

Musicologia computacional aplicada à análise dos corais de Bach

Pedro Kröger, Alexandre Passos, Marcos Sampaio, Givaldo de Cidra, Nathanael de Souza Ourives, Emerson Soares dos Anjos,

Wallace Silva dos Santos

Genos—Grupo de Pesquisa em Computação Musical, UFBA

pedro.kroger@gmail.com

www.genos.mus.br

Sumário:

Musicologia computacional é definida a grosso modo como o estudo de música com a auxílio de programas de computador. Nesse artigo estudamos quintas e oitavas consecutivas, cadências, âmbito de vozes, acordes de sexta aumentada, cruzamento de vozes, resolução de sétimas, e cadências finais em 366 corais de Bach. Essa análise é feita completamente com auxílio de computador, o que permite o processamento de muito mais corais em menos tempo que se tivesse sido feita manualmente. Os dados iniciais obtidos são interessantes, e espera-se que a implementação de análise funcional no sistema irá resolver alguns dos problemas no processo de análise.

Palavras-Chave: musicologia computacional, análise musical automática, computação musical, sonologia

Introdução

Musicologia computacional é definida a grosso modo como o estudo de música com a auxílio de programas de computador. Existem inúmeros exemplos na literatura, como o uso de vida artificial e algoritmos evolutivos para estudar a evolução de ritmos e sistemas emocionais (Coutinho 2005), o uso de técnicas de mineração de dados e aprendizado de máquina (Hartmann et al. 2007), e o reconhecimento de estilos musicais (Kranenburg 2004). Alguns artigos discutem o papel da computação na musicologia e seu futuro (Kugel 1992; Honing 2004; Cook 2005).

A análise musical com auxílio do computador é importante porque pode ajudar a identificar elementos musicais em um grande *corpus* musical em um tempo curto. A musicologia computacional pode ajudar a responder perguntas de pesquisa como quais as cadências mais comuns em todas as obras de Beethoven e quais as diferenças de âmbito orquestral entre todas as obras de Beethoven, Wagner e R. Strauss. Para fazer a análise é necessário que as obras a serem estudadas estejam em um formato simbólico como MIDI, Humdrum (Huron 1999), MuseData (Selfridge-Field 1994), ou Lilypond (Nienhuys e Nieuwenhuizen 2008).

Neste trabalho apresentamos o estudo de âmbitos, cruzamento de vozes, quintas e oitavas consecutivas, acordes de sexta aumentada, resoluções de sétimas, e estudo das cadências finais em 366 dos 371 corais de Bach na edição de Riemenschneider (Riemenschneider 1941). Cinco corais ficaram de fora por problemas na conversão de MIDI para Lilypond. (Kostka e Payne 2000) foi usado como livro-texto base para comparações de procedimentos musicais usuais em classes de harmonia e neste artigo é referido no singular por KP.

Metodologia

Todo o trabalho descrito neste artigo foi desenvolvido usando o sistema *Rameau*¹ para análise automática de harmonia e extração de informação musical. *Rameau* é um framework para implementação de algoritmos de análise harmônica de partituras simbólicas. As partituras são guardadas em arquivos no formato Lilypond (Nienhuys e Nieuwenhuizen 2008), que permite diferenciação de notas enarmônicas e geração de partituras bem tipografadas. As notas são extraídas das partituras e apresentadas a uma rede neural, que associa cada conjunto de notas a um acorde. Para coletar os dados usados neste artigo *Rameau* foi estendido para realizar operações comuns de musicologia como detecção de cruzamentos, quintas ou oitavas consecutivas, cadências frequentes, etc.

Todos esses métodos de análise operam primeiro com a divisão da música em **segmentos mínimos**, onde cada segmento mínimo é um conjunto de notas que soam simultaneamente. Qualquer alteração nesse conjunto—uma nota iniciando ou terminando, por exemplo—cria outro segmento mínimo. Para detectar a resolução das sétimas, por exemplo, *Rameau* primeiro procura todos os segmentos mínimos no coral desejado que representam acordes com sétima e encontra, nesses segmentos, as notas que são as sétimas dos acordes. Feito isso, *Rameau* olha para o segmento imediatamente anterior para ver como essas notas foram preparadas, olha para o segmento posterior para ver se elas resolvem imediatamente, e formata os dados encontrados.

