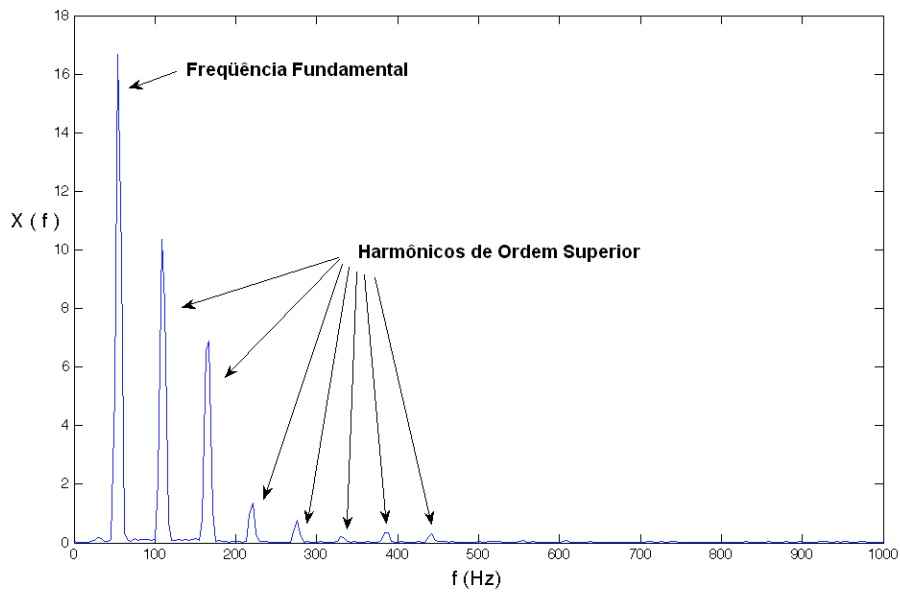


Figura 2.1: Pitch e o espectro de frequências de uma nota.

O *pitch* é o parâmetro que carrega a noção do próprio valor da nota musical em si, determinando se é ouvida uma nota Lá, ou Ré, por exemplo. De acordo com a escala temperada de notas, cada vez que a frequência fundamental do som é aumentada ou reduzida em aproximadamente seis por cento uma nova nota musical, ou semi-tom, é alcançado. Além disso, cada vez que essa frequência é dobrada uma nova oitava é alcançada e a nota percebida é a mesma da inicial, porém mais aguda, já que está localizada na oitava superior. Cada oitava contém 12 semi-tons.

Por exemplo, o Lá central é geralmente dado por uma frequência fundamental de 440 Hz. Aumentando esse valor em seis por cento obtém-se uma frequência de 466,4 Hz, que equivale ao Lá sustenido, próxima nota na escala. Esse Lá central também é chamado de Lá 4 e dobrando sua frequência fundamental para 880 Hz obtém-se essa mesma nota, porém uma oitava acima, o Lá 5.

Os picos harmônicos de ordem mais elevada no espectro de frequências da nota são por sua vez ligados ao timbre percebido do som. Dois sons que possuem a mesma frequência fundamental, mas distribuições diferentes dos harmônicos superiores, serão percebidos como sendo a mesma nota musical, apesar de soarem de forma muito distinta. Isso ocorre por exemplo quando ouvimos a mesma nota musical sendo tocada em um piano e em um violino, instrumentos que possuem timbres muito diferentes, mas são capazes de produzir as mesmas notas, em uma dada região da escala temperada.

Nessa pesquisa as curvas de *pitch* serão extraídas das amostras de áudio analisadas, através da inspeção dos seus espectros de frequências em janelas temporais sucessivas de curta duração. Dessa forma será possível visualizar as melodias executadas diretamente do áudio, analisando seu comportamento e sua relação com a partitura de referência, além de outros parâmetros acústicos e gestuais importantes ao estudo.

2.1.2 Envoltória de Energia

Outro parâmetro fundamental para descrever uma nota musical, ou qualquer onda sonora, é a sua envoltória de energia, já que ela fornece um meio simples e direto de analisar a forma de evolução e a magnitude dos níveis de pressão sonora envolvidos na sua produção.

Através da inclinação dessa curva de energia fica mais fácil identificar por exemplo os pontos de início e fim de cada nota, além das regiões de ataque, sustentação e repouso dentro de cada uma delas. O significado e a importância da envoltória de energia no contexto de análise e segmentação de notas musicais é melhor ilustrado graficamente (Loureiro et al., 2007), de acordo com a Figura 2.2.

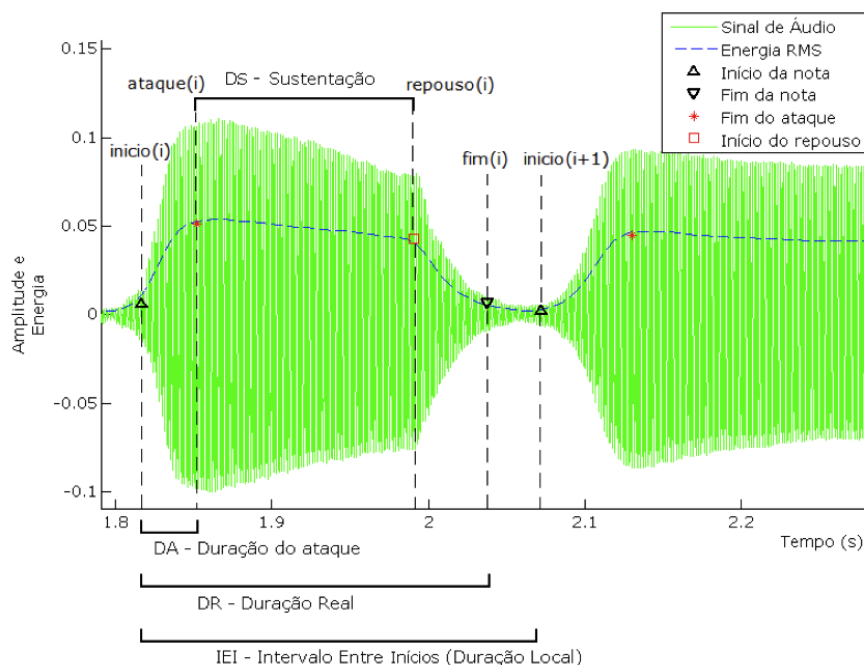


Figura 2.2: Envoltória de energia de uma nota musical.

Essa envoltória de energia é geralmente obtida através do cálculo do valor RMS de pequenas janelas temporais, sucessivamente ao longo de todo o vetor de áudio do

trecho musical analisado. O valor RMS, também conhecido como média quadrática, para uma janela retangular simétrica de $N+1$ amostras, é dado pela fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{n=-N/2}^{N/2} x[n]^2}.$$

Combinando as informações da curva de energia RMS com as fornecidas pela curva de *pitch* explicada anteriormente é possível realizar uma segmentação e um mapeamento completo de qualquer trecho musical monofônico, de acordo com as suas notas constituintes, obtendo uma partitura digital, arquivo midi, ou um grande conjunto de dados estatísticos a respeito das notas, transições, compassos e frases presentes na peça executada, partindo apenas do arquivo de áudio capturado (Campolina et al., 2009). Isso será fundamental para a realização desse estudo.

2.2 Parâmetros Musicais

Nessa subseção alguns conceitos básicos de teoria musical serão ilustrados, simplesmente para facilitar o entendimento de algumas definições e observações feitas nos capítulos seguintes.

2.2.1 Representação Musical da Altura

Na música a informação de *pitch*, ou altura das notas musicais, é notada de forma intuitiva e similar ao que se observa na própria curva de *pitch* extraída do sinal de áudio. A altura da nota está diretamente relacionada com a posição vertical do símbolo que a representa na pauta. A Figura 2.3 ilustra essa notação.



Figura 2.3: Representação musical da altura das notas.

Da esquerda pra direita, temos a seqüência: Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá, Si, Dó, Si, Lá, Sol, Fá, Mi, Ré, Dó. Cada salto vertical na pauta, de uma linha para um espaço, ou de um espaço para uma linha, corresponde a um salto de um tom, ou de um semi-tom. O símbolo à esquerda da pauta, chamado de “clave de sol”, é um marcador de referência, indicando nesse caso que a segunda linha da pauta, de baixo pra cima, corresponde à nota Sol.

2.2.2 Representação Musical da Duração

Cada nota musical é representada na pauta por diferentes símbolos, de acordo com sua duração, como mostra a Figura 2.4.



Figura 2.4: Representação musical da duração das notas.

Da esquerda pra direita na figura, cada símbolo corresponde a uma duração duas vezes mais curta que a anterior. Isso significa que o intervalo de tempo ocupado por uma semibreve é igual ao ocupado por duas mínimas, quatro semínimas, oito colcheias ou dezesseis semicolcheias, e assim por diante.

Compasso e Andamento

Um compasso é uma unidade métrica básica de tempo, delimitado por traços verticais na pauta, que é por sua vez subdividido em unidades de tempo. Os excertos analisados nesse estudo são constituídos de compassos quaternários e têm a semínima como unidade rítmica básica, ou seja, cada compasso contém 4 semínimas.

A Figura 2.5 representa um trecho musical com dois compassos quaternários de mesma duração. O primeiro deles contém quatro semínimas (Ré-Mi-Fá-Ré) e o segundo duas mínimas (Si-Dó).



Figura 2.5: Um exemplo de dois compassos quaternários.

A duração dessas figuras rítmicas é relativa e para impor um intervalo de tempo concreto a cada uma delas é preciso utilizar o metrônomo, um instrumento que produz batidas regularmente espaçadas e invariantes no tempo e é muito usado por músicos para praticar em seus instrumentos. O metrônomo é muito utilizado por compositores para estabelecer uma referência de andamento à execução de sua composição. O primeiro compositor a utilizar o metrônomo foi Ludwig van Beethoven, no início do século XIX, o qual fornecia a marcação em batidas por minuto (BPM), unidade

de frequência utilizada até hoje na prática musical. Quanto maior o número de batidas por minuto, mais rápido será o andamento e mais curta a duração das figuras rítmicas.

A batida do metrônomo indicada pelo compositor na partitura corresponde normalmente à unidade de tempo, mas pode ser associada pelo músico a qualquer figura rítmica, dependendo do nível temporal daquilo que ele deseja praticar. Nesse estudo, o metrônomo correspondeu à semínima em alguns casos e à mínima em outros, gerando quatro batidas por compasso ou duas batidas por compasso, respectivamente.

2.3 Parâmetros do Movimento Físico

2.3.1 Corpo Rígido Descrito em 6DoF

Uma definição importante utilizada na análise de movimentos corporais é a de um corpo rígido, uma estrutura idealizada que modela um sólido de tamanho finito, supondo que esse corpo não sofre nenhum tipo de deformação física. Essa suposição é bem razoável no contexto desse estudo e significa basicamente que a distância entre dois pontos quaisquer desse corpo rígido se mantém constante no tempo, independente das forças que atuam sobre ele e dos movimentos realizados pelo mesmo.

A posição espacial de um corpo rígido é dada pela posição de todos os seus pontos componentes, mas como a posição relativa dos mesmos se mantém sempre inalterada, de acordo com a suposição anterior, existem duas formas muito simples de descrevê-la no espaço tridimensional. A primeira delas consiste em fornecer as coordenadas espaciais de três pontos não-colineares desse corpo. A segunda delas consiste em fornecer as coordenadas espaciais de um ponto, de preferência o centróide do corpo rígido, e a posição angular desse corpo, dada geralmente por três ângulos, que representam sua rotação em torno dos três eixos cartesianos.

Nesse estudo essa segunda forma de descrição do corpo rígido será utilizada para modelar a movimentação da cabeça do músico. Ela fornece um conjunto de dados resultante que descreve a posição da cabeça em um sistema de coordenadas de seis graus de liberdade, para cada instante de amostragem. Três coordenadas cartesianas (x , y , z) referentes à posição do centróide da cabeça no espaço e os três ângulos de rotação R_x , R_y e R_z para esse corpo rígido, em torno dos seus três eixos de coordenadas. A Figura 2.6 ilustra melhor a definição dessas rotações.

Esse método de descrição da cabeça como um corpo rígido no espaço 6DoF (*six degrees of freedom*) torna a análise de seus movimentos mais simples, direta e intuitiva.

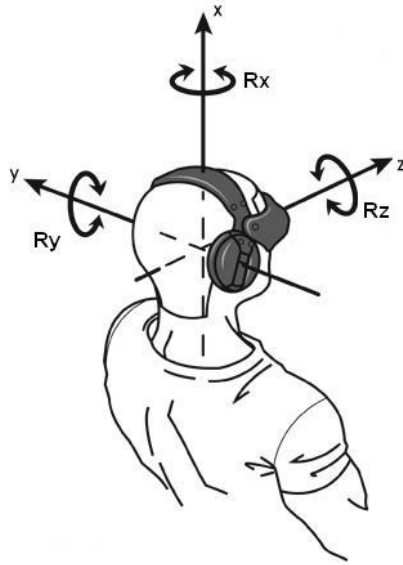


Figura 2.6: Os seis graus de liberdade de um corpo rígido.

tiva, já que elimina a necessidade de trabalhar individualmente com múltiplos pontos de rastreamento e desacopla as informações de deslocamento linear e angular. A descrição completa da aplicação desse método, no contexto específico desse estudo, será feita no próximo capítulo.

2.3.2 Distância Euclidiana no Espaço

Na análise de movimentos corporais, para estimar a magnitude total de deslocamento linear e também o módulo da velocidade resultante da cabeça do músico será utilizada a distância euclidiana tridimensional. Ela mede a distância em linha reta entre dois pontos quaisquer no espaço, aplicando o teorema de Pitágoras.

Essa distância euclidiana no espaço, medida entre os dois pontos $p_1 = (x_1, y_1, z_1)$, e $p_2 = (x_2, y_2, z_2)$, é dada por:

$$d(p_1, p_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}.$$

Essa medida é uma ferramenta geométrica muito útil, já que possibilita a obtenção de parâmetros escalares e unidimensionais de análise, a partir das três coordenadas espaciais de posição. Ela combina as informações presentes nessas três dimensões de forma simples e efetiva e será utilizada para reduzir a complexidade da análise dos movimentos espaciais. Todos os detalhes sobre a aplicação dessa distância no presente estudo serão descritos mais a frente nesse texto.

