

Relação entre atributos acústicos e características arquitetônicas de salas de concerto aplicando o método da síntese da forma

The relationship between acoustic attributes and architectural features of a concert hall applying the synthesis of form method

Vanessa Fátima de Medeiros Takahashi
Stelamaris Rolla Bertoli

Resumo

O artigo apresenta as relações das características arquitetônicas com a qualidade sonora da sala de concerto da Filarmônica de Berlim. Este estudo foi realizado por meio do método da síntese da forma proposto por Alexander, constituindo-se na primeira desta metodologia em projetos acústicos. A utilização desse método como uma ferramenta de análise procura compreender as soluções adotadas por cada projetista no desenvolvimento do projeto, e com isso otimizar o processo de projeto, tornando-o mais claro e menos dependente da tentativa e erro. Por meio dessa metodologia conseguiu-se estabelecer uma hierarquia de relações e de dependência das características do projeto arquitetônico da Filarmônica de Berlim. O resultado dessa hierarquia permitiu entender como o projeto se articula e como uma determinada característica arquitetônica influi no resultado da acústica da sala. Essa otimização do processo de projeto busca melhorar o diálogo e o desempenho da equipe envolvida no projeto, assim como evitar erros dispendiosos já que o processo se torna mais transparente.

Palavras-chave: Sala de concerto. Método de projeto. Acústica.

Abstract

This article discusses the influence of architectural design on the acoustic quality of the Berlin Philharmonic concert hall. This study was carried out using the methodology "Notes on the synthesis of form" proposed by Alexander (1977). This is the application of this methodology in acoustic design. The study seeks to understand the solutions adopted by each designer during the development of the design, hence optimizing the design process, making it more transparent and less dependent on trial and error. This methodology showed a hierarchy of relationships and dependency of the characteristics of the design of the Berlin Philharmonic. The result of this hierarchy helped to understand how the design is articulated and how particular design solutions influence the acoustics of the room. This optimization of the design process seeks to improve communication and the performance of the team involved in the design, as well as to avoid costly mistakes, as the process becomes more transparent.

Keywords: Concert hall. Design Methods. Acoustic.

Vanessa Fátima de Medeiros
Takahashi
Departamento de Arquitetura e
Construção
Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 951, Barão
Geraldo
Caixa-Postal 6021
Campinas - SP - Brasil
CEP 13083-970
Tel.: (19) 3521-2382
E-mail: takahashi.van@gmail.com

Stelamaris Rolla Bertoli
Departamento de Arquitetura e
Construção
Universidade Estadual de Campinas
E-mail: rolla@fec.unicamp.br

Recebido em 01/10/11

Aceito em 17/01/12

Introdução

Salas de concerto são ambientes que primam por qualidade sonora, e suas características arquitetônicas influenciam seu desempenho acústico. Essas salas devem atender a requisitos específicos para uma acústica adequada, permitindo que o som se propague em todo o ambiente, de forma uniforme, bem definido em suas características e preservado em sua forma original.

Segundo Barron (1993), em cada período da história, a música (barroca, gótica, clássica, popular e contemporânea) foi concebida para ser executada em um tipo de espaço, cada qual com características diferentes, como a reverberação. Muitas vezes os compositores criavam peças musicais pensando em um ambiente específico para sua execução, refletindo o desejo desses compositores de obter uma magnitude sonora com sua obra. Segundo Beranek (2004), a qualidade acústica das salas de concerto depende de vários fatores, como tamanho, materiais absorventes, refletores e difusores, irregularidades das paredes e do teto, balcões, quantidade de pessoas presentes, controle do ruído e, principalmente, geometria e volumetria. Por isso é importante que conceitos de arquitetura e de acústica formem um único corpo, de forma que a arquitetura possa contribuir para a qualidade acústica desses espaços.

Para avaliar a qualidade acústica dessas salas foram criados diversos parâmetros objetivos e atributos subjetivos que buscaram relacionar acusticamente a orquestra, o público e a sala. Segundo Passeri (2008), os parâmetros objetivos da qualidade sonora de salas são definidos como índices numéricos mensuráveis que estão correlacionados com os atributos subjetivos e podem descrever as qualidades acústicas de ambientes, reais ou virtuais. Beranek (2004) apresenta alguns atributos subjetivos considerados por ele essenciais para a qualidade acústica de uma sala de concerto. São eles:

- (a) vivacidade;
- (b) calor;
- (c) brilho;
- (d) clareza;
- (e) intimidade;
- (f) audibilidade;
- (g) impressão espacial; e
- (h) envolvimento.

Esses atributos subjetivos relacionam-se com parâmetros acústicos objetivos.

Siebein e Kinzey Junior (1999) apontam que pesquisas na área das relações dos parâmetros de qualidade acústica e características físicas da sala são essenciais para a continuidade da melhoria do desempenho acústico e do processo de projeto de salas de concerto. Muitas pesquisas na área de acústica de salas de concerto têm diminuído o risco de erros de projeto, mas ainda não o eliminou completamente (MARSHALL; KLEPPER, 1999). A concepção das salas é parte primordial quando se fala em qualidade acústica e deve vir associada a uma metodologia projetual em que parâmetros acústicos possam ser utilizados como requisitos fundamentais à criação arquitetônica, facilitando a relação acústica-arquitetura.