Além disso *Rameau* possui vários outros algoritmos para análise harmônica, como o descrito em (Pardo e Birmingham 2000), outras redes neurais e classificadores de árvores de decisão e k-vizinhos-mais-próximos. Atualmente *Rameau* está sendo estendido para realizar análise funcional de qualquer peça tonal.

Os corais utilizados neste artigo foram convertidos de MIDI para o formato do Lilypond por uma ferramenta automática e depois corrigidos manualmente para remover erros de enarmonia e notas incorretas. Usamos gabaritos manuais de análise harmônica para validar os algoritmos de análise, e o algoritmo escolhido para análise de cadências encontra corretamente em torno de 98% dos acordes.

Análise

Âmbitos

Os corais de Bach foram escritos para serem cantados por músicos profissionais e não pela congregação (Riemenschneider 1941). Esse fato se reflete na textura, cruzamentos e no âmbito vocal usado nos corais. A figura 1 mostra os âmbitos sugeridos por KP e os utilizados por Bach nos corais analisados. Bach amplia o âmbito de soprano e tenor em uma segunda maior ascendente, e o do contralto em uma segunda maior descendente. A voz do baixo tem ampliação de uma terça maior em ambas direções (comparando com as sugestões de KP). A tabela 1 lista os corais onde as notas mais

¹Está descrito em outro trabalho do autor, a citação foi removida por anonimato e será acrescentada na ocasião da publicação.

	NOTA MAIS AGUDA	NOTA MAIS GRAVE
SOPRANO	116 254 282 298 331 334	186 034 050 068 075 223 049 070 100 165 185 197 214 325 348 158 175 205 239 352 087 110 244
CONTRALTO	024 028 033 036 057 058 069 078 084 123 217 225 248 252 329 331 334 354 359	345 186
TENOR	024 043 074 083 151 156 224 248 263 264 273 276 281 329 354 371	229 070 205
BAIXO	285 312 331	034 051 214 223 340 131 328 143 155 197 205 219 241 187 235 319 337 240 070 075 165 175 239

Tabela 1: Corais com notas extremas

agudas e graves ocorrem em cada voz. Na figura 2 podemos ver exemplos das notas mais graves e agudas na voz do baixo.

Figura 1: Comparação de âmbito utilizado por Bach e definido por KP

Figura 2: Notas mais grave e aguda do Baixo

Cruzamento de vozes

Dos corais analisados, 209 têm cruzamentos entre as vozes (57%). KP sugere evitar cruzamentos, principalmente acima do soprano ou abaixo do baixo, mas permite o cruzamento breve das linhas de contralto e tenor se existir uma razão musical (Kostka e Payne 2000, p. 79). De fato, dos corais com cruzamento, o cruzamento mais comum é entre tenor e contralto (37%), mas o cruzamento entre tenor e baixo é quase tão comum (34%). O cruzamento entre contralto e soprano é menos fre-

quente (8%), mas existente, contrariando a regra de não cruzar acima do soprano. De qualquer forma, a grande maioria dos cruzamentos (85%) são curtos (nunca maiores que dois tempos). A análise de cruzamentos mostra alguns exemplos interessantes—no coral 35 o contralto é a voz mais grave por um breve período de tempo onde as vozes do tenor e baixo estão acima da voz do contralto (figura 3a), e no coral 290 existe um cruzamento simultâneo do baixo com o tenor e do contralto com o soprano (figura 3b).