Capítulo 3

Experimentação

Nesse capítulo a metodologia adotada nos experimentos práticos será descrita em detalhe. Inicialmente, algumas considerações sobre experimentos preliminares, importantes na definição final das técnicas e preceitos adotados para colher os dados serão ilustrados, a título de contextualização e introdução. A seguir, o procedimento que gerou o conjunto de dados definitivo analisado será descrito e ao final, uma breve conclusão será elaborada sobre os resultados operacionais desse experimento, bem como sobre o conjunto de dados extraído do mesmo.

3.1 Considerações Iniciais

O objetivo inicial da pesquisa consistia em medir e analisar a movimentação e os potenciais gestos empregados por um clarinetista ao executar uma peça em seu instrumento. Para isso, inicialmente foi proposta uma abordagem de extração de movimento baseada em análise de imagens (Camurri et al., 2004).

Três clarinetistas experientes foram filmados executando peças conhecidas de Mozart. Cada um deles foi instruído a tocar as peças com e sem “intenção expressiva”. Marcadores de diferentes cores foram fixados na testa, na mão esquerda e na extremidade inferior da clarineta, servindo como pontos de referência para a extração dos movimentos. Com as imagens capturadas em câmera de vídeo digital, foi escrito um programa em C para rastrear os pontos de interesse em cada quadro e armazenar em vetores as suas coordenadas espaciais em duas dimensões, ao longo do tempo. A Figura 3.1 mostra um quadro do vídeo, com a trajetória dos pontos já rastreada.

Uma análise superficial da movimentação dos marcadores, comparando as execuções com e sem intenção expressiva, revelou haver de fato grande potencial de informação contida nos movimentos acompanhantes (Wanderley et al., 2005) do músico ao execu-



Figura 3.1: Um quadro do vídeo usado no rastreamento de pontos em imagens 2D para captura dos movimentos de clarinetistas.

tar as peças expressivamente. Por outro lado, esse experimento inicial também apontou muitas limitações nessa metodologia de extração de movimento. Trabalhando-se com rastreamento automático de pontos em imagens a resolução temporal e principalmente espacial da trajetória se mostrou muito baixa, bem como a confiabilidade e robustez do rastreamento em si. Além disso, a principal deficiência técnica desse método é a limitação da análise das trajetórias a duas dimensões, o que impede um entendimento mais completo dos gestos envolvidos no movimento do clarinetista. Já pelo lado conceitual, a própria separação das execuções em “com intenção expressiva” e “sem intenção expressiva” também abre margem para questionamento. Um maior rigor é necessário na definição de um grupo de controle, já que o conceito de intenção expressiva é abstrato e os próprios músicos não tem costume algum de executar uma peça sem intenção expressiva, o que acaba acarretando em desconforto e em uma imobilização nada natural de movimento nessas execuções.

De posse das conclusões e limitações percebidas nesse experimento preliminar uma nova e mais rigorosa abordagem foi desenvolvida para um segundo experimento, agora definitivo, realizado com equipamento adequado de grande exatidão e maior cuidado em todas as definições e procedimentos.

3.2 Aquisição de Dados

No segundo experimento realizado a extração do movimento não foi feita a partir de análise de imagens. Ao invés disso, ela foi feita com o uso de um equipamento específico de rastreamento de movimento em três dimensões de alta exatidão, o Optotrak. Ele consiste de um sensor, construído a partir de três câmeras de infra-vermelho fixamente posicionadas ao longo de um eixo, que determina a posição de marcadores formados por LED's emissores de luz infra-vermelha dentro de um volume tridimensional previamente definido. Altas taxas de amostragem são conseguidas com um bom número de marcadores, além de uma grande exatidão e resolução espacial nas três dimensões, da ordem de décimos de milímetros. Fora isso, o sistema possibilita a captura simultânea e síncrona do áudio da execução em questão, fator imprescindível para uma investigação completa da intenção expressiva presente na peça, bem como para o estabelecimento correto de um paralelo entre os gestos analisados e a música tocada. No experimento preliminar essa sincronização foi realizada manualmente, após a captura, o que gerou certa dificuldade e perda de exatidão.

Nesse experimento definitivo, de forma a concentrar os esforços na determinação de uma metodologia consistente para definir, analisar e comparar gestos empregados pelo músico em situações diversas, optou-se por trabalhar com apenas um clarinetista, executando apenas uma peça, de duas formas distintas. A análise também foi restrita por agora aos movimentos executados pelo músico com a sua cabeça, já que ela é uma das regiões corporais mais importantes na comunicação das suas intenções expressivas (Davidson, 1994). Para resolver o problema do grupo de controle descrito na seção anterior a peça foi executada de duas formas distintas e bem definidas. Primeiro o músico a executou livremente, da forma como estava habituado, ou como o faria em uma situação real de concerto. Depois a mesma peça foi executada por ele, mas agora seguindo o som da batida de um metrônomo. A peça escolhida, notada na Figura 3.2, foi o primeiro tema do primeiro movimento do Quinteto de Mozart para clarineta e quarteto de cordas em Lá Maior (Kv.581), bem conhecida e familiar ao músico. Em uma dessas execuções o metrônomo marcou a mínima a 63 BPM e em outra a semínima a 126 BPM.



Figura 3.2: Excerto selecionado do quinteto para clarineta e cordas em Lá Maior Kv. 581 de Mozart.

Espera-se que ao executar a peça ouvindo o metrônomo, a principal preocupação do músico seja em segui-lo, tocando a música da forma mais regular possível, dentro da métrica determinada pela partitura. Dessa forma a atenção e a intenção do músico estariam voltadas para um elemento externo de controle, o que provavelmente inibirá suas intenções expressivas próprias e naturais ao tocar a música. Por outro lado, sem a referência do metrônomo o músico pode executar a peça livremente, manipulando a duração e forma das notas, bem como seus movimentos corporais, de forma a produzir um resultado único, a seu gosto e agradável aos ouvidos dos espectadores. Nesse caso sua atenção e intenção estarão focadas unicamente em atingir o resultado musical desejado por ele próprio. A partir dessa suposição e utilizando essas duas variações nas execuções, espera-se obter uma forma eficiente e objetiva de comparação entre execuções com intenção livre e plena do intérprete e execuções com baixo conteúdo expressivo, restritas pela presença do metrônomo, tanto no que diz respeito à música tocada, quanto no que diz respeito aos movimentos realizados ao longo da execução.

O experimento foi conduzido da seguinte forma. O clarinetista executou a peça algumas vezes, com e sem o metrônomo, sentado em uma cadeira cerca de 2 metros à frente do sensor do Optotrak e com marcadores do equipamento fixados na região da sua cabeça. O sensor foi colocado na posição horizontal, visando obter um volume total de medição mais adequado ao experimento. As execuções também foram filmadas em câmera de vídeo e tiveram seu áudio captado por um microfone dinâmico, posicionado próximo à clarineta. A Figura 3.3 ilustra melhor o procedimento adotado.



Figura 3.3: Fotografia do experimento de execução da peça musical com e sem metrônomo usando o Optotrak para captura de movimentos da cabeça do clarinetista.

Para analisar de forma mais simples e completa o movimento da cabeça do músico uma ferramenta muito útil do sistema foi utilizada. Quatro marcadores foram usados

para criar e definir um corpo rígido, representando a cabeça do intérprete. Os quatro marcadores foram acoplados mecanicamente entre si, com o uso de uma espécie de capacete, construído com espetos de madeira e cola, de forma a ser leve e não atrapalhar ou influenciar na execução das peças pelo músico. O capacete com os marcadores foi por sua vez fixado em torno da cabeça do músico e o conjunto de quatro marcadores fixados a ele foi declarado como um corpo rígido junto ao software de coleta de dados do sistema. Dessa forma o software fornece na saída um único conjunto de coordenadas em seis graus de liberdade para o corpo em questão, três representando a posição em milímetros quadro a quadro do centróide do corpo em um sistema cartesiano tridimensional e os outros três representando a rotação do corpo em radianos, em torno de cada um dos seus eixos, de acordo com a Figura 2.6. Esse procedimento fornece um conjunto de dados de saída simplificado e de análise mais intuitiva, que modela de forma mais direta e eficiente o movimento da cabeça, justamente o objeto desse estudo.

Uma coleta de dados do equipamento foi tomada para cada execução da peça pelo clarinetista, de acordo com o procedimento descrito nessa seção. A taxa de amostragem utilizada para rastrear os marcadores foi de 60 quadros por segundo. O áudio das execuções também foi gravado diretamente junto à placa auxiliar de aquisição de dados analógicos de tensão do equipamento, de forma a obter uma sincronização automática e perfeita com os dados do movimento. A taxa de amostragem usada na coleta do áudio foi de 10kHz, com uma resolução de 12 bits por amostra. Todo o experimento também foi documentado em vídeo para auxílio posterior na análise.

3.3 Considerações Adicionais

O experimento foi conduzido sem maiores problemas e, posteriormente, as melhores execuções para o caso livre e o caso com o metrônomo foram selecionadas pelo músico e salvas. Cada uma das execuções ou coletas selecionadas foi então exportada para sete vetores do MatLab, correspondentes às três coordenadas cartesianas de posição (x, y, z) e às três rotações R_x, R_y e R_z referentes à cabeça do músico, além do áudio da peça. Esse conjunto de dados é ilustrado na Figura 3.4.

Esses vetores correspondentes aos dados de saída foram então processados e usados para a extração de diversos parâmetros referentes ao movimento da cabeça do clarinetista, tais como: estimativas da velocidade e aceleração instantâneas resultantes; deslocamento, duração, centróide e desvio padrão de trechos de interesse; entre outros. O vetor de áudio também foi processado com o uso do pacote Expan

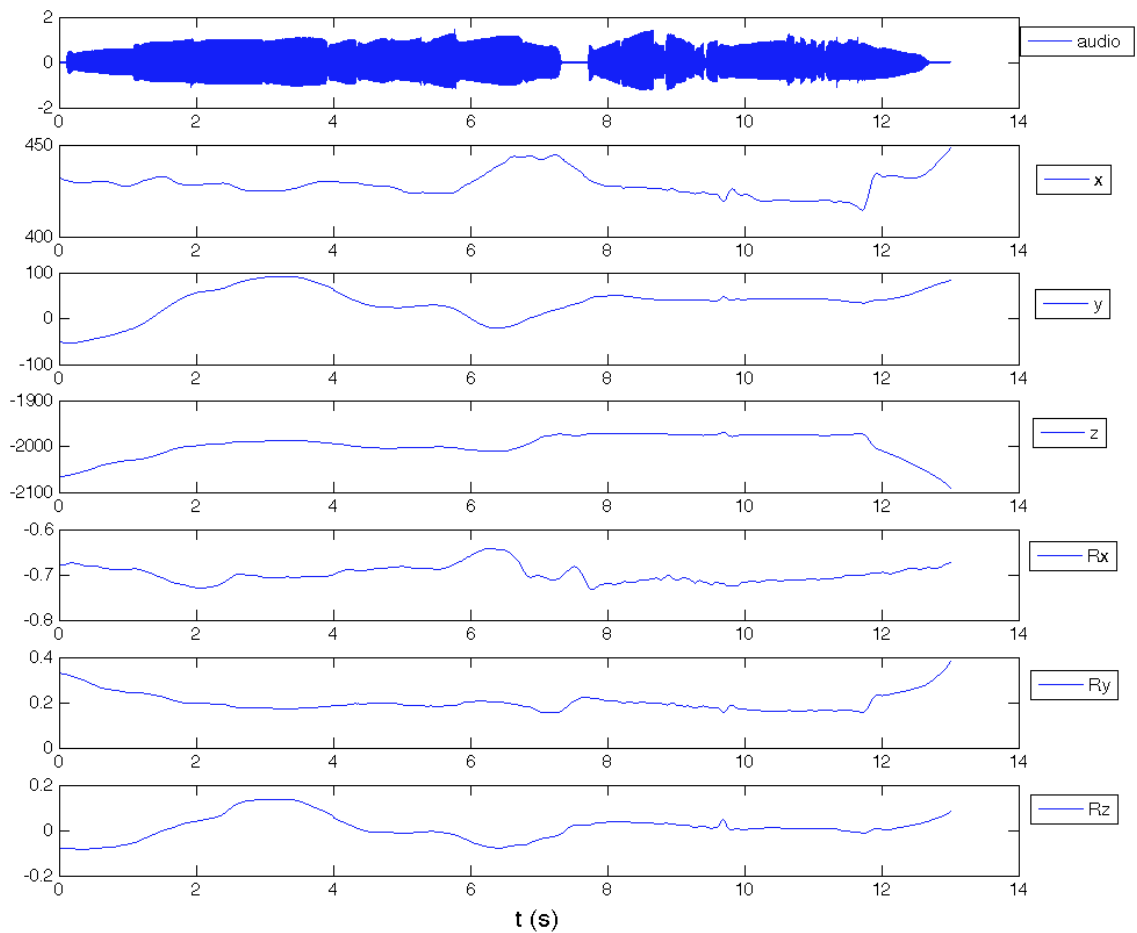


Figura 3.4: Conjunto de dados de saída em 6DoF para uma coleta do Optotrak.

(Campolina et al., 2009), desenvolvido na escola de música da UFMG para extração de diversos parâmetros da peça musical, tais como: curvas de *pitch* e energia RMS; duração das notas; tempos de ataque, sustentação e *release* das notas; além de índices de *legato*, articulação e fluxo espectral nas transições entre notas.

Todos esses dados foram usados posteriormente no desenvolvimento de uma metodologia de definição, análise e comparação dos gestos empregados pelo músico nas execuções, que visa investigar formas de relacioná-los às intenções expressivas do intérprete e à estrutura musical do trecho analisado. Essa metodologia será descrita e ilustrada, através dos gráficos e dados estatísticos resultantes, ao longo do próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados

Nesse capítulo os resultados analisados, extraídos a partir dos experimentos descritos no capítulo anterior, serão descritos em detalhe e ilustrados graficamente. No próximo capítulo uma discussão conceitual e comparativa mais detalhada será realizada acerca de todos esses dados e definições.

