

Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise harmônica em alto nível de corais de J. S. Bach

Carlos de Lemos Almada (UFRJ)

Resumo: O presente estudo aborda o desenvolvimento do programa *Chorale*, uma ferramenta computacional destinada à análise harmônica considerando especificamente as relações tonais presentes em corais a quatro vozes de J. S. Bach. São descritos sua estrutura básica e seu principal algoritmo, destinado ao exame das condições contextuais das frases dos corais, em busca da determinação das regiões tonais (SCHOENBERG, 1969) envolvidas. Como resultado principal, o programa gera um gráfico de contorno que dispõe o caminho tonal (LERDAHL, 2001) presente em um determinado coral analisado, permitindo comparações com análises de outras peças, o que, presumidamente, poderá revelar padrões construtivos no planejamento tonal.

Palavras-chave: Corais de Bach. Análise assistida por computador. Regiões tonais. Caminhos tonais.

Implementation of a Computational Tool for High-level Harmonic Analysis of J. S. Bach's Chorales

Abstract: The present study addresses the implementation of *Chorale*, a computational tool intended to harmonic analysis considering specifically tonal relations present in J. S. Bach's 4-part chorales. The paper describes the program's basic structure and main algorithm, which is concerned to the exam of contextual conditions of chorale phrases, searching to determine the involved tonal regions (SCHOENBERG, 1969). As its main result, the program plots a contour graph that shows the tonal path (LERDAHL, 2001) present in a given analyzed chorale, allowing comparisons with other ones, which may presumably reveal constructive patterns in the tonal planning.

Keywords: Bach's chorales; computer-assisted analysis; tonal regions; tonal paths.

ALMADA, Carlos de Lemos. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise harmônica em alto nível de corais de J. S. Bach. *Opus*, [s.l.], v. 21, n. 3, p. 209-230, dez. 2015.

Submetido em 16/10/2015, aprovado em 13/12/2015.

Este artigo integra um projeto de pesquisa recentemente iniciado e coordenado pelo presente autor, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Música da Universidade Federal do Rio de Janeiro. A pesquisa tem como principal objetivo a criação de ferramentas computacionais dedicadas à análise harmônica assistida. O presente texto descreve a estrutura e o desenvolvimento de uma dessas ferramentas – o programa *Chorale* –, cuja finalidade específica é produzir análises harmônicas considerando as relações tonais presentes em corais a quatro vozes compostos por Johann Sebastian Bach (1685-1750).

Análise harmônica em alto nível

A criação de ferramentas computacionais para a realização de análise harmônica é uma das mais recentes e fecundas vertentes de pesquisa surgidas na confluência entre as áreas da Música, Matemática e Ciência da Computação¹. O exame da literatura atual sobre o assunto revela a existência de duas vertentes básicas, com as seguintes finalidades: (1) criação de aplicativos que produzem automaticamente descrições analítico-funcionais de sequências de acordes em obras do repertório clássico-romântico, a partir do exame das condições contextuais vigentes (cf. TEMPERLEY, 2001 e WHITE, 2015, entre outros) e (2) elaboração de modelos abstratos destinados à apresentação de relações harmônicas em disposições espaciais como gráficos em duas, três ou até mesmo quatro dimensões (cf. PURWINS, 2005 e BAROIN, 2011, entre outros). O primeiro dos casos é voltado

¹ Embora transcendendo o âmbito específico da análise harmônica considerado neste artigo, é importante comentar que há atualmente disponíveis na Internet diversas outras ferramentas computacionais, abrangendo vários domínios musicais e finalidades. Nesse sentido, pode ser citado, por exemplo, o caso do MIDI Toolbox (cf. <<https://www.jyu.fi/hum/laitokset/musiikki/en/research/coe/materials/miditoolbox>>), um conjunto de funções criadas por Petri Toiviainen e Tuomas Eerola, pesquisadores do Departamento de Música da Universidade de Jyväskylä (Finlândia), abrangendo um vasto espectro de propósitos (determinação de métrica e de tonalidade, análise de contornos, segmentação melódica, investigação sobre expectativa musical, etc.), a partir de trabalhos teóricos de Carol Krumhansl, Eugene Narmour, James Tenney, entre outros. Outro exemplo é o Humdrum Toolkit (disponível em: <<http://www.musiccog.ohio-state.edu/Humdrum/>>), desenvolvido pelo musicólogo David Huron, consistindo em um grupo de cerca de 70 ferramentas computacionais voltadas para diversas tarefas musicais, tais como classificação de intervalos, busca de ocorrências de motivos, identificação de cadências, classificação de acordes, etc. Acrescente-se à lista o Toolbox IPem (disponível em: <<http://www.ipem.ugent.be/?q=node/27>>), realização de pesquisadores do Departamento de Musicologia da Universidade Gent (Bélgica), contendo ferramentas dedicadas à modelagem de processos perceptivos.

essencialmente para as correlações entre acordes, o que passa a ser aqui classificado como análise de superfície ou de baixo de nível (abreviada como BN). A segunda categoria se associa a uma longa tradição de representação gráfica das relações tonais, a partir de diagramas circulares (sendo o assim chamado “círculo das quintas” seu mais conhecido exemplo), “cosmológicos” (como o sistema das três funções tonais, T-D-S, central para a teoria harmônica funcionalista, de Hugo Riemann, 1849-1919) ou em rede (*Tonnetz*), outra das concepções teóricas de Riemann, uma disposição das tonalidades calcada no cruzamento de eixos baseados em intervalos de quintas justas e de terças maiores. A ideia da *Tonnetz* foi recentemente retomada e desenvolvida pela chamada corrente neo-riemanniana². Em comparação à abordagem analítica de superfície, o segundo tipo envolve um plano harmônico hierarquicamente mais elevado, pois as medições das relações não acontecem entre fundamentais de acordes, mas entre centros de campos tonais locais aos quais tais acordes são subordinados. A análise harmônica nessa camada estrutural passa a ser identificada como de alto nível (daqui em diante, AN). Em suma, AN é destinada unicamente ao exame das correlações entre a tônica e as regiões tonais (de acordo com a terminologia criada por Arnold Schoenberg em seu livro *Structural Functions of Harmony*) presentes em uma determinada peça musical, desconsiderando, portanto, o nível das progressões de acordes.