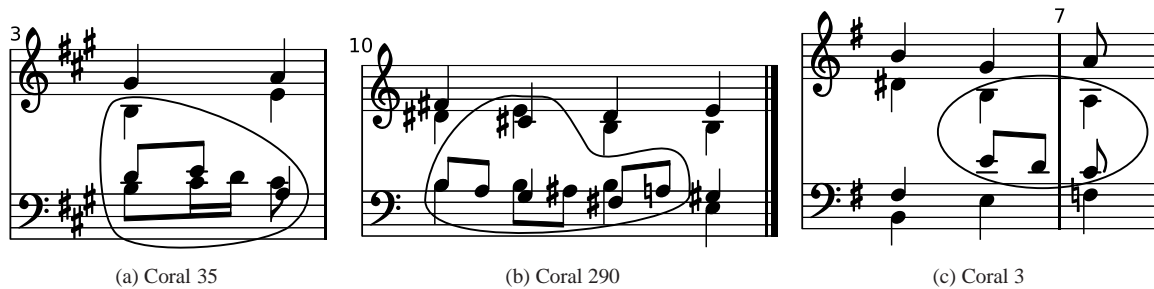


Figura 3: Cruzamentos entre vozes

Os cruzamentos podem ser classificados em duas categorias: para evitar quintas e oitavas consecutivas (figura 3c) e para manter melhor condução de vozes (figura 3b). Contudo inúmeros cruzamentos poderiam ser evitados.

Em alguns corais com cruzamento entre baixo e tenor, por exemplo 29, 35 e 76, a edição usada sugere através de uma *ossia* que as notas do baixo sejam cantadas uma oitava abaixo para evitar o cruzamento. Essa sugestão levanta a questão da razão pela qual Bach não escreveu as notas nessa oitava em primeiro lugar.

Quintas e oitavas consecutivas

Apesar do uso de quintas e oitavas consecutivas ser relativamente comum na escrita instrumental, evitá-las constitui uma das regras mais básicas do estudo de harmonia e contraponto. Dessa maneira, é interessante verificar quantas oitavas e quintas consecutivas existem nos corais de Bach. O número de corais com oitavas e quintas juntos é pouco representativo (4%) em comparação com todos os corais analisados. Existem 8 quintas e 7 oitavas consecutivas.

Algumas dessas quintas e oitavas ocorrem entre o último acorde de uma frase e o primeiro acorde da próxima, como nos corais 45 e 46 (quintas) e 2, 89, e 279 (oitavas), como podemos ver na figura 4b. Uma possível justificativa é a “quebra” de uma frase para outra. Contudo, a maioria das quintas e oitavas consecutivas (9 no total) ocorre no meio de frases. Todas as oitavas nessa categoria são uníssono–oitava ou oitava–uníssono (figura 4). Nenhuma dessas oitavas é paralela, mas algumas das quintas são (corais 4, 46, 71, 266).

(a) Coral 244: A two-staff musical excerpt in G minor. The treble clef staff has a circled interval of a fifth between two notes, with a '5' above it. The bass clef staff has a circled interval of a fifth between two notes.

(b) Coral 279: A two-staff musical excerpt in G minor. The treble clef staff has a circled interval of a seventh between two notes, with a '7' above it. The bass clef staff has a circled interval of a seventh between two notes.

(c) Coral 329: A two-staff musical excerpt in G major. The treble clef staff has a circled interval of a fifth between two notes, with a '10' above it. The bass clef staff has a circled interval of a fifth between two notes.

Figura 4: Oitavas e uníssonos

Acordes de sexta aumentada

Os corais apresentam exatamente três acordes de sexta aumentada e exatamente um de cada tipo listado por KP: um acorde de sexta aumentada alemã (coral 340), um acorde de sexta aumentada italiana (coral 19), e um acorde de sexta aumentada francesa (coral 146). A figura 5 mostra os três acordes. A falta de um uso maior desses acordes nos corais sugere que nesses exemplos eles são obtidos pelo resultado dos movimentos horizontais das vozes e não necessariamente por um pensamento vertical.

(a) Sexta alemã (coral 340): A two-staff musical excerpt in G minor. The treble clef staff has a circled interval of an augmented sixth between two notes, with a '11' above it. The bass clef staff has a circled interval of an augmented sixth between two notes.

(b) Sexta italiana (coral 19): A two-staff musical excerpt in G minor. The treble clef staff has a circled interval of an augmented sixth between two notes, with a '1' above it. The bass clef staff has a circled interval of an augmented sixth between two notes.

(c) Sexta francesa (coral 146): A two-staff musical excerpt in G minor. The treble clef staff has a circled interval of an augmented sixth between two notes, with a '4' above it. The bass clef staff has a circled interval of an augmented sixth between two notes.