4.1 Pré-Processamento dos Dados

Com a aquisição de dados completa, três execuções foram selecionadas para análise. Uma execução livre e duas tocadas com o metrônomo, sendo uma delas com a pulsação em mínima e a outra com a pulsação em semínima. Cada uma das três coletas correspondentes a essas execuções foi exportada do programa de aquisição de dados do Optotrak para o MatLab, conforme descrito no final do capítulo anterior.

O primeiro passo foi processar os vetores correspondentes ao sinal de áudio de cada uma das coletas para extrair suas curvas de *pitch*. Para cada execução foi plotada a forma de onda do áudio com sua curva de *pitch* correspondente, de forma a definir precisamente os pontos de início e fim da música dentro da coleta, eliminando os trechos indesejados de silêncio ou ruído. Os instantes iniciais e finais de cada execução foram armazenados e aplicados também aos vetores correspondentes ao movimento da cabeça. Como a taxa de amostragem do vetor de áudio é muito superior à dos vetores de movimento, um escalonamento adequado foi necessário nessa etapa, bem como em todas as operações posteriores referentes simultaneamente aos índices dos vetores de áudio e movimento. Vetores de tempo adequados também foram definidos para cada caso, possibilitando a plotagem de todos os dados conjuntamente e com o eixo temporal em segundos.

4.2 Segmentação dos Movimentos

Com as execuções devidamente importadas e delimitadas é possível iniciar de fato a análise completa dos movimentos da cabeça do clarinetista em cada caso. Para isso, é muito importante estabelecer uma forma eficiente de visualizar e entender esses movimentos. Assim como ocorre na música em si, a análise dos movimentos executados em cada peça como um todo é muito complexa e pouco informativa, o que sugere a necessidade de realizar uma segmentação do movimento em trechos mais curtos e menos complexos.

Na música essa segmentação pode ser feita em notas, grupos de notas, frases, compassos, entre outros. As unidades musicais básicas são bem conhecidas e a segmentação pode ser feita de forma mais bem definida e rigorosa. No caso dos movimentos isso não ocorre. Não se sabe ainda como definir objetivamente um gesto, ou quais seriam as unidades básicas de análise e agrupamento desses movimentos. Essa foi a principal dificuldade encontrada inicialmente nesse estudo, porém uma abordagem relativamente simples foi proposta para tentar contorná-la.

Uma forma intuitiva de segmentar o movimento e que combina de forma eficiente as informações contidas nas três dimensões espaciais é através da análise do módulo da velocidade resultante da cabeça do músico. Já foi mostrado que a velocidade de um corpo é um parâmetro bastante adequado para analisar o seu movimento (Camurri et al., 2001, 2004; Fenza et al., 2005). Essa abordagem se mostrou eficaz e foi de implementação relativamente simples, já que reduziu o critério de segmentação a apenas uma dimensão.

A suposição inicial foi a de que pontos de mínimo local na curva de velocidade correspondem a instantes de inflexão do movimento, onde haveria maior probabilidade de ocorrer troca de direção ou tipo de movimentação. Esses pontos-chave foram então tomados como base para a segmentação, definindo segmentos entre dois mínimos de velocidade subseqüentes.

4.2.1 Estimativa da Velocidade

O primeiro passo para realizar a segmentação de movimento foi estimar a velocidade resultante da cabeça do músico da forma mais fiel possível. Alguns métodos foram tentados, baseados em derivadas de posição e até mesmo na dispersão espacial do centróide em janelas de curta duração, mas o critério escolhido se mostrou mais simples e eficiente que todos esses.

Para estimar o módulo da velocidade resultante da cabeça do músico foi calculada a distância euclidiana entre as posições do seu centróide em duas amostras subseqüentes. No espaço tridimensional tal distância é dada por:

$$d = \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2 + (z_{n+1} - z_n)^2}.$$

Essa distância representa o deslocamento total ocorrido no intervalo de tempo entre duas amostras da coleta. Dividindo esse deslocamento pelo período de amostragem, que é justamente esse intervalo de tempo bem conhecido, tem-se a velocidade média para esse curto intervalo. Como o período de amostragem é bem pequeno, inferior a dois centésimos de segundo, é possível estimar com boa exatidão o módulo da curva de velocidade resultante repetindo esse procedimento seqüencialmente ao longo de toda a execução. Um exemplo dessa estimativa é mostrado na Figura 4.1 para a coleta tocada com o metrônomo em mínima.

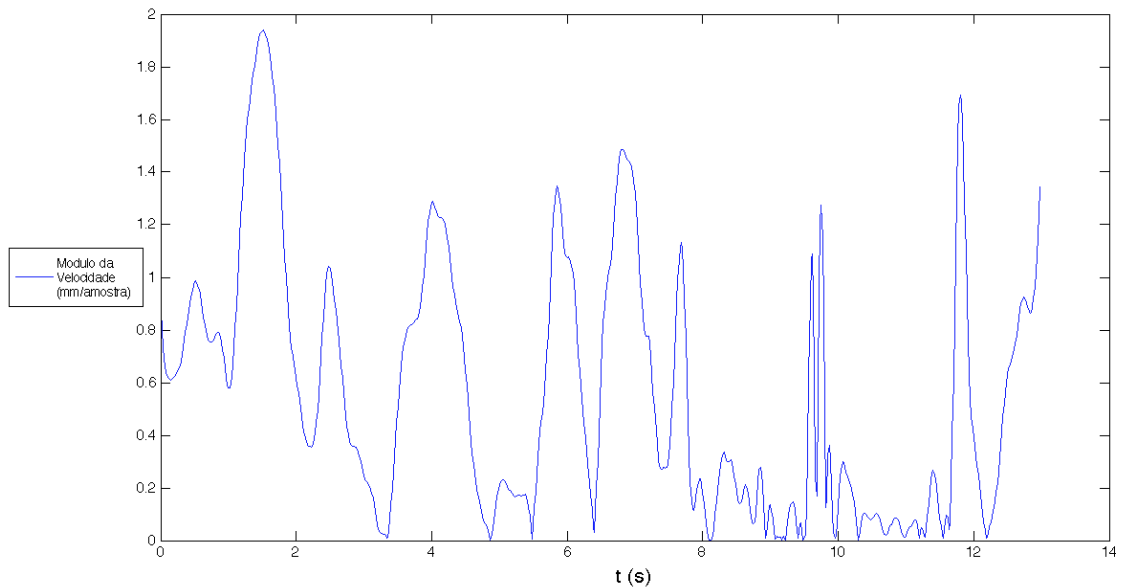


Figura 4.1: Módulo da velocidade resultante da cabeça estimada usando a distância euclidiana (mm/amostra).

4.2.2 Execuções Segmentadas

Com a velocidade devidamente estimada é possível realizar de fato a segmentação dos movimentos da cabeça do clarinetista. Para isso, foi usado o critério de segmentação descrito anteriormente, baseado nos mínimos locais da curva de módulo da sua velocidade resultante. Esse método foi aplicado às três execuções em estudo e os gráficos

são mostrados a seguir nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Eles foram plotados com a mesma escala de tempo e amplitude, de forma a facilitar a comparação entre eles.

Em cada figura, o gráfico superior representa o módulo da velocidade resultante da cabeça, dada em milímetros por amostra, conforme descrito na subseção anterior. Já o gráfico inferior mostra a curva de *pitch* da execução, dada em Hertz, em azul, sua forma de onda do áudio em vermelho e o resultado da segmentação em verde.

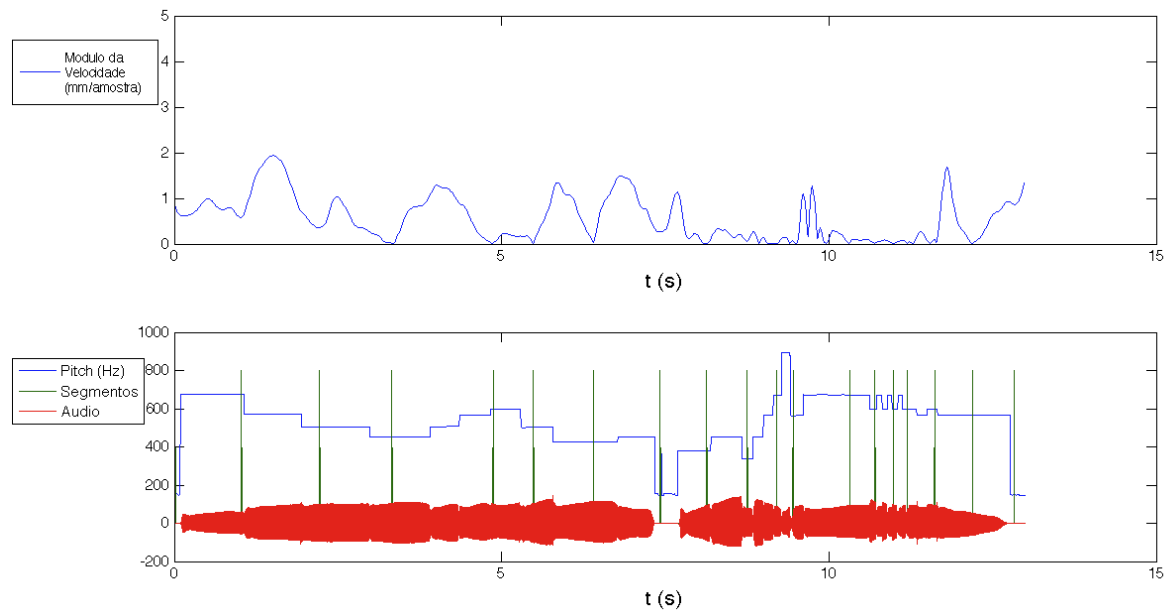


Figura 4.2: Resultado da segmentação de movimento pelo critério dos mínimos de velocidade - Execução com o metrônomo em mínima.

Esse método de segmentação, ainda que baseado em um critério bem simples, produziu bons resultados. Com os movimentos do músico segmentados é possível fazer uma melhor comparação entre os casos em estudo, tanto no que diz respeito às próprias características espaciais e temporais dos gestos, quanto na sua subdivisão e distribuição ao longo de cada execução.

Uma discussão conceitual mais completa será elaborada ao longo do próximo capítulo mas, a seguir, serão ilustradas algumas características importantes referentes aos segmentos encontrados. Além disso, uma investigação preliminar sobre alguns gestos empregados pelo músico será apresentada, a partir da análise individual e em grupos da trajetória tridimensional dos segmentos.

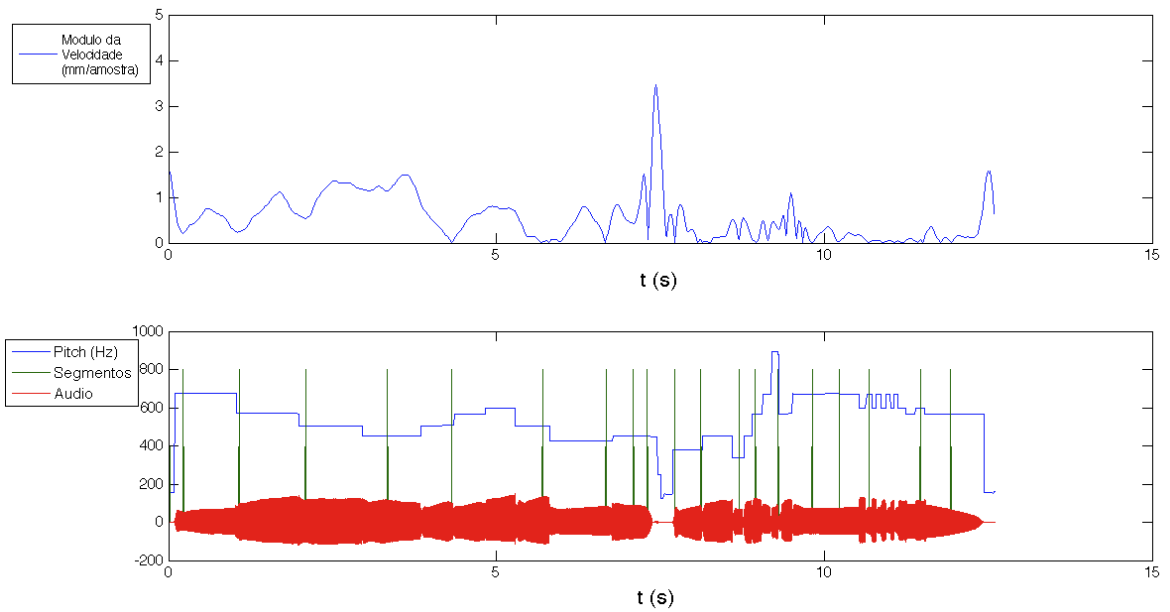


Figura 4.3: Resultado da segmentação de movimento pelo critério dos mínimos de velocidade - Execução com o metrônomo em semínima.