Contudo, seja em um ou em outro processo analítico (BN ou AN), uma problemática constitui a maior dificuldade para a implantação computacional: a presença, em geral, de uma considerável margem de subjetividade, resultante da ambiguidade inerente à construção harmônica, o que é, em larga medida, acionada intencionalmente pelo próprio compositor como parte decisiva do processo criativo. Talvez o caso mais recorrente e representativo dessa característica esteja relacionada à incerteza interpretativa entre uma cadência à dominante em uma determinada tonalidade e uma cadência autêntica em sua região dominante, o que pode ser simbolizado pela equação $[V/T = I/D]$, sendo **T** e **D** símbolos das regiões envolvidas. O Ex. I ilustra esse dilema harmônico que, quase que invariavelmente, é resolvido na análise convencional por intermédio do recurso da dupla interpretação, mantendo-se equivalentes duas linhas descritivas. Como será apresentado oportunamente, a ferramenta computacional que é proposta neste estudo é “incapaz” de produzir mais de uma interpretação para cada situação examinada, acabando por “optar” por uma alternativa a partir de uma avaliação quantitativa, o que constitui uma de suas principais limitações e sugere uma direção para futuros aperfeiçoamentos.

² Sobre esse ponto específico, ver a generalização da *Tonnetz* proposta por David Lewin (1992) e os inúmeros diagramas que ampliam o âmbito analítico da teoria, em COHN (2012).

Ex. 1: Ambiguidade [V/T = I/D]. Exemplo original do autor.

Outro importante aspecto, não necessariamente ligado à análise assistida por computador, porém essencial para a formalização da proposta aqui apresentada, deriva de elementos da teoria de Fred Lerdahl (2001). Esta é formulada como uma ampla abordagem que combina psicologia cognitiva (relacionada a leis de boa-formação de modelos e preferenciais da percepção), física (com a adaptação da lei newtoniana da atração gravitacional), formalização matemática (com o estabelecimento de equações, pesos e constantes, visando à quantificação das relações entre eventos melódicos e harmônicos) e, principalmente, uma visão da estrutura musical estratificada em níveis distintos de importância e organizada a partir da flutuação entre graus de tensão e relaxamento. Após uma informativa revisão histórico-bibliográfica sobre as formas de disposição espacial das relações tonais (LERDAHL, 2001: 41-48), associadas ao que denomina *pitch spaces* (espaços de alturas, numa possível tradução), Lerdahl introduz dois importantes aspectos, relevantes para este estudo: a medição das distâncias entre pontos de altura (nos níveis das notas individuais, fundamentais de acordes e tônicas locais, considerando uma sequência de regiões) e as trajetórias que as interligam, ou *tonal paths* (caminhos tonais). Sua original abordagem é exemplificada nas análises do *Prelúdio para Piano* em Mi menor op. 28 de Chopin, do primeiro movimento da *Sonata* (póstuma) em Si $\flat$ maior de Schubert e de dois trechos de óperas de Wagner (na seção da *Transfiguração*, em *Tristão e Isolda*, e na *Jornada à Redenção*, em *Parsifal*). Este último caso apresenta uma ilustração das relações possíveis entre caminhos tonais e narrativas (no caso, do libreto). Como Lerdahl demonstra (2001: 136), há uma intensa correspondência entre polos tonais de seu *pitch space* (Lá $\flat$, considerando as direções “norte”, “sul”, “leste” e “oeste”, tendo Ré como centro referencial) e a oposição de conceitos de forte carga simbólica para o argumento da ópera,

que formam seu mapa narrativo básico (*narrative map*): Céu-Terra (no eixo “norte-sul”) e Bom-Mal (eixo “oeste-leste”). Ou seja, embora cada trajetória em direção a tais polos narrativo-musicais perfaça sempre a mesma distância tonal (o intervalo de trítono), os diferentes percursos são particulares, pois as linhas e colunas do espaço de alturas, assim como a *Tonnetz* riemanniana, são organizadas por intervalos distintos (quintas na “vertical” e terças na “horizontal”). Como conclui o autor, é extremamente significativo constatar que as trajetórias percorridas pelo herói Parsifal na tortuosa e acidentada busca pelo Santo Graal descreve, em linhas gerais, o formato de uma cruz, associando-se, conseqüentemente, aos ideais de fé e cristandade, elementos centrais do mito medieval do rei Artur e seus cavaleiros que inspirou a criação da ópera.

A correspondência espacial entre relações tonais em alto nível e narrativas extramusicais na música de Bach é investigada por Carlos Almada (2011). Tal estudo propõe interpretações possíveis para escolhas harmônicas adotadas pelo compositor em cinco versões de seu coral *O Haupt voll Blut und Wunden*, todas presentes em trechos distintos do oratório da *Paixão Segundo São Mateus*. De acordo com os resultados da análise realizada, essas escolhas estariam conectadas a uma expressão simbólica e subliminar dos respectivos eventos associados à narrativa da Paixão de Cristo. Considerando que a melodia e os textos das versões – os recursos mais óbvios e “diretos” que poderiam ser empregados para evidenciar as relações entre a música e o roteiro – não foram criados por Bach³, restaria a ele apenas a harmonia (nos níveis dos acordes, regiões internas e tonalidades escolhidas para cada versão) para a expressão implícita de suas intenções construtivas.

O desejo de aprofundar as questões introduzidas nesse estudo, ampliando a investigação iniciada sobre a hierarquia harmônica como parte da estrutura musical, motivou a recente criação de um projeto de iniciação científica, cuja finalidade essencial é realizar um levantamento detalhado das configurações tonais presentes na coleção dos 371 corais de Bach. Contudo, não se pretende – pelo menos a princípio – evidenciar correlações entre música e texto, mas sim buscar o reconhecimento de padrões que possam porventura contribuir para abertura de uma nova perspectiva sobre os processos

³ Os poemas usados nas cinco versões dos corais são traduções para o alemão de Paul Gerhard (1607-1676) do hino litúrgico medieval em latim *Salve caput cruentatum*. Tais traduções foram realizadas cerca de cem anos antes da elaboração do libreto do oratório, por Christian Friedrich Henrici (1700-1764), mais conhecido por Picander. A melodia (empregada em todas as versões, com pequenas alterações derivadas das distintas prosódias) foi composta em 1601 por Hans Leo Hassler (1564-1612), sendo originalmente uma canção de amor.

construtivos do compositor⁴. Por hipótese inicial da pesquisa, haveria nos corais, a despeito de sua grande diversidade, um número relativamente limitado de modelos abstratos de sequências regionais, o que poderia ser talvez associado a motivações expressivas ou mesmo a preferências construtivas pessoais do compositor.

A partir da conjugação de tal intenção básica com os processos de análise harmônica em alto nível e dos conceitos de distância e caminhos tonais propostos por Lerdahl, foi elaborado o programa *Chorale*, que visa especificamente à análise AN e à subsequente produção de descrições gráficas de sequência de regiões tonais e tipos cadenciais presentes nos corais de Bach, explicitando suas distâncias em relação à tônica em função do tempo.