Figura 5: Sextas aumentadas

Resoluções de sétimas

Encontramos nos corais de Bach um total de 6297 acordes com sétima e verificamos o tratamento destas sétimas em segmentos adjacentes. Em 77% dos casos as sétimas são resolvidas descendentemente e por grau conjunto, ou seja, da maneira usual (Kostka e Payne 2000, p. 207). Nos acordes restantes em geral ocorre uma das quatro situações seguintes:

1. A sétima não é resolvida e se transforma em nota do acorde seguinte, que pode ser a própria téttrade ou um novo acorde (16% dos casos). Na figura 6a a sétima do acorde de $bm7$ se transforma na tônica do acorde seguinte.
2. No segmento seguinte à sétima, uma ou várias notas do acorde são tocadas antes da resolução, ou ainda a sétima desaparece. Na figura 6b há um arpejo antes da resolução.
3. O encadeamento das vozes por grau conjunto transforma a téttrade em uma espécie de acorde de passagem. Dessa forma a sétima perde sua função original (ver vozes circuladas na figura 6c).
4. A sétima é resolvida ascendentemente e cromaticamente, em geral como uma sensível local (menos de 1% dos casos). Na figura 6d a sétima ascende cromaticamente para a sensível da tônica do acorde seguinte.

Resoluções como essas são consideradas “excepcionais” por alguns teóricos como (Koechlin 1946).

(a) Sétima transformada em nota do acorde seguinte (coral 120)
(b) Arpejo antes da resolução (coral 49)
(c) Vozes de passagem (coral 15)
(d) Ascendente cromática (coral 3)

Figura 6: Resoluções de sétima

Cadências finais

Rameau identifica 79% das cadências finais (isso é, os três últimos acordes diferentes) com o formato $x V I$ onde x pode ser II, IV, V/V (dominante secundária), ou I. Nessa seção indicaremos as funções tonais de maneira genérica em maiúsculo, de modo que os acordes podem ser maiores, menores e com ou sem sétima quando aplicáveis. As funções de segundo grau são sempre menores, diminutos com ou sem sétima ou semi-diminutos, já que um acorde de segundo grau maior está classificado como dominante secundária. A única exceção é o quinto grau que nessa seção é sempre o acorde de dominante.

A cadência mais comum é do tipo II V I (36%), seguida por I V I (32%). As cadências IV VI (6%) e V/V V I (5%) são estatisticamente insignificantes. Apenas 3% dos corais tem a cadência $vii^\circ/V V I$, e apenas 2% do tipo $vii^\circ V I$. Resumindo, 84% das cadências finais terminam em V I.

O algoritmo para analisar as cadências finais identifica de maneira errada 16% dos corais. Por exemplo, a cadência final do coral 362 é $I_4^6 V_7 I$, mas o algoritmo interpreta a antecipação para

a terça do acorde final como um acorde menor do terceiro grau (iii). Além disso, como o algoritmo sempre considera que o acorde final é de tônica, ele classifica erroneamente os corais que terminam em acordes diferentes da tônica, como os que terminam em meia-cadência.

Avaliação

Rameau verifica e interpreta corretamente dados como âmbitos e cruzamento de vozes. Nós pudemos verificar, por exemplo, que mais da metade dos corais possuem algum tipo de cruzamento.

Os acordes de sexta aumentada foram encontrados por um algoritmo que busca pelo intervalo específico de sexta aumentada dentro de um segmento. Isso significa que *Rameau* não encontrará um acorde de sexta aumentada se as notas que formam o intervalo de sexta aumentada estiverem em segmentos diferentes (como em um arpejo). Isso não é problema sério em uma composição no estilo coral, mas esperamos resolver esse problema com a implementação de segmentação no sistema.

Neste artigo apresentamos apenas quintas e oitavas consecutivas entre segmentos adjacentes. Apesar de *Rameau* possuir um algoritmo para detectar quintas e oitavas consecutivas entre segmentos não adjacentes, preferimos não incluir o resultado devido a necessidade de refinamento do algoritmo.

A análise do tratamento de sétimas em segmentos adjacentes não comporta os casos em que há acordes entre o aparecimento da sétima e a sua resolução. O estudo de resolução de sétimas poderia ser beneficiado se o algoritmo do *Rameau* analisasse o contexto em volta do acorde de sétima de maneira dinâmica. Desse modo poderia se fazer um estudo mais preciso de como sétimas são preparadas e resolvidas.