Um papel importante da metodologia de projeto é tornar o processo transparente, de forma que toda a equipe envolvida nele possa saber o que está acontecendo, para contribuir com informações e ideias que estão fora do conhecimento e experiência do projetista. O alto custo de erros de projeto, particularmente em casos de sistemas complexos, é um forte incentivo para externalizar o pensamento de projeto porque somente dessa maneira o pensamento pode ser submetido a crítica e a teste antes que erros dispendiosos sejam cometidos (JONES, 1969).

A discussão sobre métodos de projeto surgiu após a Segunda Guerra Mundial e deu origem ao Movimento dos Métodos de Projeto (*Design Methods*). Esse interesse de sistematizar o processo de projeto ocorreu devido ao surgimento de novos problemas a serem resolvidos e da maior complexidade dos projetos. A necessidade de administrar grandes equipes de projeto interdisciplinares para lidar com a troca de informações sobre a definição do problema e soluções cada vez mais complexas foi outro fator determinante para essa sistematização.

No campo da arquitetura também ocorreu o aumento do número de informações a serem tratadas. Diversos fatores como legislação, conforto acústico, térmico e lumínico, sustentabilidade, normas técnicas, entre outros, passaram a ser considerados. O projeto passa a ter maior grau de complexidade e, com isso, a necessidade de equipes multidisciplinares trabalharem de forma integrada, cujas decisões tomadas possam ser públicas a todos os membros da equipe, e não privadas ao pensamento de um só projetista.

Os primeiros métodos sistemáticos de projeto, segundo Jones (1963), procuraram integrar duas abordagens:

(a) a do método tradicional, com base na intuição e experiência; e

(b) a do método do rigor matemático e lógico.

Com a integração pretendeu-se reduzir erros de projeto e tornar o projeto mais imaginativo e avançado. Esses métodos não tinham a intenção de substituir todos os aspectos do projeto convencional e reconheciam que aspectos de pensamento intuitivos e irracionais desempenhavam seu papel dentro de projetos lógicos e procedimentos sistemáticos.

Os métodos sistemáticos têm em comum ênfase inicial na extensiva exploração e análise do problema para identificar todos os fatores intrínsecos, seguida pelo estabelecimento de interconexões entre os fatores, de modo a identificar todos os subproblemas. Esses métodos utilizam a abordagem de primeiramente “quebrar” o problema original em subproblemas. Para cada subproblema, uma série de soluções possíveis é “armazenada”. Em seguida é sintetizada uma solução global, a partir da combinação das soluções parciais, diferentemente do que ocorre num processo tradicional, em que, nos estágios iniciais, as soluções para os diferentes níveis são tomadas sequencialmente.

Um dos métodos sistemáticos desenvolvidos na década de 70 foi o método proposto por Alexander em “*Notes on the synthesis of form*”, que descreve um modo de representar um problema (ou um projeto) de maneira que fique mais fácil sua resolução, reduzindo a lacuna entre a pequena capacidade do projetista e o grande tamanho e complexidade de seu trabalho (ALEXANDER, 1977). O método colabora para uma maior clareza nas decisões de projeto a serem tomadas, a partir da análise de requisitos funcionais de um projeto. É um processo que dá ênfase na extensiva exploração e análise do problema para identificar todos os fatores intrínsecos, seguido pelo estabelecimento de interconexões entre os fatores. Esse procedimento procura identificar todos os subproblemas e desenvolver uma série de soluções possíveis, que podem ser combinadas de diferentes formas e sintetizadas numa solução global.

O processo da síntese da *forma* procura identificar e projetar um “componente físico”, ou seja, parte de uma estrutura física maior, que pode ser um edifício numa cidade ou partes do edifício. Esses componentes devem ser independentes, para que possam ser alterados, modificados ou corrigidos, sem modificar o desempenho de outros elementos. Para identificar esses componentes, Alexander utilizava o computador para determinar o grau de independência entre eles (MOREIRA, 2007).

Conceitos dessa metodologia podem ser aplicados no projeto arquitetônico descrevendo a concepção dos espaços físicos. Esses conceitos são forma, contexto, conjunto e ajuste. A forma é o resultado do processo de projeto. Os problemas são identificados como requisitos funcionais aos quais a forma deverá responder. O contexto é a situação que envolve o projeto e o ambiente em que ele está inserido. Podem ser características geográficas, culturais, preferências dos usuários. O conjunto é constituído pela forma mais o contexto. Por fim, o ajuste é a adequação da forma ao contexto. Um conjunto bem ajustado significa que a forma responde eficientemente ao contexto.

Para solucionar conflitos que surgem quando partes do conjunto começam a interferir na função de outras partes, Alexander propôs decompor esse conjunto em subsistemas independentes. Dessa forma, cada subproblema passa a ter sua independência dos outros subproblemas, que podem ser resolvidos independentemente, ou seja, se houver uma alteração do contexto não será necessário alterar toda a forma (ALEXANDER, 1977).