Elementos básicos

O funcionamento de *Chorale* parte de um pressuposto teórico, derivado do que é formalmente conhecido sobre a estrutura harmônica de um coral bachiano típico⁵: todas as suas frases musicais (que correspondem a versos do texto que lhes deu origem) terminam em fermatas, consistindo em pontuações sobre cadências autênticas ou à dominante, invariavelmente em estado fundamental. Ou seja, haveria apenas duas alternativas funcionais para o acorde que conclui uma frase: como I ou V graus referentes a alguma tonalidade. O reconhecimento de que há, em suma, apenas duas opções para as finalizações cadenciais implica que o surgimento em uma determinada fermata de um acorde que não corresponda ao I ou ao V graus da tonalidade vigente resulte necessariamente no estabelecimento de uma nova tônica local⁶. Como ilustração, seja, por exemplo, a seguinte sequência de acordes conclusivos de frases, em um coral hipotético (Ex. 2).

⁴ O projeto foi iniciado em agosto de 2015, contando em sua equipe com quatro bacharelandos da Escola de Música da Universidade Federal do Rio de Janeiro: Cláudia Usai, Noel Nascimento, Igor Chagas e Igor Bacellar.

⁵ Ver, por exemplo, Schoenberg (2001: 403-434), no capítulo dedicado ao planejamento e realização de corais à maneira de Bach, com ênfase sobre a organização dos pontos cadenciais.

⁶ Uma consequência que se extrai de tais considerações é que a conclusão de uma frase com acorde em modo menor significa necessariamente que tal acorde exerce a função de I grau de uma tônica local em modo menor (cf. a terceira fermata do Ex.2), já que a opção “dominante” estaria descartada. A identificação de um acorde como V grau, por sua vez, abre duas possibilidades para inferência de uma tônica local: em modo maior ou menor.

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8.

1.	I (C)	V (C)	I (d)	V (d)	V (a)	V (G)	V (C)	I (C)
2.	V (F)	I (G)		I (A)	V (A)	V (g)	I (G)	V (F)
3.	V (f)	V (c)		V (D)	I (E)	I (D)	V (c)	V (f)

Possibilidades

Ex. 2: Possibilidades analíticas para conclusões de frases em um coral hipotético. Letras maiúsculas (p.ex., G) representam tonalidades em modo maior (Sol maior) e minúsculas (ex.,f), tonalidades em modo menor (Fá menor). Exemplo original do autor.

O quadro sob a pauta musical do Ex. 2 apresenta três possibilidades analíticas possíveis para cada pontuação cadencial (incluindo o acorde de início), considerando os pressupostos acima enunciados. Levando-se em conta o que se conhece sobre a conduta harmônico-estilística do período musical em questão (alto Barroco), bem como os critérios de lógica e plausibilidade (respaldados pela experiência em análise tonal), é possível estabelecer distinções de preferências entre as opções oferecidas, explicitadas pelo grau de sombreamento dos retângulos: quanto mais escuro seu fundo, mais provavelmente correta será a descrição analítica. A possibilidade I mostra-se assim como a mais plausível, embora nos compassos 2 e 7 as opções da segunda linha sejam a princípio equivalentes, resultantes da já comentada ambiguidade harmônica $[V/T = I/D]$. Desconsiderando escolhas tonais pouco plausíveis em relação ao estilo harmônico em questão (por exemplo, a terceira possibilidade, compassos 4-6), algumas possibilidades, embora menos prováveis, não devem ser simplesmente descartadas, pois seriam estilisticamente viáveis, a depender dos contextos aos quais estariam inseridas, o que significa que os dados existentes (ou seja, a identificação das estruturas dos acordes conclusivos) são necessários, porém não plenamente suficientes para a análise.

Este simples exemplo tem como finalidade evidenciar o principal desafio da tarefa da análise AN, a saber: a escolha da descrição teoricamente mais “verossímil” depende do conhecimento das condições contextuais que estão associadas, de certo modo, ao plano mais básico do ambiente melódico-harmônico subordinado aos pontos cadenciais. Como é a seguir apresentado, algumas estratégias em *Chorale* buscam encontrar soluções generalizantes para o problema.

Desenvolvimento

Composto por diversos algoritmos inseridos em um conjunto de *scripts* e *functions* subordinados, escritos em linguagem computacional MATLAB, *Chorale* é um programa analítico relativamente simples e de fácil operação, tendo sido recentemente transformado em aplicativo Windows, cuja interface de usuário é apresentada na Fig. 1.

Como dados de entrada são necessários: (1) a tonalidade de referência, informada pelo usuário ao pressionar o botão correspondente num dos dois “círculos” de quintas (em modo maior ou menor) dispostos no painel do aplicativo (e indicados por “A” na Fig. 1); (2) as localizações (em números de compassos e tempos) das fermatas (em “B”) e (3) o coral a ser analisado, em formato MIDI (o arquivo é aberto na aba “C”). Internamente, as informações musicais (posições métricas, durações rítmicas e alturas) do arquivo são transcritas como matrizes numéricas, que passam a fornecer os dados para as subseqüentes operações do programa. Entre tais matrizes, a mais importante é formada pelas alturas-midi⁷, servindo de base para o processamento analítico do conteúdo harmônico do coral.

Quando acionado, o comando “Analyze” (Fig. 1, “D”) inicia uma seqüência de três etapas: (1) identificação dos acordes dos pontos cadenciais; (2) análise contextual das frases nas quais tais acordes estão inseridos; (3) plotagem de gráfico de contorno correspondente aos caminhos tonais presentes na peça. Tais etapas são descritas em detalhes nas subseções que se seguem, tomando como exemplo o coral bachiano nº 4 (*Es ist das Heil uns kommen her*),⁸ em Mi maior, com suas cinco conclusões frasais/cadenciais indicadas numericamente (Ex. 3).

⁷ Alturas-midi (abreviadas deste ponto em diante por “am”) são números que representam o espaço cromático possível dentro de um arquivo MIDI. Convencionou-se o número 60 para o Dó central (C₄) e as distâncias semitonais correspondendo à unidade (assim, C#₄= 61; D₄=62; ...; ou, descendentemente, B₃=59; B₃=58, etc.).

⁸ De acordo com a edição adotada como referência (BACH, 1878).

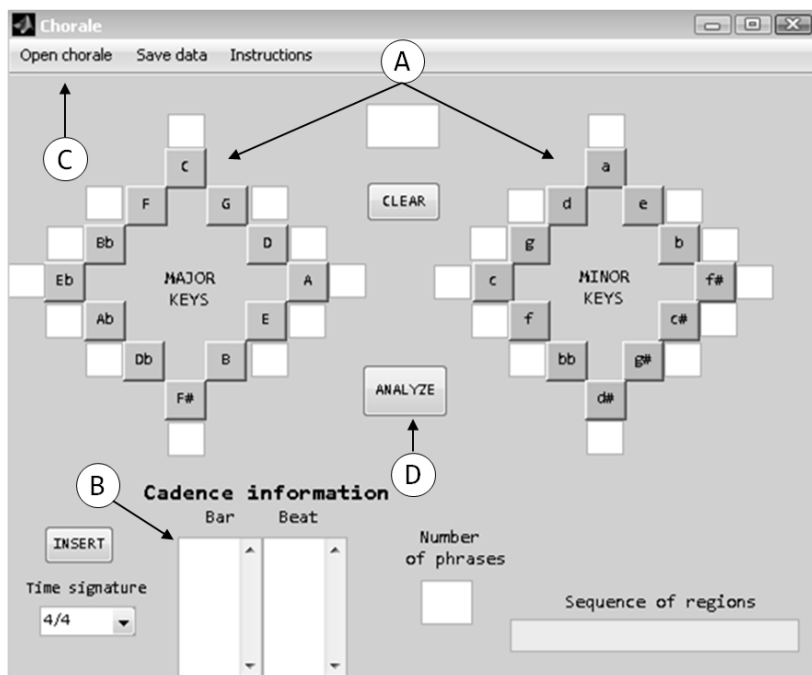


Fig. 1: Interface de usuário de Chorale.