Finalmente, o estudo de cadências pode ser melhorado com a implementação da análise funcional no sistema.

Agradecimentos

Essa pesquisa conta com o apoio da FAPESB (Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia) através do Edital nº 07/2006, termo de outorga PPP0051/2006.

Conclusão e trabalhos futuros

Nesse artigo apresentamos um estudo de alguns elementos musicais nos corais de Bach com o auxílio de sistema *Rameau*. Esse tipo de estudo é interessante pela precisão e possibilidades de análise fornecidas. Por exemplo, nossa análise indica que o soprano alcança a nota mais grave em 23 corais. Essa informação pode ser usada para demonstrar acordes em posição fechada. Em um outro exemplo, um professor de harmonia pode selecionar trechos com resoluções específicas de sétima para mostrar aos seus alunos. Naturalmente esses dados poderiam ser extraídos manualmente, mas

sem dúvida levaria um tempo enorme, considerando que são mais de 30000 segmentos no total.

O maior desafio nesse tipo de análise é garantir que os dados de entrada estejam 100% corretos, especialmente em arquivos MIDI. Infelizmente o número de erros é grande. Uma possível solução seria a criação de repositórios de arquivos musicais em formatos simbólicos para análise. Esse arquivos seriam corrigidos sistematicamente por pesquisadores de área. Alguns repositórios existem para composições no formato kern (usado pelo Humdrum)² e MuseData³. No final da nossa pesquisa esperamos liberar um repositório com todos os corais de Bach no formato do Lilypond corrigidos. É importante notar que os resultados parciais obtidos por *Rameau* ajudaram a identificar erros nos corais.

No futuro esperamos implementar segmentação e análise funcional no sistema. Essa implementação resolverá a maioria dos problemas listados na seção de avaliação.

Referências

- Cook, Nicholas. 2005, September. "Towards the complete musicologist." Editado por Joshua D. Reiss e Geraint A. Wiggins, *Proceedings of ISMIR 2005*. London, UK: University of London.
- Coutinho, E. Gimenes. 2005. "Computational Musicology: An Artificial Life Approach." *Proceedings of the 2nd Portuguese Workshop on Artificial Life and Evolutionary Algorithms Workshop*. 85–93.
- Hartmann, Knut, Daniel Büchner, Axel Berndt, Andreas Nürnberger, e Carsten Lange. 2007, 15.-19. August. "Interactive data mining and machine learning techniques for musicology." *3rd Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM07)*. Tallinn, Estonia.
- Honing, Henkjan. 2004. "The comeback of systematic musicology: new empiricism and the cognitive revolution." *Dutch Journal of Music Theory* 9 (3): 241–244.
- Huron, David. 1999. *Music Research Using Humdrum: A User's Guide*. Stanford, Ca: Center for Computer Assisted Research in the Humanities.
- Koechlin, Charles. 1946. *Traité de l'Harmonie*. Volume 3. Paris: Max Eschig.
- Kostka, Stefan M., e Dorothy Payne. 2000. *Tonal Harmony, with an introduction to twentieth-century music*. 4th. Boston: McGraw-Hill.
- Kranenburg, P. van, E. Backer. 2004, April. "Musical style recognition - a quantitative approach." Editado por A. Kessler R. Parncutt e F. Zimmer, *Proceedings of the Conference on Interdisciplinary Musicology*. 15–18.
- Kugel, Peter. 1992. "Beyond computational musicology." In *Understanding music with AI: perspectives on music cognition*, 30–48. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Nienhuys, Han-Wen, e Jan Nieuwenhuizen. 2008, Jan. LilyPond. Available at www.lilypond.org.

²kern.humdrum.net

³www.musedata.org

- Pardo, Bryan, e William P. Birmingham. 2000. "Automated Partitioning of Tonal Music." *Proceedings of the 13th International FLAIRS Conference*.
- Riemenschneider, Albert, ed. 1941. *371 Harmonized Chorales and 69 Chorale Melodies with figured bass*. New York: G. Schirmer.
- Selfridge-Field, Eleanor. 1993–1994. "The musedata universe: a system of musical information." In *Computing in Musicology*, Volume 9, 9–30. The MIT Press.