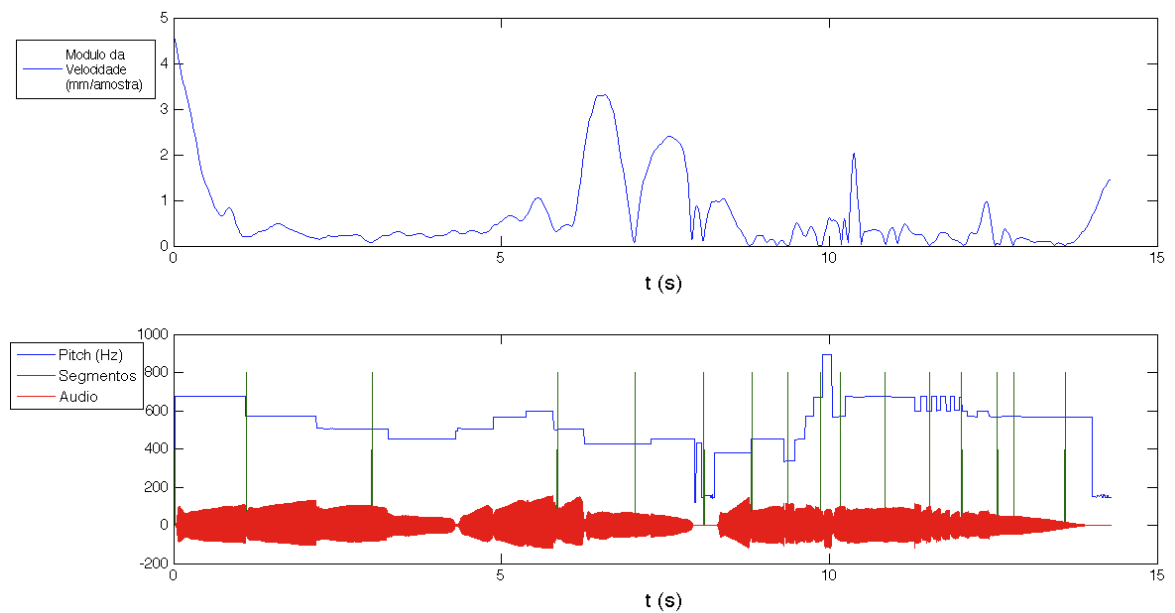


Figura 4.4: Resultado da segmentação de movimento pelo critério dos mínimos de velocidade - Execução livre.

4.3 Análise Estatística dos Segmentos

Com os movimentos da cabeça do clarinetista segmentados ao longo das execuções é possível levantar algumas estatísticas básicas importantes desses segmentos. Através desses dados é possível estabelecer uma comparação mais objetiva entre os casos estudados e até mesmo tentar identificar algum padrão de comportamento em seus movimentos, ao longo de cada execução.

Para auxiliar essa análise comparativa a peça musical também foi subdividida em cinco trechos ou frases coerentes, de acordo com a Figura 4.5. O critério dessa subdivisão foi bem simples e natural a um ouvinte e puramente baseado em aspectos estruturais do trecho, gerando frases com início meio e fim, além de uma clara direção de resolução harmônica. O objetivo desse procedimento é simplesmente facilitar a análise dos movimentos, a partir de segmentos mais restritos, delimitados por pontos de inflexão estruturais similares nas três execuções.

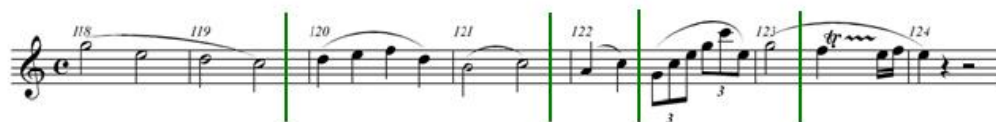


Figura 4.5: Trecho musical selecionado para estudo subdividido em frases.

Intuitivamente, dois parâmetros estatísticos básicos referentes aos segmentos do movimento foram levantados e serão ilustrados a seguir para posterior análise. A velocidade média em cada segmento e a duração total de cada segmento. Esses dois dados dão uma idéia muito boa da magnitude e extensão dos movimentos da cabeça do músico em cada trecho de forma simples e direta.

4.3.1 Velocidade Média de Cada Segmento

Na Figura 4.6 são plotadas em azul as curvas de velocidade média por segmento para as três execuções em estudo, dadas em milímetros por amostra. Acima, observa-se o caso com metrônomo em mínima, seguido do caso com o metrônomo em semínima e mais abaixo o caso da execução livre.

No eixo horizontal a escala temporal em segundos original das peças foi mantida, de forma a facilitar a comparação entre os casos e manter o padrão adotado em todos os gráficos desse capítulo. As frases musicais definidas na Figura 4.5 estão delimitadas por linhas verticais em verde, visando auxiliar a análise dos dados.

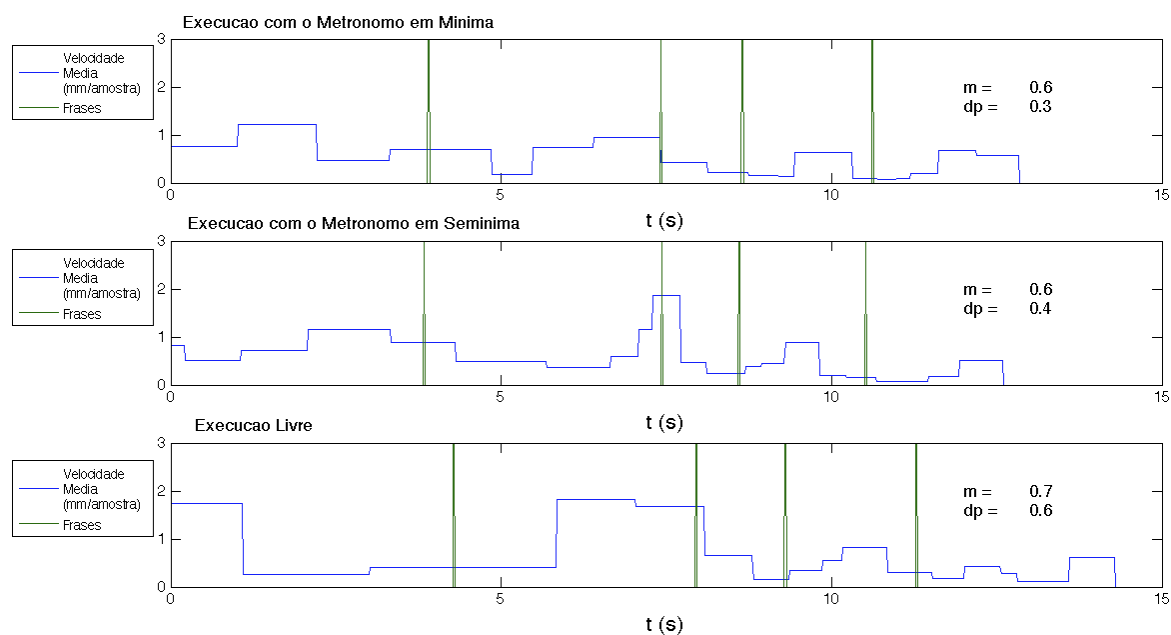


Figura 4.6: Velocidade média em cada segmento de movimento (mm/amostra) com as frases musicais delimitadas por traços verticais.

No canto direito de cada gráfico também foram impressos os valores da média e do desvio padrão globais para a velocidade média dos segmentos, ao longo de cada execução. Todas essas informações dessa seção serão devidamente discutidas mais a frente no texto.

4.3.2 Duração Total de Cada Segmento

De forma exatamente análoga ao que foi feito na subseção anterior para a velocidade média, na Figura 4.7 são ilustradas as curvas de duração total por segmento, dadas em segundos, para as três execuções, sendo os gráficos dispostos também na mesma ordem.

Esses dados estatísticos básicos de magnitude dão uma boa idéia geral de como os movimentos se distribuem e evoluem ao longo das execuções musicais, mas para investigar sua estrutura geométrica e procurar por gestos coerentes é preciso fazer uma análise baseada na geometria de suas trajetórias espaciais, o que será feito na próxima seção.

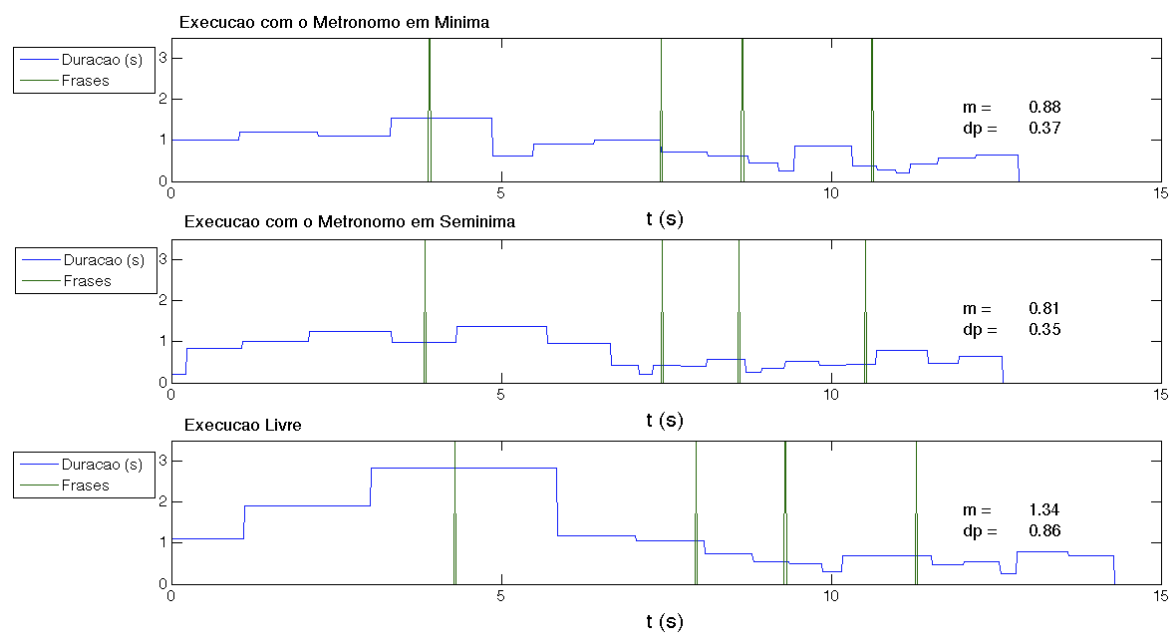


Figura 4.7: Duração total em cada segmento de movimento (s) com as frases musicais delimitadas por traços verticais.

4.4 Análise Geométrica dos Segmentos

Com a segmentação realizada e alguns dados estatísticos esclarecedores levantados, o próximo passo é analisar os segmentos em maior detalhe, procurando por gestos físicos bem definidos dentro da movimentação do músico. Para isso suas trajetórias foram plotadas individualmente e em grupos de dois e três segmentos sucessivos, em um sistema cartesiano tridimensional.

A idéia por trás de um gesto físico, no contexto da execução musical, não é de fácil definição, mas o objetivo principal por agora é encontrar regiões do movimento da cabeça que possuam trajetórias identificáveis como estruturas geométricas definidas, com início meio e fim, possivelmente delimitadas em suas extremidades por mudanças bruscas de direção, curvatura, concavidade, velocidade, ou o próprio tipo de movimentação.

Olhando para os gráficos de velocidade média (Figura 4.6) e duração total (Figura 4.7) apresentados na seção anterior já é possível tirar algumas conclusões que facilitam essa investigação por gestos. Nota-se que nos dois primeiros trechos musicais definidos os segmentos possuem velocidade média e duração maiores que nos três trechos finais, além de uma maior variação desses parâmetros entre as três execuções. Nos três trechos finais as trajetórias dos segmentos são mais lentas, mais curtas e menos definidas, além de seguirem um padrão de evolução mais similar entre as execuções.

Isso também pode ser observado ao se olhar as curvas de estimativa de velocidade da cabeça nos três casos (figuras 4.2 a 4.4).

Isso sugere que o movimento dos trechos finais é menos pertinente ao estudo e mais ruidoso do que o dos trechos iniciais, onde por sua vez parece haver mais informação sobre a intenção expressiva do clarinetista, além de gestos mais bem definidos. Por esse motivo as duas primeiras frases musicais, correspondentes aos quatro primeiros compassos da peça (Figura 4.8), foram escolhidas para uma análise mais detalhada dos gestos nessa etapa. Os resultados obtidos para uma execução com o metrônomo e a execução livre são descritos a seguir.



Figura 4.8: Trecho musical usado na análise geométrica dos segmentos.

4.4.1 Execução com o Metrônomo

Para o caso restrito pelo metrônomo foi escolhida a execução com o metrônomo em mínima, pois ela gerou melhores resultados de comparação. Nessa execução, nas duas frases musicais iniciais, usadas nessa análise, havia inicialmente sete segmentos de movimento definidos pelo critério dos mínimos de velocidade (ver Figura 4.2).

Plotando esses segmentos individualmente e em pares sucessivos, três gestos principais foram encontrados. O primeiro deles composto unicamente pelo segmento de número 2 e os dois últimos compostos pelos pares de segmentos 3-4 e 6-7.

A trajetória de cada um desses três gestos encontrados é ilustrada a seguir nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente. As coordenadas de posição são dadas em milímetros. Um hexagrama sólido vermelho marca o início de cada segmento de movimento original. Abaixo de cada gráfico tridimensional é mostrado um diagrama esquemático das notas presentes na região daquele gesto, dentro de uma partitura em clave de Sol. Esse diagrama foi plotado com o uso do pacote Expan (Campolina et al., 2009), a partir das notas musicais extraídas por ele do vetor de áudio.

4.4.2 Execução Livre

Na execução livre, dentro do mesmo trecho musical (Figura 4.8), cinco segmentos de movimento foram identificados pelo critério dos mínimos de velocidade (ver Figura 4.4).

Plotando esses segmentos em grupos sucessivos de dois e três elementos, dois gestos principais foram encontrados. O primeiro deles composto pelos três primeiros segmentos e o segundo composto pelos dois últimos segmentos. A trajetória de cada um desses dois gestos encontrados também é ilustrada a seguir nas figuras 4.12 e 4.13, assim como descrito na subseção anterior.