Ex. 3: J. S. Bach - *Es ist das Heil uns kommen her* (coral 4).

Identificação dos acordes cadenciais. A partir das informações sobre o posicionamento das fermatas, são isolados os cinco acordes conclusivos das frases (Fig. 2). Um algoritmo localiza suas fundamentais (“f”), transcrevendo-as como classes de alturas (tradução para *pitch-classes*, doravante abreviadas como “pc’s”)⁹, com o intuito de normalizar e facilitar as operações subsequentes. O programa também identifica os modos dos acordes (“m”), atribuindo-lhes os números “0” ou “1” para as categorias, respectivamente, maior e menor. Nesta fase, apenas uma situação possibilitaria a definição do ambiente tonal para uma frase específica: a detecção de um acorde em modo menor (que, de acordo com os pressupostos acima apresentados, só poderia exercer a função de I grau em relação a um centro tonal). Como todos os acordes obtidos na análise do Ex. 3 possuem modo maior, a identificação precisa das tônicas locais a que estão associados ainda não é possível, pois em tese poderiam exercer as funções de tônica (de um centro em modo maior) ou dominante (neste caso, em relação a tônicas locais em modo maior ou menor). A determinação definitiva desses pontos referenciais é deixada, portanto, para a etapa seguinte, a partir do exame dos contextos melódico-harmônicos de cada frase.

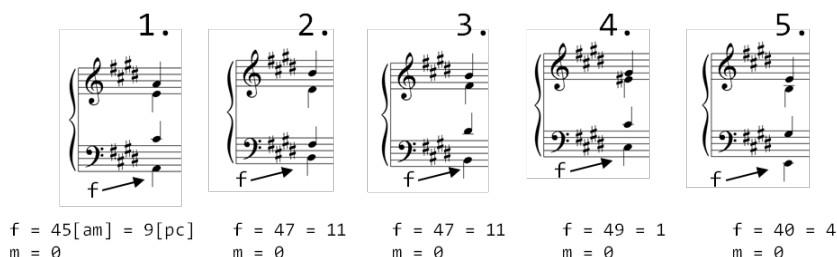


Fig. 2: Acordes cadenciais das cinco frases do coral 4.

⁹ A partir dos postulados da Teoria dos Conjuntos de Classes de Alturas (*Pitch-Class Set Theory*), difundidos por Allen Forte (1973), uma classe de altura é uma abstração de uma nota, considerando isoladamente a categoria da altura (associada ao parâmetro acústico da frequência), tomando como base os princípios das equivalências enarmônica e de oitava. Deste modo, existe apenas um “Dó” (e um “Ré” etc.), desconsiderando as inúmeras maneiras (durações, registros, timbres, articulações, etc.) com que possa ser concretamente expresso. Há, assim, apenas 12 pc’s possíveis (numerados de 0 a 11), que formam a escala cromática. Por convenção, 0 corresponde a “Dó” (1 a “Dó#/Ré,” e assim por diante).

Análise contextual¹⁰. O processo abrange dois estágios: preparatório e analítico. No primeiro deles, todas as alturas-midi que antecedem cada fermata são selecionadas (Fig. 3a) e, em seguida, transcritas como pc's (Fig. 3b), formando colunas matriciais para as frases do coral (cinco, neste caso). Tomando como hipótese inicial que cada acorde conclusivo é o I grau de uma tônica local (Lá maior, no caso da primeira frase), um algoritmo generalizador transforma suas fundamentais em tônicas provisórias, por intermédio de operação de transposição. Isto significa que, no caso da primeira frase, a altura absoluta "Lá" (pc 9) é renomeada como "Dó" (pc 0). A diferença obtida na operação ($0 - 9 = -9$) é então aplicada (em *modulo 12*)¹¹ aos demais elementos da coluna de pc's, generalizando o conteúdo da frase correspondente (Fig. 3c). Em seguida, inicia-se o processo analítico propriamente dito, com uma sequência de buscas por elementos específicos, de acordo com um determinado protocolo de prioridades, iniciando-se pelos pc's 7 e 8 (Fig. 3d). A presença de ambos indicaria uma forte probabilidade de o acorde conclusivo ser um dominante de uma região em modo menor, pois 8 corresponde ao III grau escalar (formando um intervalo de terça menor) em relação à tônica implicada¹². Não havendo ocorrências do pc 8, passa-se para a busca seguinte, considerando os pc's 10 e 11. A presença de 11 indicaria sensível da tônica local hipotética, confirmando a condição de I grau para o acorde conclusivo. Inversamente, ocorrências do pc 10 (VII grau escalar abaixado) sugeririam que o acorde cadencial exerce a função dominante em relação a uma tônica local em modo maior. Algoritmos contabilizam as quantidades, de acordo com condições hierarquizadas pré-estabelecidas, produzindo como resposta o tipo de cadência detectado.

¹⁰ Por uma questão de simplicidade, apenas a primeira frase será considerada para a ilustração desta etapa.

¹¹ Ou, abreviadamente mod12. Trata-se de um algoritmo empregado para a manutenção do sistema duodecimal que é formado pelos 12 pc's. Consiste basicamente no resto da divisão de um determinado número maior ou igual a 12 por 12, por exemplo: $\text{mod}12(12) = 0$; $\text{mod}12(16) = 4$; $\text{mod}12(49) = 1$ etc.

¹² A necessidade de considerar simultaneamente os pc's 7 e 8 tem a finalidade de eliminar eventuais casos de cromatismos que poderiam mascarar a análise contextual, já que 8 pode também representar uma alteração cromática ascendente do V grau escalar relativo à hipotética tônica local (maior), o que seria reforçado pela ausência do pc 7 (e, inevitavelmente, pela presença do pc 9) na busca realizada.



Fig. 3: Processo de análise contextual para a primeira frase do coral 4: extração de coluna *am* (a); transcrição *am* → *pc* (b); generalização (c); verificação (d).