Alexander (1977) refere-se a programa como cada decomposição adequada a resolver determinado problema. Esse programa é uma atividade analítica e fornece indicações ou instruções para o projetista, como a divisão em subconjuntos reunindo elementos principais, com os aspectos do problema que ele deve resolver. O programa é uma estrutura hierárquica que traduz dados do contexto em requisitos funcionais e que vai permitir uma projeção futura. O programa é uma análise do contexto, onde os problemas vão sendo subdivididos em partes menores para, posteriormente, ser solucionados em pequenas partes. Por sua vez, o diagrama dessas soluções vai-se reagrupando num processo de síntese para dar origem ao projeto. Esses dados podem ser estruturados graficamente em formas de árvores. Colocar os dados do contexto, traduzidos em requisitos funcionais, num gráfico desses é conseguir uma estrutura racional, organizada, e identificar suas ligações mais importantes. Assim o sistema (totalidade de dados coletados do contexto) poderá ser analisado para identificar seus subsistemas e a independência entre eles. Cada ramo do gráfico em árvores pode ser entendido como um subconjunto (MOREIRA, 2007).

Para fazer a divisão dos requisitos funcionais em subconjuntos, Alexander propõe uma análise matemática que identifica os subconjuntos mais importantes e com menor grau de ligação, dividindo-os em dois, dependendo da quantidade de ligações existentes em cada subconjunto. Esses sistemas são razoavelmente independentes. Essa

decomposição hierárquica de sistemas é feita por meio de um programa de computador denominado HIDECS (*Hierarchical Decomposition of Systems*).

O programa computacional HIDECS foi desenvolvido por Alexander e reconstituído por Moreira (2007) em sua tese de doutorado a partir de relatórios de pesquisa de Alexander, publicados em 1963. Os relatórios continham os procedimentos de cálculo utilizados para fazer a decomposição de sistemas da segunda versão do programa (HIDECS 2). Segundo Moreira (2007), a importância dessa decomposição é que, se o programa conseguir identificar subsistemas independentes, uma alteração do contexto ou um problema de desempenho do edifício poderá ser solucionado sem que outros subsistemas tenham de ser modificados.

O desafio deste trabalho foi investigar se o método proposto por Alexander para desenvolver projetos complexos como, por exemplo, os arquitetônicos poderia ser aplicado na análise acústica de projetos de salas de concerto.

Dessa forma, o método foi adaptado para funcionar como uma ferramenta de análise dos projetos da sala de concerto e busca estudar as relações existentes entre as características arquitetônicas e a acústica da sala, estruturando requisitos funcionais do projeto, além de verificar como a forma (resultado do processo de projeto) responde a determinado contexto. Tendo conhecimento de como o projeto articula-se, ou seja, como uma característica do contexto influi na forma, pode-se alterar somente uma pequena parte do projeto, sem a necessidade de alterar o todo. Com isso otimiza-se o processo de um novo projeto ou de uma reforma.

O objetivo do trabalho é mostrar a aplicabilidade da ferramenta computacional de Moreira (2007) baseada em Alexander (1977), em um estudo de caso do projeto arquitetônico e acústico da sala de concerto da Filarmônica de Berlim.

Método

A aplicação do método da síntese da forma é analisar o projeto arquitetônico por meio de um contexto que é descrito em requisitos funcionais, identificar a origem das soluções geradas por cada requisito, a forma, identificando quais as características das salas que são mais independentes e com maior importância. Como estudo de caso para a aplicação do método foi escolhida a sala de concerto da Filarmônica de Berlim. A escolha da sala foi feita com base na quantidade de informações do processo de projeto,

das características arquitetônicas, construtivas e de medições acústicas obtidas a partir de importantes referências na literatura, como Beranek (2004), Long (2006), Ishikawa (1997) e Barron (1993).

O estudo foi realizado em três etapas. A primeira etapa consistiu no levantamento de dados feitos a partir de referências bibliográficas da acústica arquitetônica. Nessa etapa foram coletadas informações do processo de projeto, das características arquitetônicas e construtivas, e sobre medições acústicas.

Na segunda etapa foi realizada a organização desses dados segundo uma estrutura proposta por Alexander e descrita por Jones (1976), para posterior aplicação do método da síntese da forma. Essa estrutura baseava-se em dois pontos:

- (a) identificar todos os requisitos que influenciam na forma física de uma estrutura; e
- (b) decidir se existe independência ou não entre cada par de requisitos e registrar cada escolha numa matriz de interações.

Para essa etapa foi utilizada uma base de dados programada em Microsoft Access, chamada de Sinforma e desenvolvida por Moreira (2007). Essa base está dividida em três partes:

- (a) a primeira reúne informações sobre o projeto;
- (b) a segunda relaciona as informações; e
- (c) a terceira classifica os dados.

Moreira (2007) ressalta que o usuário do programa é responsável pela inserção dos dados e pela decisão de como eles se relacionam.

A interface do Sinforma é dividida em três regiões. Na primeira é onde o usuário insere dados do contexto; na segunda é onde insere os dados dos requisitos funcionais; e na terceira região são inseridos os dados da forma.