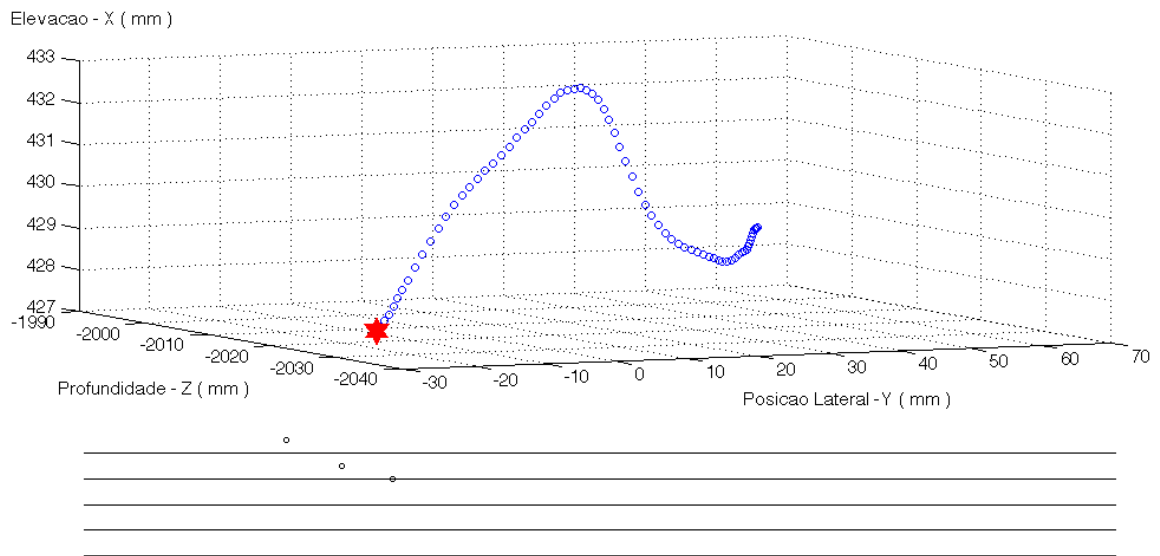


Figura 4.9: Execução com o metrônomo - Trajetória espacial do gesto 1 em 3D(mm).

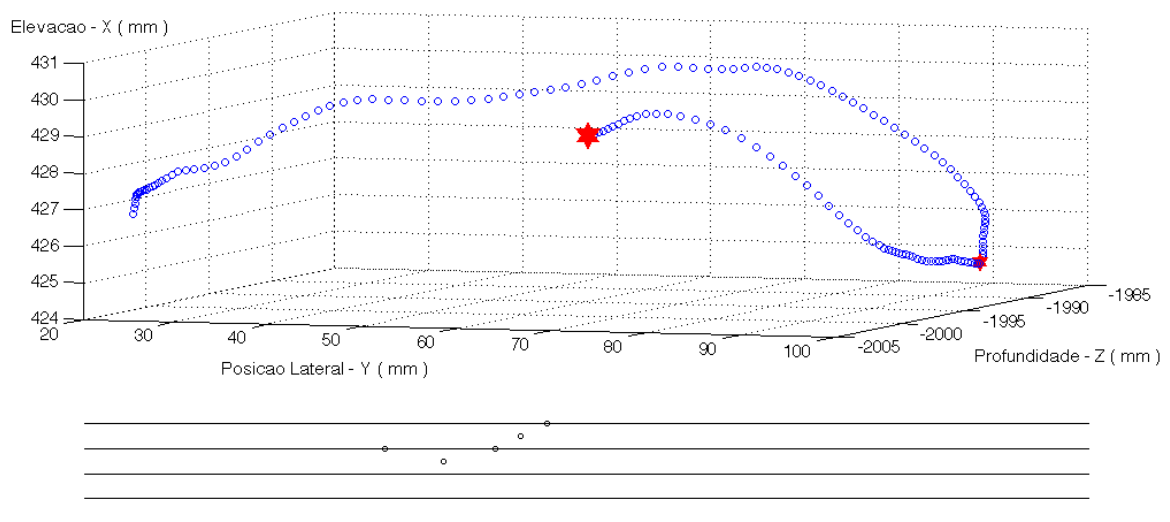


Figura 4.10: Execução com o metrônomo - Trajetória espacial do gesto 2 em 3D(mm).

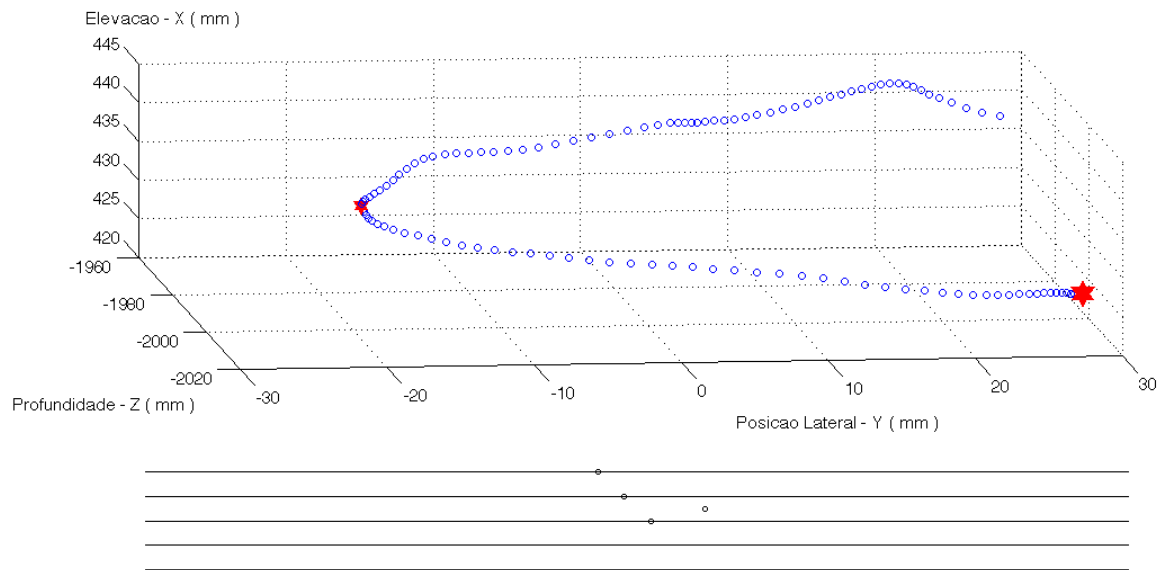


Figura 4.11: Execução com o metrônomo - Trajetória espacial do gesto 3 em 3D(mm).

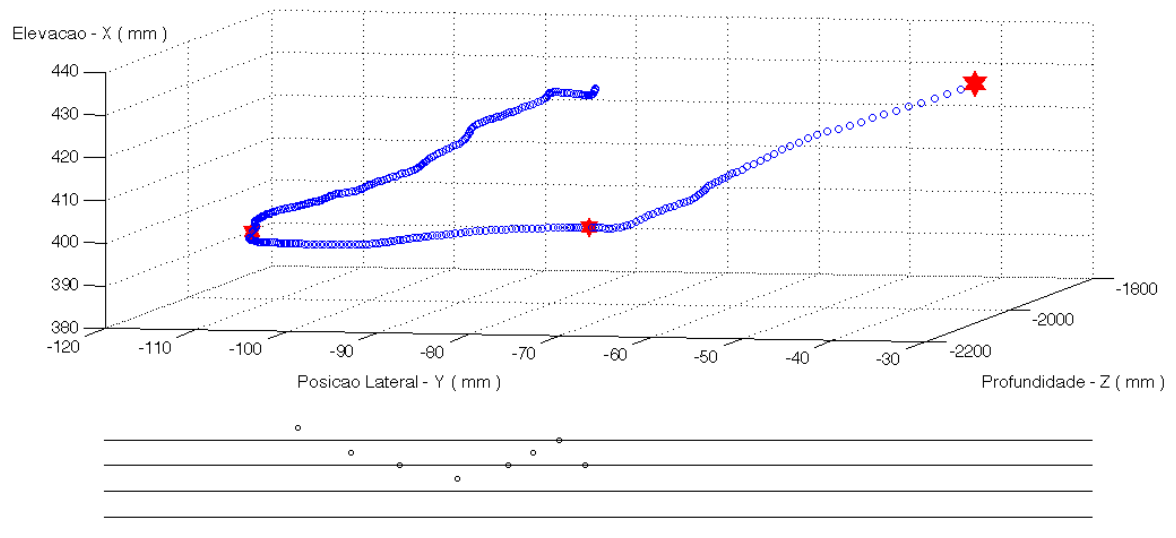


Figura 4.12: Execução livre - Trajetória espacial do gesto 1 em 3D (mm).

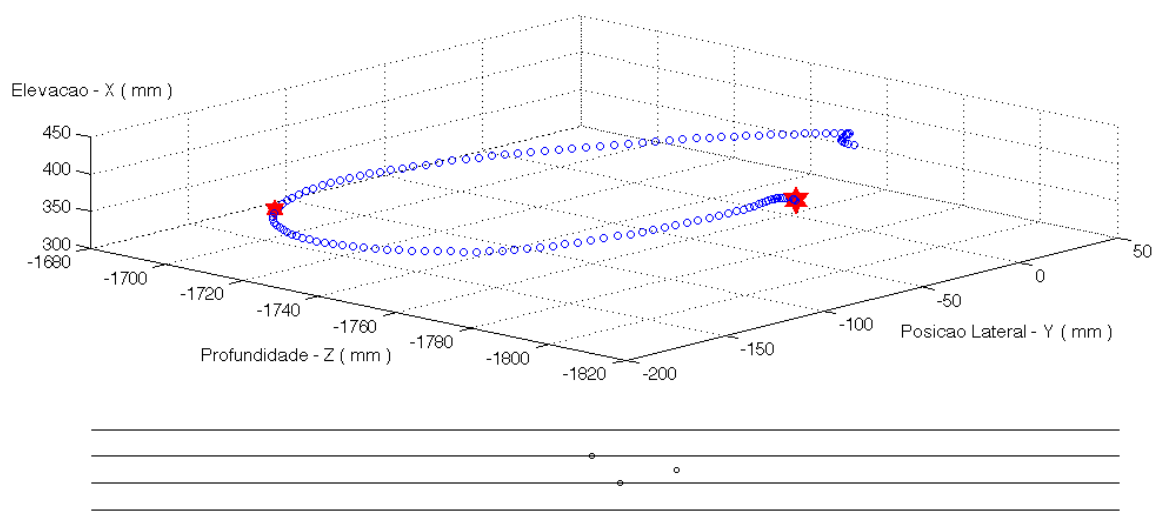


Figura 4.13: Execução livre - Trajetória espacial do gesto 2 em 3D (mm).

4.4.3 Gestos Físicos

Os gestos supra-segmentais, formados pelos grupos de segmentos de movimento definidos nesse capítulo pelo critério dos mínimos de velocidade, apresentaram trajetórias completas e bem definidas. Isso demonstra que o método de segmentação de movimento adotado é de fato eficiente e uma ferramenta importante na definição e análise de gestos físicos no contexto de execuções musicais.

O estabelecimento de uma definição rigorosa para os gestos físicos empregados em execuções musicais é mais complexa e ainda necessita de um certo aprimoramento do método e um estudo mais amplo de casos, mas os passos apresentados até aqui constituem um ponto de partida significativo nesse sentido.

A comparação entre as características e a evolução desses gestos nas execuções, bem como sua relação com a estrutura da peça tocada em cada caso, será abordada em maior detalhe no próximo capítulo, juntamente com outras implicações importantes do estudo dos movimentos da cabeça do clarinetista.

Capítulo 5

Discussão

No capítulo anterior foi descrita uma metodologia de segmentação e análise de movimentos realizados por um clarinetista ao executar uma peça musical. Os resultados desse método, bem como alguns gestos importantes encontrados, foram ilustrados através de gráficos e discutidos brevemente.

Nesse capítulo será elaborada uma discussão conceitual mais completa do método desenvolvido, apontando seus resultados positivos, além das possíveis melhorias a serem implementadas no futuro. Fora isso, os resultados da segmentação e os gestos definidos por ela serão analisados e comparados, tanto entre os casos de estudo, quanto entre os próprios trechos ao longo de cada execução musical. Também serão feitas algumas considerações importantes sobre a própria natureza física dos movimentos e sua relação com aspectos musicais da peça executada.

5.1 Segmentação de Movimento

5.1.1 Metodologia de Segmentação

Conforme dito no capítulo anterior, não existe um único critério objetivo, ou uma unidade básica para segmentar os movimentos do músico, ao contrário do que acontece com os eventos acústicos, que podem ser bem definidos em termos de nota musical, compasso, frase, entre outros. Para a análise de movimento, um dos passos mais complexos e importantes foi justamente a definição desse critério de segmentação.

Após certa investigação dos dados foi definido que a segmentação seria baseada no módulo da velocidade resultante da cabeça e que os pontos de segmentação seriam dados pelos mínimos locais dessa curva de velocidade estimada. A suposição de que os instantes de baixa velocidade correspondiam a pontos importantes de inflexão no

movimento foi de certa forma empírica e parecia bastante justificada ao se observar os dados de posição obtidos no experimento.

A partir da observação dos gráficos resultantes é possível notar que essa suposição se mostrou de fato verdadeira. Olhando primeiramente para os gráficos tridimensionais de trajetória dos gestos (figuras 4.9 a 4.13) nota-se que a estimativa de velocidade foi realística e que grande parte das mudanças de direção, eixo de rotação ou tipo de movimentação coincidiram de forma relativamente precisa com os pontos de segmentação de baixa velocidade definidos, que geraram por sua vez gestos coerentes e bem delimitados quando agrupados sucessivamente.

Olhando para os gráficos da segmentação por mínimos locais de velocidade (figuras 4.2 a 4.4), bem como para os gráficos de velocidade média (Figura 4.6) e duração dos segmentos (Figura 4.7), também é possível notar um padrão de comportamento coerente entre os casos, principalmente entre as duas execuções realizadas com o metrônomo. O número total e a localização dos segmentos encontrados foram bem próximos nesses dois casos e os instantes de segmentação apresentam uma correspondência aproximada com pontos de inflexão da estrutura musical, como transições importantes entre notas ou frases na peça musical.

De acordo com essas observações, o método de segmentação adotado se mostra bastante eficiente para o estudo destes movimentos. Ainda assim, uma abordagem mais complexa, que avance mais no conhecimento sobre o movimento humano se faz necessária. Uma segmentação a partir das características geométricas das trajetórias do movimento poderia, por exemplo, identificar pontos de mudanças de direção ou de plano espacial da trajetória.