A efetivação da análise retorna uma matriz de três linhas e *j* colunas, onde *j* é o número de frases que compõem o coral (para o Ex. 3, *j* = 5). Denominada matriz AN (Fig. 4), apresenta as seguintes informações sobre a estrutura tonal da peça: identificação das tônicas locais, como pc's (tomando a tônica global como "0"), definição dos modos dos acordes conclusivos ("0" para maior ou "1" para menor) e dos tipos cadenciais considerados ("1" para cadências autênticas, "5" para cadências à dominante em relação a tônicas implícitas em modo maior e "5.1" para cadências à dominante em relação a tônicas implícitas em modo menor). A combinação desses dados converge para a determinação das regiões tonais estabelecidas a cada fermata, por intermédio de um algoritmo que segue uma cadeia lógica de raciocínio. Basicamente, as informações associadas à primeira frase do coral 4 seriam interpretadas como se segue: sendo a cadência de tipo 1 (autêntica), o acorde conclusivo representa o 1 grau de uma tônica local em modo maior (0), cujo centro é determinado pelo número de semitons (5) acima da tônica global (sendo Mi = 0 → 0+5 = Lá). Para frases 2 e 3: tipo cadencial 1 → 1 grau → modo 0 → Si maior (0+7 = 7 semitons). Frase 4: tipo cadencial 5.1 → V grau (em relação a uma tônica implícita em modo menor)¹³ → Fá# menor (0+2 = 2 semitons). Frase 5: tipo cadencial 1 → 1 grau → modo 0 → Mi maior (0+0 = 0 semitons).

¹³ Neste caso, a informação sobre o modo é redundante, já que o V grau poderia ser apenas um acorde maior.

	fr.1	fr.2	fr.3	fr.4	fr.5
tônica local	↓	↓	↓	↓	↓
modo (ac.)	5	7	7	2	0
tipo cadencial	0	0	0	0	0
	1	1	1	5.1	1

Fig. 4: matriz AN.

Plotagem. A matriz AN fornece os dados para a produção de um gráfico de contorno que delineia os caminhos tonais percorridos durante a extensão do coral, considerando as diferentes gradações de proximidade entre as regiões envolvidas e a tônica global. Levando-se em conta que a comparação de gráficos produzidos pelas análises de diferentes corais é uma das principais finalidades da pesquisa de iniciação científica à qual está associado o programa *Chorale*, a generalização e normalização dos dados analíticos tornam-se fatores decisivos em seu funcionamento. Para tal finalidade, duas estratégias complementares foram concebidas: (1) considerar as tonalidades não como pontos fixos em um esquema espacial, mas representadas por suas inter-relações¹⁴; (2) posicionar tais referências de acordo com distâncias físicas que reflitam de alguma maneira as distâncias cognitivas com que são normalmente percebidas. Para o primeiro objetivo foi adotado o conceito de “região tonal”, elaborado por Arnold Schoenberg (1969: 15-34). Segundo tal princípio (que atua em conjunção ao princípio da “monotonalidade”), existiria em uma obra apenas uma tônica (de onde se parte e para onde, ao final, retorna-se), sendo todos os demais centros que possam ser alcançados no decorrer da narrativa musical denominados regiões tonais, revelando seu caráter transitório e integralmente subordinado à tônica, como desvios ou digressões. Schoenberg criou símbolos genéricos para designar suas regiões, associando-as implicitamente a variadas distâncias em relação ao centro de referência, conseguindo assim engenhosamente expandir o conceito de funcionalidade tonal para além do nível das progressões de acordes e atingindo o estrato superior das relações entre polos tonais. A Tabela 1 apresenta os símbolos regionais schoenberguianos adotados pelo presente trabalho, acompanhados de suas nomenclaturas e exemplificação (a partir dos centros Dó maior e Dó menor)¹⁵. A simbologia adota os seguintes critérios: (1) iniciais maiúsculas representam regiões em modo maior (ex: **SD** = “subdominante”, ou Fá maior,

¹⁴ Tornando assim equivalentes (e passíveis de comparação) análises realizadas a partir de tonalidades absolutas distintas (Dó maior, Mi[♭] maior etc.).

¹⁵ Por motivo de simplicidade, foram desconsideradas as regiões não idiomáticas em relação ao estilo harmônico do repertório a ser analisado. É o caso das regiões mais remotas e sem afinidades indiretas com regiões mais próximas ao centro de referência.

considerando Dó maior como tônica) e, inversamente, minúsculas as em modo menor (**m** = “mediante menor”, ou Mi menor); (2) os sinais “#” e “b” colocados à esquerda do símbolo indicam alterações cromáticas das fundamentais originais, respectivamente, ascendente e descendente (ex: **bSM** = “submediante maior abaixada”, ou Lá_b maior); (3) combinações de símbolos básicos representam regiões alcançadas por movimento indireto (ex: **MD** = “mediante maior da dominante”, ou Si maior).

(a)			(b)		
Região	Nome	Ex.	Região	Nome	Ex.
T	Tônica	C	t	Tônica menor	C
sm	Submediante menor	a	M	Mediante	E ₃
D	Dominante	G	d	Dominante menor	G
m	Mediante menor	e	Subt	Subtônica	B ₃
SD	Subdominante	F	sd	Subdominante menor	F
dor	Dórica (menor)	d	SM	Submediante	A ₃
S/T	Super tônica	D	SD	Subdominante	F
SubT	Subtônica	B ₃	Np	Napolitana	D ₃
v	“Quinto” menor	G	T	Tônica maior	C
SM	Submediante maior	A	#sm	Submediante menor levantada	A
bM	Mediante maior abaixada	E _b	D	Dominante maior	G
T	Tônica menor	C			
M	Mediante maior	E			
bSM	Submediante maior	A _b			
sd	Subdominante menor	F			
Np	Napolitana	D ₃			

Tab. I: Regiões adotadas, relacionadas a tônicas em modo maior (a) e modo menor (b)¹⁶.

Embora Schoenberg tenha se preocupado em agrupar as regiões de acordo com cinco níveis de afinidade/proximidade em relação a uma tônica (SCHOENBERG, 1969: 68-75), os propósitos específicos desta etapa do processo analítico demandam uma gradação mais precisa, de maneira que cada região a ser considerada possa ter uma coordenada espacial única a ser atribuída na curva do gráfico. Sendo assim, considerando a segunda estratégia concebida para a plotagem gráfica, foi adotado como base para a metrificação das relações regionais um esquema proposto por Carol Krumhansl (1983: 55), no qual são planejadas as distâncias entre tonalidades, a partir de um minucioso estudo empírico sobre a percepção de distâncias tonais por ouvintes. Para os propósitos da presente pesquisa foram feitas três modificações em relação ao diagrama de Krumhansl: (1) substituição dos

¹⁶ Símbolos com iniciais maiúsculas se referem a regiões em modo maior e, inversamente, minúsculas ao modo menor (o mesmo se aplica para as cifras que representam as tonalidades absolutas, nas colunas de exemplificação). Acidentes antecedendo as iniciais indicam alterações cromáticas ascendente (#) ou descendente (b) em relação às fundamentais consideradas.

nomes originais das tonalidades absolutas pelos símbolos genéricos das regiões schoenberguianas; (2) delimitação do âmbito, considerando apenas as regiões previamente selecionadas e apresentadas na Tab. I; (3) marcação das distâncias geométricas entre as regiões e a tônica, tomando a menor delas (**T-sm**) como unidade. Foram assim elaborados dois esquemas espaciais de metrificação, relacionados a tônicas em modos maior e menor (por questões de espaço e foco, a Fig. 5 apresenta apenas o primeiro desses diagramas).