Para análise do método de projeto de salas de concerto traduziram-se os conceitos da síntese da forma em:

- (a) contexto: os atributos subjetivos, ou seja, quais são as sensações que o projetista quer passar aos usuários;
- (b) requisito funcional: os aspectos que o projeto deverá responder; e
- (c) forma: as soluções encontradas pelos projetistas.

As propriedades da forma são definidas durante o projeto, e os requisitos funcionais registram os objetivos e as origens de cada solução. No caso de uma sala de concertos, por exemplo, pode-se dizer que a planta de uma sala com palco no centro, ou a

distância entre plateia e orquestra menor que 30 m poderiam responder a um requisito funcional, como aproximar a plateia da orquestra, traduzido pelo contexto do atributo subjetivo da intimidade na sala.

A terceira etapa do estudo da sala de concerto é a decomposição da matriz de relações entre requisitos funcionais geradas pela base de dados em conjuntos que estejam internamente conectados por meio do programa de computador HIDECS.

O programa de computador utiliza o arquivo *.txt* gerado pela base de dados do Sinforma com a relação entre todos os requisitos funcionais e divide esse conjunto sempre em dois subconjuntos. As divisões que ocorrem vão transformando o sistema em subsistemas independentes até que não possam mais ser subdivididos. Segundo Moreira (2007), isso acontece porque o submódulo HIDECS esgota todas as possibilidades de divisão do conjunto de ligações entre requisitos funcionais, encontrando a divisão que retorna o menor valor para a equação utilizada pelo programa, ou seja, seleciona a divisão que apresenta o melhor fator de independência.

Realizadas as divisões, pode-se analisar os subgrupos formados, sua hierarquia, qual sua proximidade com os outros grupos e qual o fator em comum entre eles. Como aponta Moreira (2007), o projetista deve considerar que esses subsistemas são sobrepostos, ou seja, os subconjuntos menores encontrados pelo programa estão contidos em subconjuntos maiores, compondo um sistema maior e completo.

Estudo de caso: Filarmônica de Berlim

A sala de concerto da Filarmônica de Berlim é obra do arquiteto Hans Scharoun e foi inaugurada em 1962, na Alemanha. A concepção inicial do arquiteto era colocar a plateia em volta da orquestra, remetendo aos círculos de pessoas que se formam em volta do músico para escutar uma música informalmente. Essa concepção foi

contestada pelo consultor acústico do projeto Lothar Cremer, mas que, por insistência do arquiteto, acabou aceitando o desafio de fazer dessa sala inovadora uma sala com uma ótima acústica. Barron (1993) coloca que as duas grandes preocupações no projeto da sala de Berlim eram em relação à direcionalidade dos instrumentos e às superfícies necessárias para refletir os sons iniciais.

Beranek (2008) descreve algumas orientações iniciais do consultor acústico ao arquiteto. Uma delas era tentar desenvolver características arquitetônicas que maximizassem a qualidade acústica de um som envolvente na sala. Para isso ele planejou o volume da sala para alcançar um tempo de reverberação em torno de 1,9 s, que se aproximava dos valores encontrados nas salas de concerto da Europa. Também outra orientação é que o público fosse dividido em blocos envoltos por parede, para que essas paredes pudessem refletir o som inicial nas posições dos ouvintes. De forma complementar, o teto foi desenvolvido para refletir o som inicial.

O local de implantação da Filarmônica de Berlim fica no centro cultural de Berlim, rodeado por grandes avenidas que não possuem tráfego intenso. O edifício apresenta recuos grandes para proteção acústica. Tanto a sala de concerto (sala principal) quanto a sala de música de câmara estão envolvidas e protegidas pelas outras partes do edifício.

A sala principal possui capacidade para 2.218 pessoas, sendo 250 atrás do palco, 300 em cada lado e 1.368 na frente do palco, com volume de 21.000 m³. Nenhum espectador fica a mais de 30 metros do palco. A plateia está dividida em blocos. As partes frontais desses blocos fornecem reflexões iniciais tanto para a plateia principal quanto para o palco. A Figura 1 mostra a vista interior da sala de concerto da Filarmônica de Berlim. A Figura 2 apresenta o formato da sala em planta, e a Figura 3, o corte esquemático da sala, onde se pode ver a divisão da plateia em blocos.



Figura 1 - Vista da sala de concertos
Fonte: Berliner Philharmoniker (2011).

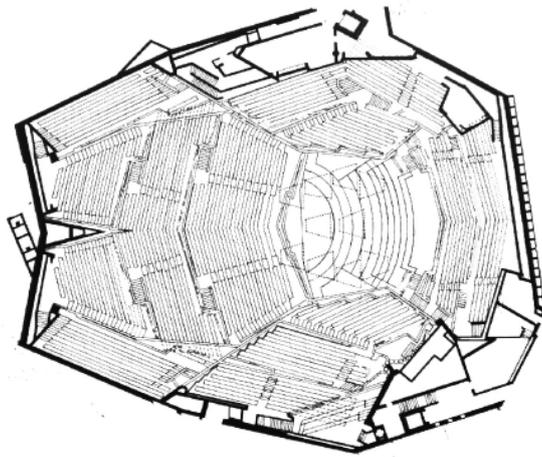


Figura 2 - Planta esquemática da Filarmônica de Berlim
Fonte: Beranek (2004).