No entanto, para realizar esse tipo de segmentação seria necessário analisar múltiplas variáveis espaciais simultaneamente e de forma vetorial, além de supor que os movimentos ocorrem de fato ao longo de planos principais, ou direções bem definidas, o que tornaria o problema bem mais complexo. Dessa forma, pode se dizer que a principal virtude do critério de segmentação adotado nesse estudo foi a simplicidade. Ele foi baseado em apenas uma variável de magnitude bem definida, o módulo da velocidade, e mapeou de forma eficiente os pontos de inflexão necessários, que puderam então ser usados para definir gestos, simplesmente plotando e observando as trajetórias dos movimentos em grupos de segmentos subseqüentes.

A seguir os resultados dessa segmentação de movimento serão analisados, visando estabelecer uma comparação entre os casos estudados e também entre os trechos musicais definidos anteriormente. Mais à frente nesse capítulo uma comparação análoga será feita para os gestos físicos encontrados, definidos a partir desses segmentos.

5.1.2 Comparação entre os Trechos da Peça Musical

As figuras 4.2 a 4.4 mostram que os segmentos são mais bem definidos, com curvas de velocidade resultante mais suaves e com picos e vales facilmente observáveis, nas duas primeiras frases musicais definidas na Figura 4.5 (compassos 118-119 e 120-121). Nas duas execuções com metrônomo dessas frases também é possível observar uma certa periodicidade na curva de velocidade, além de uma relação mais próxima com a métrica da peça musical, ilustrada indiretamente na curva de *pitch*. Observa-se também nessas frases velocidades médias e principalmente tempos de duração total de segmentos mais elevados (figuras 4.6 e 4.7).

Ao contrário disso, as três frases subseqüentes (compassos 122 a 124) apresentam curvas de velocidade muito mais ruidosas, com pequenas amplitudes e sem a presença de picos bem definidos, ou padrões de evolução facilmente observáveis. Além disso, a duração dos segmentos é menor e as velocidades médias são mais baixas e mais dispersas.

Como já foi adiantado no capítulo anterior, essas observações sugerem que movimentos da cabeça do músico nas três frases finais do excerto não trazem muita informação relacionada às suas intenções expressivas, ao contrário do que ocorre nas duas primeiras frases.

A explicação para isso está provavelmente ligada à própria estrutura rítmica e melódica da peça musical ilustrada na Figura 4.5. Os dois primeiros trechos são constituídos por frases mais simples e de notas mais longas (mínimas e semínimas) e mais próximas entre si na escala musical. Já os últimos trechos são constituídos por notas mais curtas (seminimas, quiálteras de colcheias e trinados) e mudanças rítmicas mais bruscas, de execução mais complexa.

Isso sugere que trechos musicais de execução mais difícil inibem de certa forma os movimentos corporais e as intenções expressivas do clarinetista, provavelmente por demandar mais de sua atenção para aspectos técnicos da execução, ou ainda porque os movimentos acompanhantes de maior amplitude atrapalhariam a realização de movimentos necessários para a produção sonora na clarineta. Frases compostas por notas longas e de transições suaves fornecem por outro lado condições ideais para que o músico imponha suas intenções expressivas, através da manipulação das durações e formas das notas, o que se refletiria diretamente nos movimentos acompanhantes, mais relacionados com a intenção expressiva, gerando o padrão de movimentação mais amplo e bem definido descrito no início dessa subseção.

De forma a validar esse modelo de análise e essas relações observadas entre a mo-

vimentação do clarinetista e a estrutura musical da peça executada por ele, também foram utilizadas as execuções de outros clarinetistas estudadas nos experimentos preliminares, através da análise de imagens em 2D. Para isso foi computado o fluxo óptico (*optical flow*) nos vídeos dessas execuções.

O fluxo óptico é calculado através da subtração de quadros subsequentes do vídeo em escala de cinza, que gera uma imagem preta e branca resultante com brilho proporcional à quantidade de movimento ocorrida entre esses dois quadros. Adicionalmente, o valor do brilho em escala de cinza de 8 bits de todos os pixels de cada um desses quadros resultantes é somado, fornecendo um único valor numérico que modela de forma bastante eficiente a magnitude de movimentação entre esses dois instantes da execução (Barron et al., 1994; Camurri et al., 2001, 2004; Barbosa et al., 2008).

A evolução do fluxo óptico nas execuções livres da peça estudada por três diferentes clarinetistas é mostrada na Figura 5.1 juntamente com a delimitação das frases musicais definidas anteriormente para o trecho, de forma a fornecer uma base de comparação para os resultados obtidos com a estimativa de velocidade resultante nos movimentos tridimensionais.

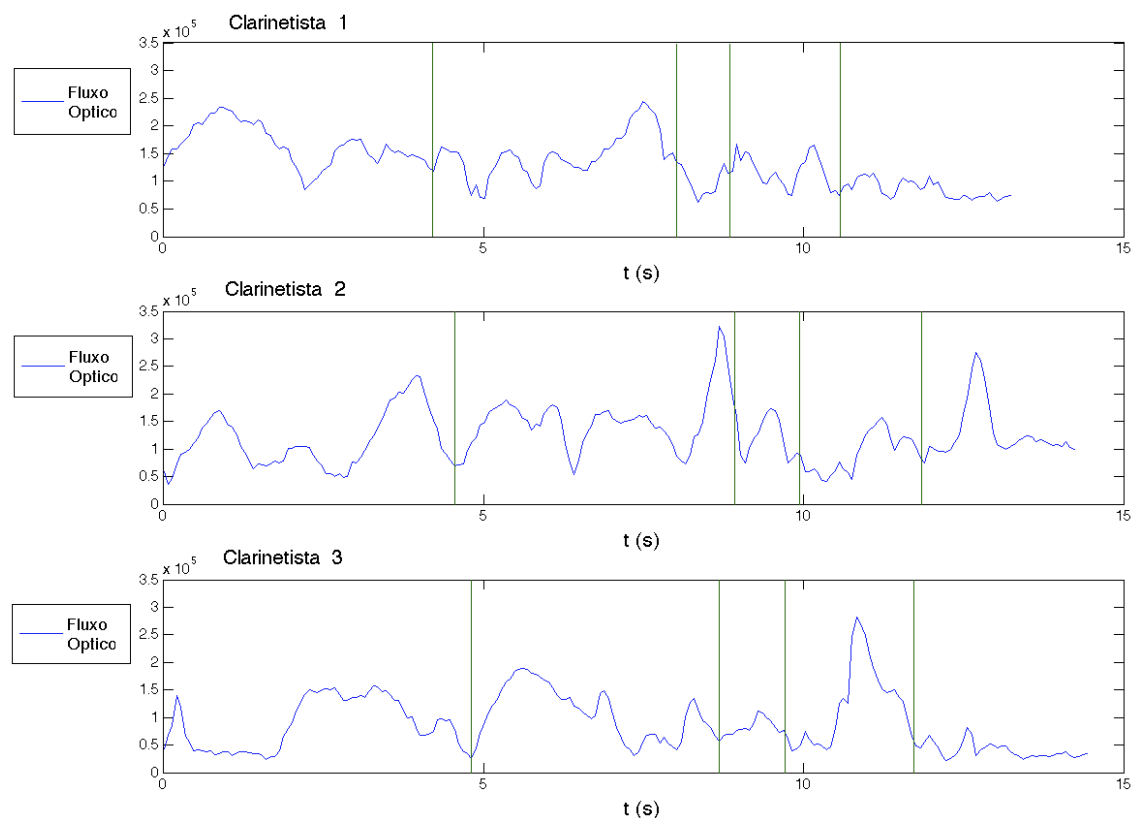


Figura 5.1: Fluxo óptico extraído por análise de imagens em 2D de execuções livres da peça por 3 clarinetistas distintos, com as frases musicais delimitadas em verde.

As curvas de fluxo óptico mostram um padrão de movimentação relativamente similar ao observado nas curvas de velocidade analisadas (figuras 4.2 a 4.4), apesar das diferenças geradas pelas próprias características de cada método de estimação de movimento. O fluxo óptico é uma medida mais global e ruidosa de movimentação, já que leva em conta movimentos pontuais ao longo de todo o corpo, somados em módulo. Ainda assim a observação dessas curvas confirma que nas duas primeiras frases musicais os movimentos dos clarinetistas são mais amplos, mais periódicos, mais suaves e principalmente mais longos do que nas frases finais, com picos e vales mais destacados e espaçados no tempo, assim como ocorreu nas três execuções analisadas com o Optotrak.

O valor médio do fluxo óptico ao longo das duas primeiras frases musicais foi 60% maior do que ao longo das três últimas frases para o clarinetista 1, 30% maior para o clarinetista 3 e 5% maior para o clarinetista 2. Apesar de o segundo clarinetista não apresentar um coeficiente de movimentação significativamente maior nas frases iniciais, também é possível notar pela observação de sua curva de fluxo óptico que seus movimentos nessas frases são mais longos, mais periódicos e mais bem delimitados do que nos trechos finais, onde o valor médio desse parâmetro foi elevado por movimentos mais rápidos e amplos nos finais das frases rápidas, algo que também ocorreu com o terceiro clarinetista.

Essas observações nos movimentos de outros clarinetistas em conformidade com as hipóteses levantadas nessa seção, baseadas nos dados gráficos (figuras 4.2 a 4.4) e estatísticos (figuras 4.6 e 4.7) obtidos pelo método de segmentação de movimentos por mínimos de velocidade, ampliam a validade desse modelo e de seus resultados. Na próxima subseção uma análise semelhante dos segmentos de movimento será conduzida, dessa vez tentando estabelecer uma comparação entre as três execuções estudadas com o Optotrak.

5.1.3 Comparação entre as Execuções

Nesse estudo, de forma a estabelecer um grupo de controle e tentar comparar execuções da mesma peça sob diferentes níveis de intenção expressiva, o músico foi instruído a tocá-la com e sem o uso de um metrônomo. Esse critério foi descrito em detalhe anteriormente e aqui serão comparados os resultados obtidos pela segmentação de movimento em cada um dos casos estudados.

Pelos motivos discutidos na subseção anterior, as principais diferenças observadas entre as execuções livre e com o uso do metrônomo estão presentes nas duas primeiras frases musicais da peça, ilustradas na Figura 4.8. Por isso, as considerações feitas a seguir, a respeito dos segmentos de movimento, são baseadas principalmente na análise desses dois trechos.

A diferença mais marcante observada entre a execução livre e as execuções de controle foi em relação à duração dos segmentos de movimento (Figura 4.7). Na execução livre os segmentos obtidos apresentaram uma duração quase duas vezes maior, em média, quando comparada com as execuções com metrônomo. A execução livre foi mais longa em relação às demais, já que, sem a imposição da marcação do metrônomo, o clarinetista pode variar intencionalmente a duração nominal das notas, em realizações de *rubatos*, *accelerandos* e *ritardandos*. Além disso, a partir do valor do desvio padrão da duração dos segmentos em cada caso, foi possível observar maior uniformidade nas execuções com o metrônomo. Na execução livre o desvio padrão quase três vezes maior indicou uma maior independência dos movimentos do músico em relação à regularidade temporal da pulsação da música, fato também facilmente confirmado pela observação dos gráficos de duração total dos segmentos.

Algo também muito interessante de se notar sobre a duração dos segmentos é que nas execuções com o metrônomo o seu valor médio se aproximou muito do tempo de uma mínima, de acordo com o andamento imposto pelo metrônomo. Para o caso da execução com o metrônomo marcando a mínima a 63 batidas por minuto, o que corresponderia a uma mínima de 952 milissegundos de duração nominal, obtivemos um valor médio de duração dos segmentos de 880 milissegundos. Na execução livre esse valor médio foi cerca de sessenta por cento maior. Isso comprova a forte influência do metrônomo nas execuções de controle.

Outro fator que ilustra muito bem a eficiência do metrônomo em restringir os movimentos expressivos do clarinetista é algo que já foi citado brevemente na subseção anterior. Existe uma clara tendência de periodicidade nas curvas de módulo de velocidade nas execuções de controle, especialmente na execução com o metrônomo em mínima (Figura 4.2), onde os vales da curva se aproximam bastante dos instantes da batida do metrônomo, na maioria dos casos, dentro das duas primeiras frases da música.

Por último, é possível notar também algumas diferenças entre os casos, em relação à velocidade nos segmentos. Essas diferenças não foram tão significativas quanto as citadas anteriormente, mas seguem de certa forma um padrão similar de comportamento.

A velocidade média dentro dos segmentos (Figura 4.6) apresentou valores similares na três execuções, em média, porém o seu desvio padrão foi cerca de cinquenta por cento maior na execução livre, assim como ocorreu para os valores de duração total. Isso é mais uma comprovação do maior grau de independência encontrada nos movimentos para a execução livre, que também apresentou picos mais elevados e destacados na sua curva de velocidade instantânea (Figura 4.4).

Finalmente, outro comportamento interessante observado nos gráficos de velocidade média dos segmentos é o padrão de evolução vertical bastante similar existente nas três execuções, para os três últimos trechos musicais. Esse fato é mais uma prova da baixa presença de informação expressiva nessas frases finais da peça.

5.2 Gestos Físicos

Na seção anterior o método e os resultados da segmentação dos movimentos da cabeça do clarinetista a partir da sua curva de velocidade resultante foram discutidos e comparados. Nessa seção uma discussão similar será elaborada, dessa vez a respeito dos gestos físicos definidos a partir dessa segmentação.

Primeiramente algumas considerações básicas serão feitas acerca da própria natureza física dos gestos, de forma a estabelecer uma forma correta de detectá-los e defini-los. Ao final, os gestos encontrados serão analisados e comparados entre as execuções e trechos da peça.

5.2.1 Natureza dos Gestos

Para conseguir definir os gestos executados pelo clarinetista de forma coerente, primeiramente é importante observá-los e tentar fazer algumas suposições a seu respeito, no contexto desse estudo.

Na coleta de dados as execuções foram realizadas com o músico sentado em uma cadeira e o objeto de interesse foi o movimento de sua cabeça. Partindo dessas condições uma suposição intuitiva, porém muito válida, pode ser feita. O músico não pode movimentar sua cabeça indefinidamente em uma direção, sem perder o equilíbrio e conseqüentemente cair da cadeira. Ao se sentar na cadeira em repouso, ele naturalmente busca uma posição estável, ou um ponto de equilíbrio.