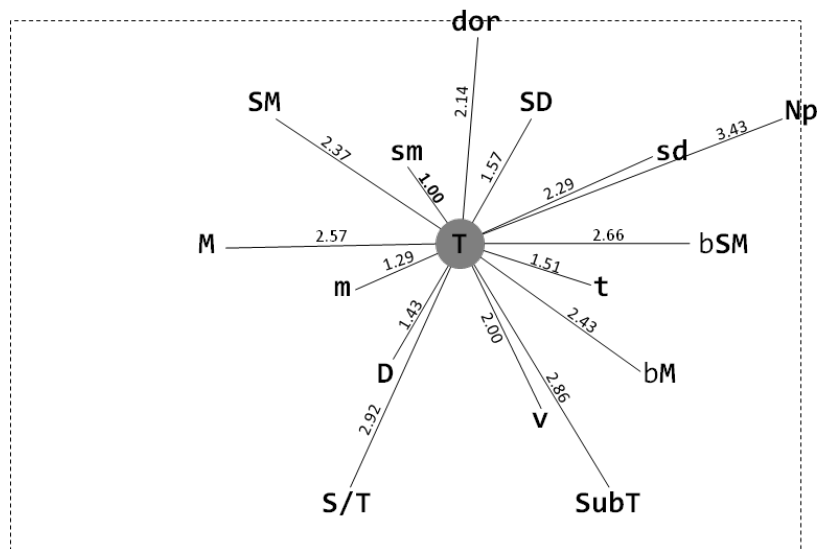


Fig. 5: Metrificação geométrica de distâncias entre uma tônica maior e regiões tonais a ela subordinadas (adaptado de KRUMHANSL, 1983: 55).

Tais distâncias foram então empregadas na elaboração do eixo vertical (y) do sistema bidimensional do gráfico a ser plotado. Buscando evitar sobreposições que pudessem prejudicar a clareza visual do gráfico, optou-se por diferenciar as distâncias das regiões entre “positivas” (aquelas posicionadas “à direita” da tônica no círculo das quintas, ou seja, **sm**¹⁷, **D**, **m**, **S/T**, **SM** e **M**) e “negativas” (“à esquerda”, **SD**, **dor**, **SubT**, **v**, **bM**, **t**, **bSM** e **Np**), em torno de um subeixo horizontal zerado em **T** (Fig. 6)¹⁸.

¹⁷ Mais precisamente, esta região não está “à direita” de **T**, e sim em sua mesma “longitude”, como sua relativa menor.

¹⁸ Um procedimento análogo (omitido neste artigo) foi adotado em relação a uma tônica em modo menor.

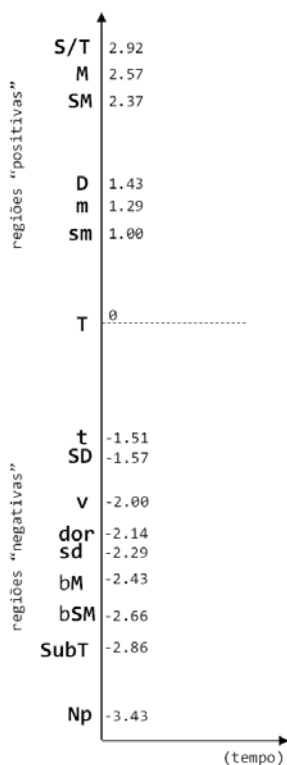


Fig. 6: Disposição das regiões “positivas” e “negativas” em torno da tônica no eixo vertical de plotagem.

A determinação das regiões contempladas durante a peça (e, conseqüentemente, das respectivas distâncias e sentidos no gráfico) é então efetuada a partir da conversão dos dados apresentados pela matriz AN (cf. Fig. 4). No caso do coral 4, foi obtido o seguinte caminho tonal: **T** (ponto de partida) – **SD** (fermata 1) – **D** (fermata 2) – **D** (fermata 3) – **dor**¹⁹ (fermata 4) – **T** (fermata final), cuja curva de contorno plotada é apresentada na Fig. 7.

¹⁹ Schoenberg não explicita em seu livro as razões de ter adotado a (enigmática) designação “dórica” (**dor**) para a região relativa menor da subdominante, em lugar de uma mais simples ou lógica (“supertônica menor”, **s/t**, ou ainda “submediante-da-subdominante”, **smSD**).

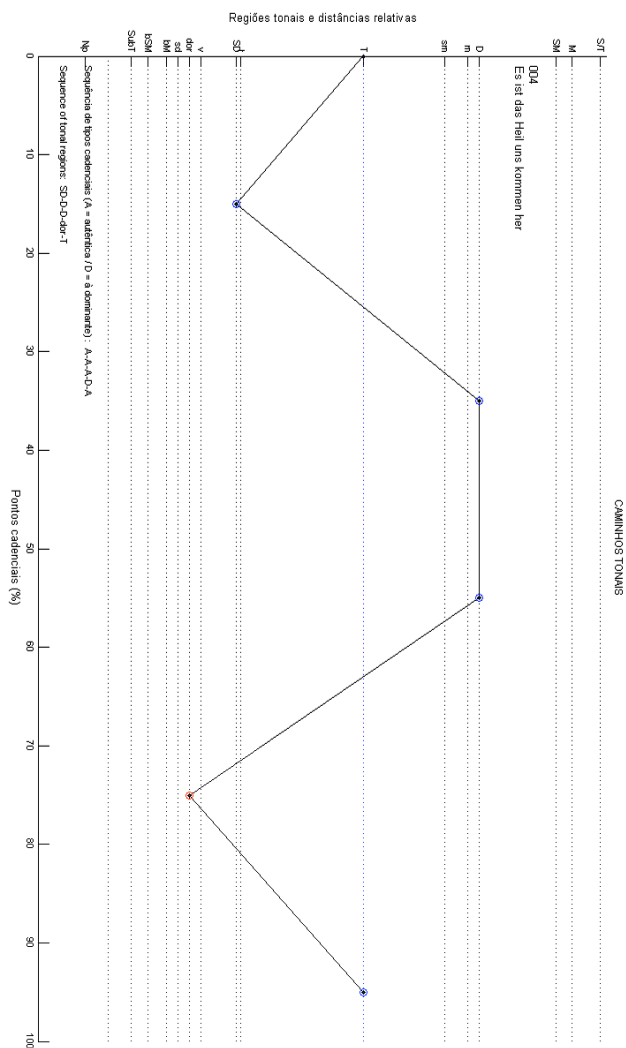


Fig. 7: Gráfico de contorno (caminho tonal) referente à análise em alto nível do coral 4 de Bach. Eixo horizontal: extensão do coral (em percentuais); eixo vertical: disposição das regiões tonais (de acordo com a Fig. 6); os pontos no gráfico indicam cadências.