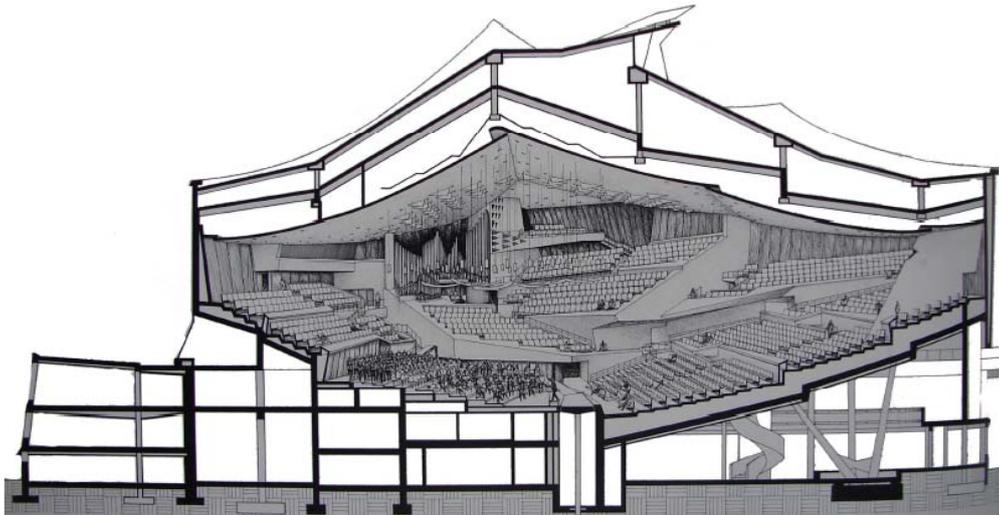


Figura 3 - Corte esquemático da Filarmônica de Berlim
Fonte: Beranek (2004).

O palco tem piso de madeira, altura de 76 cm e paredes laterais arrançadas para refletir o som de volta para os músicos. A inclinação e a altura dos degraus dos patamares do palco foram determinadas acusticamente (Figura 4). Outra característica do palco é a flexibilidade dos patamares dele, uma importante preocupação do arquiteto, que procurou criar um espaço apropriado para apresentações de música contemporânea. Segundo Beranek (2008), a escolha do revestimento para as paredes do palco foi baseada em determinações acústicas fornecidas por Cremer e Scharoun. As paredes de madeira Kambala perfurada com orifícios minúsculos são fixadas e preenchidas com um material absorvente acústico para eliminar os efeitos de eco em uma parte do palco.

As cadeiras possuem alturas variadas do encosto, e a parcela de tecido que cobre os assentos absorve o som. Ambas as soluções são destinadas a reduzir a diferença acústica devido à variação do número de pessoas entre os ensaios e os concertos.

No teto, o forro suspenso é de gesso. A altura do teto foi determinada de acordo com a exigência acústica de 10 m³ de espaço aéreo por assento. Sua forma é uma reminiscência de uma tenda com seus três arcos abobadados convexos, o que garante uma difusão uniforme do som. Sobre o palco da orquestra existem dez painéis trapezoidais de poliéster, com 7,5 m² cada, com 50% de área livre entre eles, altura variável de 10 m a 12 m, que servem como refletores, permitindo que os músicos ouçam melhor uns aos outros. O teto também apresenta 136 pirâmides, que servem como ressonadores para controlar os sons graves. O conjunto dessas 136 pirâmides também funciona como um painel difusor. A Figura 5 mostra a vista

do teto da sala de concerto da Filarmônica de Berlim.

Resultados e discussão

A análise do projeto da sala de concerto da Filarmônica de Berlim gerou parte dos requisitos funcionais, principalmente em decorrência da descrição da forma, e outra parte dos requisitos foi identificada no processo de projeto descrito por Beranek (2008). A partir disso foram estabelecidos e listados o contexto (representado por parâmetros subjetivos e o que se espera do desempenho da sala), os requisitos funcionais (a tradução desse contexto) e a forma (características físicas da sala que respondem ao contexto). A seguir é apresentado o conjunto geral dos princípios da síntese da forma relativos ao contexto, requisito funcional e forma. Da organização dos dados do estudo de caso da sala de concerto Filarmônica de Berlim foram identificados 11 contextos, 26 requisitos funcionais e 32 formas, conforme segue:

(a) contexto:

- C1: intimidade;
- C2: envolvimento;
- C3: clareza;
- C4: vivacidade;
- C5: audibilidade;
- C6: calor;
- C7: brilho;
- C8: espacialidade;
- C9: conjunto;
- C10: localização da fonte sonora; e
- C11: ruído de fundo.



Figura 4 - Vista do palco

Fonte: Berliner Philharmoniker (2011).



Figura 5 - Vista do teto da sala de concertos

Fonte: Berliner Philharmoniker (2011).