Por esse motivo, é bastante razoável supor que os movimentos da cabeça do clarinetista tenham um comportamento de ida e volta, a partir de, em direção a, ou em torno de um ponto estável de equilíbrio (McNeill, 2007). Também é de se esperar que

ao se afastar muito de sua posição de equilíbrio a habilidade do músico em sustentar o movimento naquela direção diminua, gerando uma conseqüente queda na velocidade resultante, de forma a reverter o sentido de sua trajetória, ou então uma mudança mais brusca na sua direção.

Essas suposições foram importantes por dois motivos. A segunda delas ajudou na definição do critério de segmentação do movimento, a partir dos mínimos de velocidade. Já a primeira, prevê que os gestos completos mais importantes terão provavelmente trajetórias aproximadamente circulares, elípticas, ou que descrevem curvas formadas por partes dessas figuras geométricas, com um ponto de retorno perceptível.

Devido à segmentação por mínimos de velocidade e à suposição dos movimentos de ida e volta, também é de se esperar que ocorram muitos gestos parcialmente ou aproximadamente elípticos, constituídos de pares de segmentos do movimento, um representando a trajetória de ida e outro a de retorno. Por esse motivo, os gestos foram investigados através da plotagem e observação tridimensional da trajetória dos segmentos de movimento obtidos, em grupos sucessivos de dois e até três elementos.

Outra suposição muito importante a respeito da trajetória dos gestos é baseada no efeito giroscópico, ou na conservação do momento angular. Devido a esse princípio, o mesmo responsável por manter uma bicicleta em movimento, sem que ela caia para um dos lados, trajetórias de movimentos circulares tendem a permanecerem no mesmo plano, ou em torno de um eixo bem definido de rotação, já que uma força extra seria necessária para abandonar esse eixo de rotação. Com isso também é de se esperar que a maioria dos gestos significativos se desenvolvam aproximadamente em torno de um plano principal de movimentação.

A partir dos gráficos tridimensionais de trajetória dos segmentos de movimento foi possível confirmar estas suposições na grande maioria dos casos, o que facilitou a definição de gestos bem definidos, que serão descritos a seguir para os dois casos de estudo.

De acordo com os três primeiros gráficos tridimensionais do capítulo anterior, dois dos três gestos definidos na execução com o metrônomo (figuras 4.10 e 4.11) foram constituídos por pares de segmentos de movimento, representando caminhos completos de ida e volta e segmentados precisamente no ponto de retorno. Já o gesto da Figura 4.9 foi constituído apenas por um segmento de movimento, representando um arco que começa e termina aproximadamente na mesma posição de elevação vertical (coordenada x). Além disso, os dois primeiros gestos ocorreram aproximadamente ao longo de um plano vertical, enquanto que o último ao longo de um plano oblíquo.

Já na execução livre, de acordo com os outros dois gráficos tridimensionais, um dos dois gestos definidos (Figura 4.13) também foi constituído por um par de segmentos de movimento, representando um caminho completo de ida e volta, parcialmente elíptico e quase circular, ao longo de um plano horizontal, segmentado no ponto de retorno. O outro gesto (Figura 4.12) foi formado por três segmentos de movimento, sendo uma parte dele constituída de um arco de ida e volta aproximadamente elíptico, definido também por um par de segmentos, unidos exatamente no ponto de retorno. A parte desse gesto formada pelo arco de ida e volta também se deu aproximadamente ao longo de um plano oblíquo.

De forma a ilustrar essa tendência dos gestos de ocorrerem ao longo de planos principais suas trajetórias foram transformadas para o sistema esférico de coordenadas. Nesse sistema de coordenadas a posição de cada ponto no espaço é definida por um ângulo Teta de azimute, um ângulo Fi de elevação e um raio. Cada ângulo azimutal define um plano vertical no espaço através da origem do sistema de coordenadas. Dessa forma, os dois gestos verticais encontrados na execução com o metrônomo (figuras 4.9 e 4.10) foram trasladados para a origem e convertidos para coordenadas esféricas e a evolução do ângulo azimutal, dado em graus, ao longo de suas trajetórias foi plotada em cada caso. Esses gráficos são mostrados na Figura 5.2 juntamente com o valor do desvio padrão do ângulo azimutal em cada caso, usado para quantificar o desvio das trajetórias em relação ao plano principal de movimentação e exemplificar esse comportamento observado.

A observação desses gráficos mostra como realmente existe um alto grau de planaridade na trajetória dos gestos, já que o ângulo azimutal se mantém quase constante ao longo das trajetórias em cada caso, com desvios padrões pouco superiores a 1 grau, e amplitudes máximas de desvio angular inferiores a 3 graus nesses gestos, caracterizando planos verticais muito bem definidos.

Todas essas observações mostram que os gestos obtidos foram de fato significativos e sustentam fortemente as suposições feitas anteriormente sobre sua natureza geométrica e temporal. Até aqui esses gestos foram analisados individualmente. A seguir eles serão analisados em conjunto, dentro do contexto musical e então comparados entre os dois casos estudados.

5.2.2 Comparação entre os Trechos da Peça Musical

Como já foi dito anteriormente nesse texto, a movimentação presente nas três últimas frases da peça musical se mostrou muito limitada, ruidosa e pouco informativa. Em

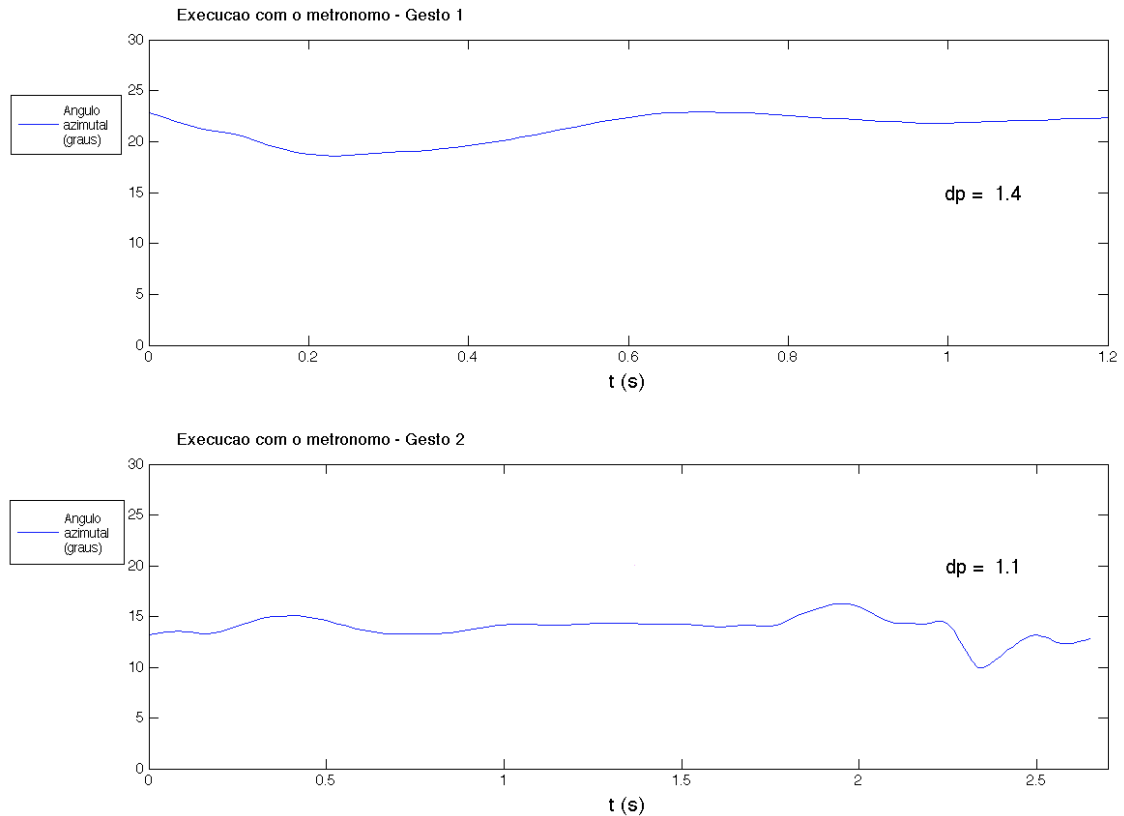


Figura 5.2: Evolução do ângulo azimutal esférico (graus) ao longo das trajetórias dos gestos verticais na execução com o metrônomo e seus valores de desvio padrão.

conseqüência disso, não foram encontrados gestos importantes ou bem definidos nesses trechos da música. A únicas exceções foram os gestos finais de cada execução, que apresentaram trajetórias mais extensas e bem definidas. Ainda assim, os parâmetros estatísticos e geométricos analisados nesses gestos finais não revelaram diferenças entre as execuções e nem permitiram até então a extração de conclusões que pudessem auxiliar nesse estudo e por isso, esses gestos não foram incluídos nos resultados.

A discussão acerca da natureza geométrica dos gestos do músico se concentrou então nas duas primeiras frases da peça, definidas na Figura 4.5, às quais pertencem todos os gestos ilustrados e analisados até aqui. Esses gestos sim apresentaram características bem definidas e em conformidade com a maioria dos resultados esperados, de acordo com o descrito na subseção anterior.

Mesmo assim, o comportamento desses gestos ao longo dessas duas frases musicais se mostrou similar e nenhuma diferença explícita sugeriu a necessidade de realizar uma comparação mais detalhada entre elas, até mesmo porque o número de gestos analisados é pequeno em cada caso e portanto insuficiente para definir um padrão significativo de evolução, dentro de cada um desses trechos da música.

Dessa forma a análise comparativa dos gestos foi realizada entre a execução livre e a realizada com o metrônomo, método pelo qual resultados mais pertinentes foram encontrados. Essa comparação será descrita a seguir, levando em conta tanto os aspectos espaciais e temporais dos gestos em si, quanto a sua relação com a peça musical executada.

5.2.3 Comparação entre as Execuções

Com os movimentos da cabeça do clarinetista devidamente segmentados e os gestos físicos resultantes definidos e analisados é possível então iniciar a última etapa dessa discussão. Aqui o objetivo é justamente comparar os gestos obtidos em cada caso de estudo, visando investigar o que diferencia uma execução livre e mais expressiva do músico da execução de controle, no que diz respeito aos seus movimentos corporais.

Esse é um problema subjetivo e bastante complexo, que requer ainda mais experimentação e estudo e portanto os resultados apontados aqui são ainda preliminares. Mesmo assim, as informações conseguidas até então se mostram consistentes e objetivas e apontam uma direção clara a ser seguida nesse tipo de estudo, que pode resultar em dados ainda mais conclusivos, se ele for continuado e ampliado.

A diferença mais notável que se percebe inicialmente entre os gestos nas duas execuções é em relação à sua duração e extensão. Na execução livre foi encontrado um número de gestos menor e esses gestos foram mais longos e extensos.

Considerando o deslocamento total em cada gesto, na execução de controle os três gestos (figuras 4.9 a 4.11) apresentaram deslocamentos de 86, 98 e 96 milímetros, respectivamente, enquanto que na execução livre os dois gestos (figuras 4.12 e 4.13) apresentaram deslocamentos de 236 e 237 milímetros, respectivamente.

Na execução de controle os dois primeiros gestos tiveram durações de 1,2 e 2,6 segundos, respectivamente, ficando contidos aproximadamente dentro da primeira frase musical da peça. Já na execução livre, apenas o primeiro gesto teve duração de 6 segundos, compreendendo toda a primeira e ainda cerca de metade da segunda frase da música.

Essa diferença de duração e extensão nos gestos entre as execuções tem uma relação interessante com a estrutura harmônica e melódica do trecho da música analisado, constituído pelas duas primeiras frases da peça (compassos 118 a 121). Para entendê-la, primeiro é preciso fazer uma breve discussão sobre esse trecho da música. Como destacado na Figura 5.3, ambas as frases terminam com progressões harmônicas de resolução.

The image shows a musical score for three instruments: Clarineta, Violinos I e II Viola, and Violoncello. The score is in common time (C) and consists of four measures, numbered 118, 119, 120, and 121. The Clarineta part has a melodic line with a slur over measures 118-119 and another slur over measures 120-121. The Violinos I e II Viola and Violoncello parts provide harmonic support with chords. Red boxes highlight the final chords of measures 119 and 121. A green vertical line is placed between measures 119 and 120.

Figura 5.3: Progressões harmônicas de resolução ao final das duas primeiras frases da peça musical.

Essa progressão harmônica de resolução é mais fraca, da dominante para a tônica relativa, no final da primeira frase (compasso 119), e mais forte, dominante-tônica, no final da segunda frase (compasso 121).¹ Além disso, a segunda frase é composta por notas mais rápidas, o que lhe confere uma maior sensação de direção rumo à essa resolução mais forte.

Na execução com o metrônomo os gestos 1 e 2 são formados respectivamente pelos segmentos de movimento 2 e 3-4, e são portanto diretamente conectados, como é mostrado na Figura 5.4. Esses dois primeiros gestos representam uma movimentação do músico em direção à primeira resolução harmônica, no final da primeira frase da música. Passado esse ponto, o quinto segmento de movimento não pôde ser caracterizado pelos critérios anteriormente descritos e, portanto, não se integrou a nenhum gesto, desconectando assim os gestos 1 e 2 do gesto 3, este formado pelos segmentos 6-7. O gesto 3, por sua vez, representa uma movimentação do músico em direção à segunda resolução harmônica, no final da segunda frase da música.

Já na execução livre, os gestos 1 e 2 são formados respectivamente pelos segmentos de movimento 1-2-3 e 4-5, e estão diretamente conectados, como é mostrado na Figura 5.5. Os dois gestos nesse caso representam uma única e extensa movimentação do músico, com uma intenção mais marcante em direção à segunda e mais forte resolução harmônica, no final da segunda frase da música.

¹A parte das cordas foi transposta para Dó Maior para facilitar a leitura conjunta com a parte de clarineta em Lá, como originalmente escrita.