O gráfico informa não apenas a sequência de regiões tonais detectadas pela análise, como os tipos cadenciais a elas associados: as cadências autênticas (A) são indicadas graficamente por círculos azuis e as cadências à dominante ("H", do inglês *half-cadences*, ou semicadências) por círculos vermelhos. Observe-se ainda que as posições das cinco cadências são indicadas no eixo horizontal (x) como distâncias proporcionais (percentuais do total), respectivamente, de modo a facilitar a comparação analítica futura entre corais de extensões diversas.

Tendo sido sumarizado o processo de implementação de *Chorale*, a próxima seção deste artigo aborda duas situações-problema pontuais surgidas posteriormente ao início de sua experimentação prática²⁰.

Casos especiais

A efetivação da fase de testes de *Chorale* correspondeu à sua aplicação na análise AN dos 20 primeiros corais do ciclo bachiano. Entre pequenas falhas operativas e imperfeições nos códigos componentes do programa, devidamente identificadas e retificadas, foram detectadas duas inconsistências mais expressivas associadas a situações que não haviam sido originalmente previstas, o que demandou adaptações dos algoritmos envolvidos no processo analítico. Tais situações podem ser relacionadas como se segue:

Terças de picardia. Alguns corais em modo menor concluem com o recurso estilístico da *terça de picardia*²¹, isto é, com a finalização em acorde tônico em modo maior. Sendo um maneirismo do período Barroco, foi necessário inserir no código do programa uma verificação para ocorrência desse tipo especial de cadência, com intuito de evitar uma interpretação analítica equivocada, já que na ausência de um tratamento excepcional, o acorde conclusivo seria considerado erroneamente como V da região subdominante menor. Como ilustração desse problema, a Fig. 8a apresenta a última frase do coral 8 (*Freut euch, ihr Christen*), em Fá menor²². Seguindo as etapas analíticas descritas, a abordagem básica atribuiria para a tríade maior de Fá que finaliza a peça três interpretações possíveis:

²⁰ Evidentemente, isto não esgota o quadro de possibilidades. Considera-se que outros casos eventualmente podem se apresentar em testes futuros e na própria efetivação do processo de análise (na verdade, considerando a quantidade de peças que compõem o ciclo dos corais, a ocorrência de novos problemas é quase inevitável).

²¹ Segundo Julian Rushton, autor do verbete "Tierce de Picardie", no dicionário *Grove Music Online*, o termo teria sido introduzido no séc. XVIII por Jean-Jacques Rousseau, em seu *Dictionnaire de Musique*.

²² A despeito da armadura de clave original, com três bemóis, sugerindo Mi, maior / Dó menor.

I/T (a opção correta), V/SD ou V/sd. Na falta de uma resposta inequívoca, *Chorale* passa para o estágio seguinte, da análise contextual, contemplando a frase que antecede a cadência. Após a operação de generalização, a busca por ocorrências de pc's 7 e 8 (Fig. 8b) induz (equivocadamente) à definição da análise, já que como ambos (neste caso, respectivamente, as notas Dó e Ré,) estão presentes na frase, o programa, de acordo com o algoritmo específico para a tarefa, interpreta o acorde conclusivo com um dominante de uma tonalidade menor, ou seja, Si₇ menor (contextualmente, a região sd). A definição da alternativa implica a interrupção do processo analítico, suspendendo a etapa seguinte, a busca pelos pc's 10 e 11²³.

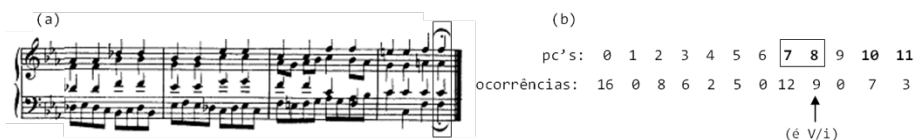


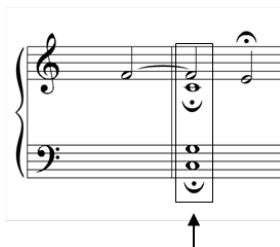
Fig. 8: AN da frase conclusiva do coral 8 (*Freut euch, ihr Christen*), em Fá menor.

Como solução para esse problema, foi implantada no código da etapa inicial de AN (ou seja, da determinação dos acordes cadenciais) uma linha verificadora que é acionada apenas em corais em modo menor. Em suma, o programa compara o acorde final da peça ao acorde tônico da tonalidade de referência previamente informada. Em caso de manutenção de suas fundamentais e alterações de suas terças (menor→maior), um desvio prioritário é acionado, evitando o processo de análise contextual e estabelecendo a ocorrência de terça de picardia. Sua indicação se apresenta convencionada no gráfico como se fosse uma “modulação” de surpresa (embora não o seja de fato) para a região homônima maior em relação à tônica (t→T), o que corresponde essencialmente ao efeito pretendido pelo compositor.

Suspensões. Outro recurso estilístico recorrente em conclusões cadenciais em corais é o emprego de suspensões de quarta (em geral, relacionada à terça de uma tríade maior). No processo analítico de *Chorale*, a ocorrência de uma suspensão em uma fermata causa problema para a detecção do modo do acorde, pois as indicações das conclusões cadenciais são associadas pelo programa a um ponto no tempo definido. Isto

²³ É interessante observar que, mesmo se tal busca fosse efetivada, o resultado neste caso seria também incorreto: de acordo com o protocolo adotado pelo programa, a maior ocorrência do pc 10 em relação ao 11 (7 contra 3) indicaria que o acorde conclusivo exerceria a função dominante de Si₇ maior.

significa que em um coral em compasso quaternário a localização informada de uma fermata (por exemplo, no c.4.3) seria computada como ocorrendo no ponto de tempo de número 15. Ou seja, o algoritmo seleciona apenas as alturas-midi presentes na coordenada informada, deixando de lado a resolução de uma eventual suspensão, que se dá em ponto temporalmente posterior (Ex. 4).



Ex. 4: Ocorrência de suspensão em uma cadência em um coral hipotético. Pc's detectados no ponto de tempo informado: 0 7 0 (impossível definir o acorde).