(b) requisito funcional:

- RF1: estabelecer um senso de proximidade com a fonte. Aproximar a plateia da orquestra;
- RF2: fazer com que o tempo entre o som que chega diretamente à plateia e sua primeira reflexão seja curto;
- RF3: propiciar que as reflexões iniciais cheguem logo após o som direto;
- RF4: que a plateia receba o som na direção lateral nos primeiros 80 ms;
- RF5: propiciar a difusão do som;
- RF6: dar à plateia noção de intensidade sonora;
- RF7: propiciar a reflexão do som;
- RF8: prolongar o tempo de decaimento sonoro na sala;
- RF9: fazer com que a sala tenha dimensões “pequenas”;
- RF10: propiciar a absorção sonora;
- RF11: propiciar a adequada coloração;
- RF12: garantir que a plateia perceba os sons graves;
- RF13: garantir que a plateia perceba os sons agudos;
- RF14: criar na plateia sensação acústica espacial do ambiente;
- RF15: fazer com que os músicos possam se escutar;
- RF16: garantir uma linha de visão entre fonte e receptor;
- RF17: colocar elementos que possam atenuar a transmissão de energia de um ambiente para outro;
- RF18: que o tamanho aparente da fonte seja adequado (*Apparent Source Width*);

- RF19: manter o mínimo de pessoas atrás da orquestra;
- RF20: implantação em local não muito ruidoso;
- RF21: reduzir a discrepância entre a acústica da sala com sala cheia nos concertos e vazias nos ensaios;
- RF22: flexibilidade para atender a músicas contemporâneas;
- RF23: fazer que os sons dos instrumentos não atrapalhem os outros músicos;
- RF24: ter um adequado volume por pessoa;
- RF25: ter local para o coro; e
- RF26: eliminar os efeitos de eco em uma parte do palco.

(c) forma:

- F1: planta com palco no centro;
- F2: distância entre orquestra e plateia menor que 30 m;
- F3: plateia e orquestra no mesmo volume;
- F4: máximo de 270 lugares atrás da orquestra;
- F5: plateia dividida em blocos (vinhas);
- F6: textura nas superfícies da sala;
- F7: forro suspenso de gesso sobre metal expandido;
- F8: painel suspenso sobre palco;
- F9: paredes laterais: fina madeira;
- F10: parapeitos: Jurassic Limestone Plaster;
- F11: piso da audiência de parquet sobre base de asfalto;
- F12: capacidade de 2.218 lugares;
- F13: alturas variadas do encosto e do tecido absorvente que cobre a parte inferior dos assentos;

		Requisitos Funcionais																									
		RF1	RF2	RF3	RF4	R-5	RF6	RF7	RF8	RF9	RF10	RF11	RF12	RF13	RF14	RF15	RF16	RF17	RF18	RF19	RF20	RF21	RF22	RF23	RF24	RF25	RF26
Requisitos Funcionais	RF1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
	RF2	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF3	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	RF5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF6	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	RF7	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	RF8	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	RF9	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	RF10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	RF11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	RF12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF14	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	RF15	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
	RF16	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	RF17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	RF18	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF19	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	RF20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF21	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	RF23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	RF24	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RF25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	RF26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Figura 7 - Matriz de relação entre requisitos funcionais

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos na decomposição dos 26 requisitos funcionais em subgrupos por meio do programa computacional HIDECS, em forma de diagrama de árvore. Os dados inseridos no programa de decomposição são informados por um arquivo .txt gerado pela base de dados que contém todas as informações de requisitos funcionais, formas, contexto e todas suas ligações. O conjunto com os 26 requisitos funcionais encontra-se no topo do diagrama da Figura 8. Quando é realizada a primeira divisão pelo programa, são gerados dois subgrupos, como se pode observar na primeira linha da Figura 8. Ao subdividir o ramo formado à esquerda (segunda divisão), obtêm-se mais dois subgrupos, o grupo que identificamos como B e mais um ramo à direita. A divisão do grupo B finaliza-se nesse ponto pela análise das autoras porque o programa começa a tirar somente um elemento nas próximas divisões. Isso não foi considerado interessante porque não eram mais grupos semelhantes formando-se, mas somente elementos isolados. As divisões cessam porque o submódulo HIDECS esgota todas as possibilidades de divisão do conjunto de ligações entre requisitos funcionais, encontrando a divisão que retorna o menor valor para a equação utilizada pelo programa, ou seja, seleciona a divisão que apresenta o melhor fator de independência. Ainda nessa segunda divisão no grupo da direita ocorre mais uma divisão (terceira divisão), quando é formado o grupo E. Pela mesma razão que não foram consideradas mais divisões no grupo B, não serão consideradas também no grupo A.

Ainda na Figura 8, no subgrupo formado na primeira divisão no ramo à direita, ocorrem ainda duas divisões para obterem-se os subgrupos que

não conseguem mais se dividir. Nessa terceira divisão encontramos, então, o ramo que se divide nos subgrupos C e D, e o ramo que se divide nos subgrupos G e F.

Observa-se nas divisões e na organização dos subgrupos em diagrama de árvore da Figura 8 a relação hierárquica entre os requisitos funcionais do estudo de caso proposto, onde foram encontrados sete subsistemas mais independentes entre si (marcados com símbolo vermelho), mas que descendem sempre de um subgrupo maior. Analisando os sete subsistemas que se formaram a partir da decomposição feita pelo programa e descritos no Quadro 1, pode-se perceber a formação de grupos com qualidades acústicas semelhantes, mas que geram características físicas diferentes na sala.