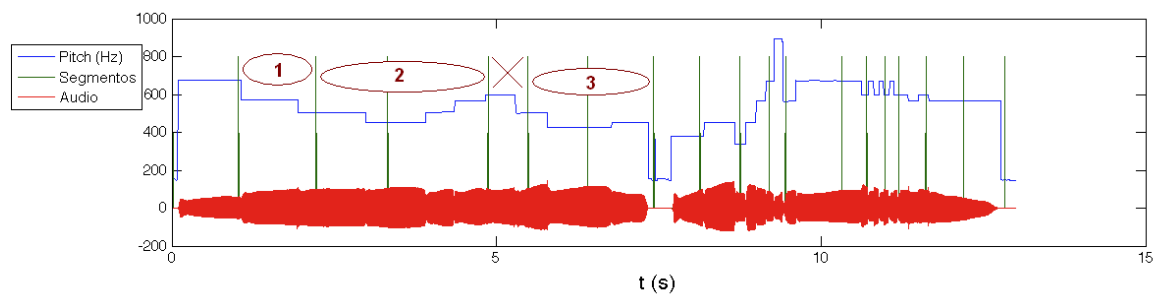


Figura 5.4: Localização e agrupamento dos gestos na execução com o metrônomo.

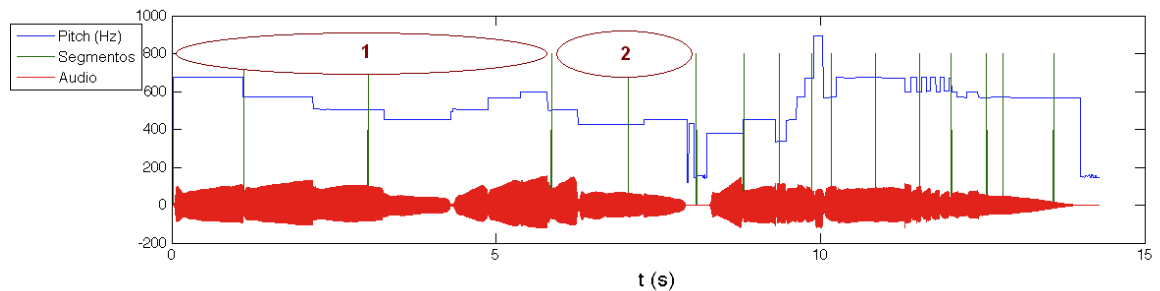


Figura 5.5: Localização e agrupamento dos gestos na execução livre.

Isso pode ser interpretado da seguinte forma. Na execução livre o clarinetista enxerga claramente o ponto de resolução harmônica mais importante ao executar as duas primeiras frases da música. Esse ponto está mais distante, ao final da segunda frase e por isso, ele executa movimentos mais longos e extensos, a partir de uma imagem mental que engloba um trecho maior da música a cada momento, com uma percepção mais clara e instintiva de seus aspectos expressivos.

Com a presença do metrônomo como um elemento de controle externo, o músico passa a ter uma visão mais local ao executar a peça, dando ênfase também ao primeiro ponto de resolução harmônica, mais fraca, no final da primeira frase da música. A forte influência exercida pelo metrônomo torna a duração dos movimentos mais curta e limita também a sua extensão espacial, correlacionando os gestos físicos à métrica imposta por ele e inibindo a movimentação e as intenções mais instintivas do clarinetista.

Isso mostra como o músico em uma execução livre consegue ter uma visão mais ampla e abrangente dentro da peça, concentrando seus esforços em planejar as inflexões expressivas que realmente lhe parecem necessárias, com uma maior antecipação. Na execução controlada o metrônomo domina o foco do intérprete, que preocupado em seguí-lo precisamente, só consegue ter uma visão de curto prazo das notas seguintes,

manipulando localmente as inflexões, de acordo com a métrica sugerida a ele. Essa é uma importante conclusão sobre as intenções expressivas e corporais do clarinetista, que também comprova a eficiente ação restritiva do metrônomo sobre as mesmas.

Essa comparação dos gestos físicos definidos, entre os casos livre e de controle, bem como essa importante observação acerca da sua relação com a estrutura harmônica e melódica do trecho musical analisado, encerra essa discussão mais detalhada sobre os resultados obtidos nesse estudo. Uma conclusão final e mais generalizada a respeito dos objetivos básicos e das realizações apresentadas ao longo de toda essa pesquisa será elaborada no próximo capítulo.

Capítulo 6

Conclusão

Este estudo possuía inicialmente dois objetivos primários. O primeiro deles, de caráter operacional, era desenvolver uma metodologia objetiva de definir, analisar e classificar gestos físicos empregados por um clarinetista ao executar uma peça musical. O segundo deles, de caráter mais conceitual, era justamente aplicar tal metodologia de análise a casos de interesse, de forma a investigar evidências das intenções expressivas do músico, presentes em seus movimentos ou gestos acompanhantes, como elas se apresentam, e por fim, como elas se relacionam com aspectos musicais da execução.

O primeiro dos objetivos visava contornar o alto grau de subjetividade e variabilidade encontrado na análise dos gestos físicos em execuções musicais e era um pré-requisito fundamental para a obtenção de resultados e conclusões posteriores consistentes. Ele foi atingido de forma bem consistente, através do estudo de aspectos físicos, temporais, geométricos, fisiológicos e artísticos desses movimentos e das condições específicas encontradas no experimento utilizado nessa pesquisa.

A eficácia desse método se reflete na proposição de um experimento adequado para a coleta de dados e no desenvolvimento de uma ferramenta computacional eficiente para a sua análise. Ela pode ser comprovada pela observação dos resultados obtidos com a segmentação e agrupamento dos movimentos do músico e também através da própria discussão conduzida posteriormente a respeito da natureza dos gestos físicos do clarinetista. Também vale ressaltar que essa eficácia se tornou possível através do uso de um equipamento de rastreamento de movimento preciso e adequado e do estabelecimento de um caso de controle válido e objetivo com o uso do metrônomo.

O segundo objetivo citado nesse capítulo era de fato a meta principal e final dessa pesquisa e se baseou na análise dos gestos físicos definidos e na comparação entre os casos e trechos musicais estudados, possibilitadas pelo uso da metodologia descrita anteriormente.

Com base na discussão comparativa entre os casos conduzida na última subseção do capítulo anterior, bem como nos outros resultados e conclusões presentes ao longo dos dois últimos capítulos, é possível afirmar que essa meta foi atingida em muitos sentidos, mesmo que não ainda de forma tão ampla e definitiva. Vários aspectos importantes a respeito das intenções expressivas do clarinetista foram detectados em seus gestos acompanhantes com a cabeça e um padrão de evolução espacial e temporal claro e distinto em cada caso foi observado e analisado, tanto de forma estatística quanto geométrica. Além disso, esses padrões observados foram comparados e explicados, dentro do contexto musical da peça executada, estabelecendo uma relação preliminar de grande valia entre as informações gestuais e musicais nas execuções.

Mesmo assim, como já foi dito anteriormente nesse texto, analisar e comparar informações gestuais é um problema altamente subjetivo e complexo e poucas referências sólidas existem até então nesse sentido, especialmente no contexto de execuções musicais. Cada músico, instrumento e peça musical possui características muito próprias e variáveis a cada execução. Isso torna o estudo difícil e de certa forma pontual, o que levou a uma análise inicial de um caso mais simples, com apenas um músico, uma peça e uma região corporal de interesse.

Possíveis evoluções no método seriam realizar uma segmentação de movimento mais focada nos próprios aspectos geométricos e vetoriais dos gestos, além de utilizar, de forma integrada, uma análise mais completa dos parâmetros musicais no vetor de áudio, o que já vem sendo feito, levando em conta as durações e formas das notas, curvas de energia e fluxo espectral nas suas transições, entre outros dados que também carregam muita informação sobre as intenções expressivas do músico de forma mais direta e mensurável. O conjunto de casos de estudo também deve ser ampliado, com múltiplos pontos corporais, intérpretes e peças musicais. Algoritmos de *time warping* também devem ser utilizados, de forma a estabelecer uma sincronização entre diferentes execuções da mesma peça, possibilitando uma comparação eficiente entre vários intérpretes e estilos de interpretação.

Essa é uma área de estudo bastante nova e uma das grandes virtudes dessa pesquisa foi mostrar que a análise dos movimentos corporais dos músicos é de fato muito pertinente e deve ser continuada. Até aqui foi mostrado que existe uma forma objetiva de lidar com os gestos físicos e que eles carregam sim muita informação importante a respeito das intenções expressivas do intérprete.

Situando essa pesquisa no contexto dos estudos conduzidos até então nessa área, algumas considerações podem ser feitas. Conclusões anteriores foram confirmadas por alguns dos resultados obtidos, como a comprovação quantitativa de que trechos

ou peças musicais mais lentas e de menor complexidade de execução possibilitam a ocorrência de gestos acompanhantes mais amplos e extensos pelos clarinetistas (Dahl and Friberg, 2007; Wanderley et al., 2005); a observação da característica de ida e retorno na trajetória dos gestos físicos do clarinetista (McNeill, 2007); ou ainda de que a velocidade resultante de um corpo rígido é de fato um parâmetro eficiente para analisar a sua movimentação no espaço (Camurri et al., 2001, 2004; Fenza et al., 2005). Por outro lado, outras conclusões inéditas foram obtidas, como a demonstração quantitativa da planaridade de grande parte dos gestos físicos do clarinetista com sua cabeça; a obtenção de evidências e características objetivas da influência restritiva do metrônomo nas execuções musicais do clarinetista e em seus gestos acompanhantes; o estabelecimento de uma relação entre a localização e o agrupamento dos gestos físicos nas diferentes execuções musicais pelo clarinetista e as características estruturais da peça tocada por ele; e a aplicação do módulo da velocidade resultante de um corpo na definição de um modelo unidimensional concreto de segmentação de suas trajetórias tridimensionais no tempo e no espaço.

Concluindo, pode-se dizer que esta pesquisa representa um ponto de partida importante e um caminho objetivo a ser seguido, no contexto da análise de movimentos corporais em execuções musicais, gerando uma metodologia prática e eficiente para lidar com gestos físicos, além de resultados e conclusões coerentes e importantes a respeito das intenções expressivas do instrumentista, embasadas em aspectos musicais e gestuais das execuções estudadas.

Um estudo mais longo e complexo, baseado nas definições estabelecidas aqui, mas que utiliza um maior número de dados na definição dos gestos e um conjunto mais amplo de pontos corporais, músicos e peças musicais estudadas, além de uma análise mais completa e integrada do áudio das execuções, pode gerar resultados mais conclusivos na definição de parâmetros de intenção expressiva em uma execução musical. Por isso é de se esperar que essa área de pesquisa ganhe força no futuro, produzindo ainda muitos frutos.

Bibliografia

- A. Barbosa, H. Yehia, and E. Vatikiotis-Bateson. Temporal characterization of auditory-visual coupling in speech. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 1:1–14, 2008.
- J. L. Barron, D. J. Fleet, and S. S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*, 12:43–77, 1994.
- T. Campolina, M. Loureiro, and D. Mota. Expan: a tool for musical expressiveness analysis. *Proceedings of the 2nd International Conference of Students of Systematic Musicology*, pages 24–27, 2009.
- A. Camurri, G. De Poli, M. Leman, and G. Volpe. A multi-layered conceptual framework for expressive gesture applications. *Proceedings Intl EU-TMR MOSART Workshop*, 2001.
- A. Camurri, B. Mazzarino, M. Ricchetti, R. Timmers, and G. Volpe. Multimodal analysis of expressive gesture in music and dance performances. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2004.
- S. Dahl and A. Friberg. Visual perception of expressiveness in musicians’ body movements. *Music Perception*, 24(5):433–454, 2007.
- J. W. Davidson. What type of information is conveyed in the body movements of solo musician performers? *Journal of Human Movement Studies*, 6:279–301, 1994.
- J.W. Davidson. Visual perception and performance manner in the movements of solo musicians. *Psychology of Music*, 21:103–113, 1993.
- J.W. Davidson. What does the visual information contained in music performances offer the observer? some preliminary thoughts. In R. Steinberg, editor, *Music and the mind machine: Psychophysiology and psychopathology of the sense of music*, pages 105–114. Heidelberg: Springer., 1995.

- G. De Poli, S. Canazza, C. Drioli, A. Rodà, and A. Vidolin. Modeling and control of expressiveness in music performance. *Proceedings of the IEEE*, 92(4):686–701, 2004.
- D. Fenza, L. Mion, S. Canazza, and A. Rodà. Physical movement and musical gestures: A multilevel mapping strategy. *Proceedings of Sound and Music Computing*, 2005.
- A. Gabrielsson. Expressive intention and performance. In Steiner, editor, *Music, Mind and Machine*, pages 35–47. New York: Springer, 1995.
- A. Gabrielsson. Music performance research at the millenium. *Psychology of Music*, 31:221–272, 2003.
- P. Juslin. Emotional communication in music performance: A functionalist perspective and some data. *Music Perception*, 14:383–418, 1997.
- P. Juslin. Cue utilization in communication of emotion in music performance: relating performance to perception. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 26:1797–1813, 2000.
- M. Loureiro, R. Borges, T. Campolina, T. Magalhães, D. Mota, and H. de Paula. Extração de conteúdo musical em sinais de áudio para a análise de expressividade. *Revista da Sociedade Brasileira de Acústica, Acústica e Vibrações*, 38:1–6, 2007.
- E. Maestre and E. Gómez. Automatic characterization of dynamics and articulation of expressive monophonic recordings. *Audio Engineering Society 118th Convention Paper*, page 8, 2005.
- D. McNeill. *Gesture and Thought*. University Of Chicago Press, 2007.
- L. Naveda and M. Leman. Representation of samba dance gestures, using a multimodal analysis approach. *5th International Conference on Enactive Interfaces*, pages 68–74, 2008.
- B. Vines, M. Wanderley, R. Nuzzo, D. Levitin, and C. Krumhansl. Performance gestures of musicians: What structural and emotional information do they convey? *5th International Workshop on Gesture and Sign Language-based Human-Computer Interaction*, 2003.

M. Wanderley, B. Vines, N. Middleton, C. McKay, and W. Hatch. The musical significance of clarinetists' ancillary gestures: An exploration of the field. *Journal of New Music Research*, 34(1):97–113, 2005.