A solução encontrada foi inserir no código da análise de uma condição na etapa de identificação dos acordes, de maneira que em caso de não ser possível identificar a terça (maior ou menor) de um acorde posicionado na localização de fermata previamente informada, é caracterizada a exceção de suspensão. Um desvio obriga então o programa a prosseguir para o próximo ponto no tempo (ainda dentro do mesmo compasso), na busca da informação omitida. Com a identificação do acorde, seguem-se as etapas subsequentes.

Aplicação

Após uma minuciosa e cuidadosa fase de testes, a versão atual de *Chorale* (de número 9) foi considerada suficientemente estável. A comparação das análises em alto nível dos 20 primeiros corais bachianos realizadas pelo programa e por meios “convencionais” (ou seja, através da verificação da partitura pelo analista) revelou resultados quase idênticos²⁴, o que é no mínimo um sinal bastante promissor. É fato que tal universo corresponde apenas a uma pequena parcela do total de peças do conjunto (5,4 %), e que dificuldades eventuais podem ser esperadas no exame de casos mais complexos (o que afetaria igualmente a análise “humana”), a simplicidade da arquitetura básica do programa e

²⁴ Como única ressalva destacam-se três ocorrências da ambiguidade $[V/T = I/D]$, que seriam registradas na análise “humana” através do recurso da dupla interpretação. A criação de uma versão do programa que possa dar conta dessa situação e também produzir duas (ou mais) descrições analíticas equivalentes é uma das intenções da pesquisa para um futuro próximo.

da construção dos algoritmos responsáveis pelo processo analítico o tornam relativamente robusto para a solução de problemas pontuais e para os ajustes necessários (como os casos apresentados neste artigo).

Conclusões

Considera-se por hipótese de trabalho que a conclusão do processo de análise do ciclo completo de corais bachianos revelará um número limitado de padrões de sequências de regiões tonais, evidenciando procedimentos e escolhas no planejamento tonal do compositor para as diversas peças desse gênero, o que por sua vez poderá contribuir para uma ampliação do conhecimento de seu estilo criativo, abordando uma perspectiva não normalmente explorada. Acrescente-se que, além dos gráficos, a AN produz dados estatísticos (sobre tonalidades absolutas empregadas, posições de cadências, padrões de tipos cadenciais etc.) que serão gradualmente coletados a cada peça examinada e devidamente armazenados, visando à elaboração futura de um painel detalhado sobre o ciclo completo.

Como próxima etapa da pesquisa, pretende-se adaptar o processo analítico em alto nível especificamente delineado para as características estruturais de um coral a outros gêneros bachianos (suítes para teclado, por exemplo), com o principal intuito de investigar se haveria recorrência de padrões de organização tonal no estilo do compositor, independentemente dos parâmetros superficiais envolvidos (forma, extensão, instrumentação, textura, subestilo etc.).

Referências

ALMADA, Carlos de L.. A harmonia do coral *O Haupt voll Blut und Wunden*, de J. S. Bach, como meio expressivo na narrativa da Paixão de Cristo. In: XXI CONGRESSO DA ANPPOM, 2011. Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: UFU, 2011.

BACH, Johann S. *Chorale Harmonisations* (371 corais em versão para teclado, subdivididos em quarto partes). Leipzig: Breitkopf und Härtel, 1878.

Disponível em: <http://imslp.nl/imglnks/usimg/a/ac/IMSLP03820-4PC_1.PDF>;
<http://imslp.nl/imglnks/usimg/a/ac/IMSLP03820-4PC_2.PDF>;
<http://imslp.nl/imglnks/usimg/a/ac/IMSLP03820-4PC_3.PDF>;
<http://imslp.nl/imglnks/usimg/a/ac/IMSLP03820-4PC_4.PDF> . Acesso em: 13 jul. 2015.

BAROIN, Charles. The Planet-4D Model: an Original Hypersymmetric Music Space Based on Graph Theory. In: COLLINS, Tom; MEREDITH, David; VOLK, Anja. (Eds.) *Mathematic and Computation in Music*. Berlim: Springer, p. 326-329, 2011.

COHN, Richard. *Audacious Euphony: Chromaticism and the Triad's Second Nature*. Oxford: Oxford University Press, 2012.

FORTE, Allen. *The Structure of Atonal Music*. New Haven: Yale University Press, 1973.

KRUMHANS, Carol. Perceptual structures for tonal music. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, v.1, n.1, p. 28-62, 1983.

LERDAHL, Fred. *Tonal Pitch Space*. Nova York: Oxford University Press, 2001.

LEWIN, David. A Formal Theory of Generalized Tonal Functions. *Journal of Music Theory*, v. 26, n. 1, p. 23-60, 1992.

PURWINS, Hendrik. Profiles of Pitch Classes Circularity of Relative Pitch and Key – Experiments, Models, Computational Music Analysis, and Perspectives. Tese (Doutorado em Ciências Naturais), Universidade de Berlim, 2005.

RUSHTON, Julian, Tierce de Picardie. *Oxford Music Online*. Oxford: Oxford University Press, 2015. Disponível em:
<http://oxfordindex.oup.com/view/10.1093/gmo/9781561592630.article.27946?rskey=Yg70YJ&result=23> Acesso em: 2 de ago. de 2015.

SCHOENBERG, Arnold. *Structural Functions of Harmony*. (Leonard Stein, ed.) Nova York: W.W. Norton & Company, 1969.

_____. *Harmonia*. (Marden Maluf, trad.). São Paulo: Editora Unesp, 2001.

TEMPERLEY, David. *The Cognition of Basic Musical Structures*. Cambridge: The MIT Press, 2001.

WHITE, Christopher. A Corpus-Sensitive Algorithm for Automated Tonal Analysis. In: 3rd BIENNIAL CONFERENCE ON MATHEMATICS AND COMPUTATION IN MUSIC, 2015. Londres. *Anais...* Londres: Queen Mary University, 2015.

.....

Carlos de Lemos Almada é professor adjunto da Escola de Música da UFRJ, atuando como docente nos níveis de graduação e pós-graduação. Doutor e mestre em Música pela UNIRIO. Arranjador e compositor, com diversas obras apresentadas em edições da Bienal de Música Brasileira Contemporânea, bem como registradas em CD's pela gravadora Ethos Brasil. Pesquisador sobre variação musical, com vários artigos publicados em periódicos acadêmicos e em anais de congressos científicos, destacando-se: Genetic algorithms based on the principles of *Grundgestalt* and developing variation (2015), Evolution in Musical Contexts: The Software DARWIN (2015) e Simbologia e hereditariedade na formação de uma *Grundgestalt*: a primeira das *Quatro Canções* Op.2 de Berg (2013). Autor dos livros *Arranjo* (Editora da Unicamp, 2001), *A estrutura do choro* (Da Fonseca, 2006) e *Harmonia funcional* (Editora da Unicamp, 2009), bem como coautor de uma série de 12 livros sobre música popular brasileira, publicados entre 1998 e 2010 pela editora americana MelBay. carlosalmada@musica.ufrj.br