O Quadro 1 apresenta os sete subgrupos independentes (denominados por letras maiúsculas), resultantes da divisão obtida pelo programa.

Analisando especificamente o conteúdo dos subgrupos, percebe-se que os subgrupos A e E estão relacionados a requisitos funcionais que descrevem propriedades que geram um maior intimismo na sala, fazendo com que a plateia sintase mais próxima da orquestra. Entretanto, o grupo A refere-se à experiência do público com a sala (no caso, seu dimensionamento), e o grupo E refere-se à relação do público com a apresentação (como o público percebe a intensidade sonora na sala).

Ainda nesta análise verifica-se que subgrupo B tem sua origem nas propriedades que a sala tem para gerar uma sensação espacial do ambiente e fazer com que os ouvintes sintam-se imersos na

música. Está relacionado às reflexões iniciais na direção lateral e à difusão sonora provenientes, respectivamente, das paredes que envolvem os blocos da plateia e dos elementos difusores como o painel de pirâmides no teto.

Os grupos A, B e E descendem de um mesmo grupo como se pode observar na Figura 6.

Analisando os requisitos funcionais desses grupos segundo o Quadro 1, observa-se que o fator comum entre esses três grupos está relacionado às reflexões iniciais, favorecidas pelas paredes que envolvem a plateia e pelas curtas distâncias que o som tem de percorrer.

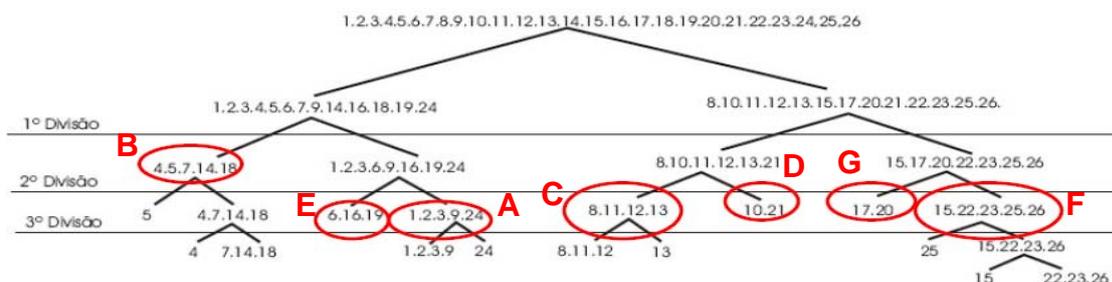


Figura 8 - Diagrama em árvore dos requisitos funcionais

Requisitos Funcionais	Grupo
RF1 - Estabelecer senso de proximidade com a fonte. Aproximar a plateia da orquestra.	A
RF2 - Fazer com que o tempo entre o som que chega diretamente na plateia e a sua primeira reflexão seja curto.	
RF3 - Propiciar que as reflexões iniciais cheguem logo após o som direto.	
RF9 - Fazer com que a sala tenha dimensões "pequenas".	
RF24 - Ter um adequado volume por pessoa.	
RF4 - Plateia receba o som na direção lateral nos primeiros 80 ms.	B
RF5 - Propiciar a difusão do som.	
RF7 - Propiciar a reflexão sonora.	
RF14 - Criar na plateia uma sensação acústica espacial do ambiente.	C
RF18 - Tamanho aparente da fonte seja adequado (Apparent Source Width).	
RF8 - Prolongar o tempo de decaimento sonoro na sala.	
RF11 - Propiciar a adequada coloração.	
RF12 - Garantir que a plateia perceba os sons graves.	D
RF13 - Garantir que a plateia perceba os sons agudos.	
RF10 - Propiciar a absorção do som.	E
RF21 - Reduzir a discrepância entre a acústica da sala cheia nos concertos e vazia nos ensaios.	
RF6 - Dar à plateia a noção de intensidade sonora.	
RF16 - Garantir uma linha de visão entre fonte e receptor.	F
RF19 - Manter o mínimo de pessoas atrás da orquestra.	
RF15 - Fazer como que os músicos possam se escutar.	
RF22 - Flexibilidade para atender música contemporânea.	
RF23 - Fazer com que os sons dos instrumentos não atrapalhem os outros músicos.	G
RF25 - Ter local para o coro.	
RF26 - Eliminar os efeitos do eco em uma parte do palco.	G
RF17 - Colocar elementos que possam atenuar a transmissão de energia de um ambiente para o outro.	
RF20 - Implantação num local não muito ruidoso.	G

Quadro 1 - Subgrupos formados

Os subgrupos C e D têm sua origem funcional no prolongamento do som na sala e nos ajustes para se conseguir um adequado tempo de reverberação. O grupo C está relacionado ao modo de como se controla a coloração no ambiente por meio de materiais absorventes contidos no projeto arquitetônico da sala e de como a reverberação também mudará em função das escolhas desses materiais. Essa coloração vai influir no modo em que o ouvinte percebe tanto os sons graves quanto os agudos durante as apresentações na sala. Já o grupo D está relacionado à possibilidade de se deixar o tempo de reverberação da sala igual, estando ela vazia ou cheia. O subgrupo F está relacionado a propriedades da área de apresentação (palco) que vão influenciar na percepção dos músicos. E, finalmente, o subgrupo G tem sua origem na interferência de ruídos externos no interior da sala.

Conclusões

O método proposto por Alexander apresentado neste trabalho, originalmente não foi concebido para uma análise acústica de salas, mas sim como método para desenvolvimento de projetos complexos. A aplicação desse método como uma ferramenta de análise da acústica de salas de concerto, realizado no estudo de caso da Filarmônica de Berlim, mostrou resultados interessantes, identificando elementos fundamentais do projeto arquitetônico que contribuíram para compreender as soluções adotadas por cada projetista. Os resultados mostraram que o método é indicado para essa finalidade. A aplicação do método pôde estender-se a outras salas de concerto, conforme pode ser visto em Takahashi (2010).

A aplicação desse método respondeu a três questões importantes que ajudam na compreensão da relação dos requisitos acústicos com requisitos arquitetônicos. O primeiro ponto é que o método permite identificar subgrupos que contêm elementos mais conectados entre si e com menor grau de ligação com outros subgrupos, ou seja, formam grupos menos dependentes uns dos outros. O segundo ponto é a utilização desse método como possibilidade de ter a visão do sistema como um todo, porque, muitas vezes, as redes de ligações dos elementos do projeto são tão complexas que o projetista é incapaz de percebê-las. E o terceiro ponto é a relação hierárquica entre requisitos funcionais por meio do diagrama de árvore. Essa relação mostra proximidade em alguns subgrupos que descendem de um mesmo grupo, o que indica um fator comum a esses grupos. Essa proximidade ocorre porque um grupo menor sempre estará contido num grupo maior para compor um sistema

completo. A aplicação desse método poderá ser usada em novos projetos ou reformas de salas de concerto.

A relação hierárquica, obtida pela divisão dos subgrupos empregando o programa de computador HIDECS, também apresentou uma previsão de quais qualidades acústicas podem ser alteradas se houver uma mudança no contexto ou na forma. Essa relação de dependência apontada pela aplicação dessa metodologia ocorre porque cada característica física da sala está relacionada a um parâmetro acústico que influencia a qualidade acústica final da sala de concerto.

Neste trabalho foram analisadas somente questões relacionadas à acústica das salas. A introdução de outras questões de projeto, como iluminação, circulação, conforto térmico, prevenção contra incêndio, entre outros, deixa as relações mais complexas e é potencialmente um trabalho a ser desenvolvido.

A aplicação do método no projeto de salas de concerto contribuiu para uma reflexão de como as questões acústicas podem ser incorporadas no processo de projeto, principalmente em relação à percepção da qualidade sonora pelas pessoas que se utilizam da sala. Do ponto de vista do projetista, o método desperta a consciência de que todos os elementos da sala contribuem de alguma forma para uma experiência multissensorial.

Referências bibliográficas

- ALEXANDER, C. **Notes on the Synthesis of Form**. Cambridge: Harvard University Press, 1977.
- BARRON, M. **Auditorium Acoustics and Architectural Design**. London: E & FN SPON, 1993.
- BERANEK, L. L. **Concert Halls and Opera Houses: music, acoustics, and architecture**. 2. ed. Cambridge, MA: Bolt, Beranek & Newman, 2004.
- BERANEK, L. L. Concert halls: 2008. **Journal of the Audio Engineering Society**, Cambridge, v. 56, n. 7/8, p. 1036-1056, 2008.
- BERLINER PHILHARMONIEKER. [Imagens]. Disponível: <<http://www.berliner-philharmoniker.de/en/>>. Acesso em: 10 fev. 2011.
- ISHIKAWA, T. **Architectural Drawings of Hans Scharoun**. Maebashi: Maebashi Institute of Technology, 1997.
- JONES, J. C. A Method of Systematic Design. In: JONES, J. C.; THORNLEY, D. G. (Eds.). **Conference on Design Methods**. Oxford: Pergamon Press, 1963.

JONES, J. C. **Métodos de Diseño**. Barcelona: Gustavo Gili, 1976.

JONES, J. C. The State of the Art in Design Methods. In: BROADBENT, G.; WARD, A. (Eds.). **Design Methods in Architecture**. London: Lund Humphries, 1969.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. California: Elsevier Academic Press, 2006.

MARSHALL, L. G.; KLEPPER, D. L. Acoustical Design: places for listening. In: CAVANAUGH, W.; WILKES, J. (Eds.). **Architectural Acoustics: principles and practice**. New York: John Wiley e Sons, Inc., 1999. p 151-186.

MOREIRA, D. C. **Os Princípios da Síntese da Forma e a Análise de Projetos Arquitetônicos**. Campinas, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PASSERI, L. **Subsídios para o Projeto de Teatros e Auditórios Multifuncionais: recursos de variabilidade acústica**. São Paulo, 2008. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SIEBEIN, G. W.; KINZEY JUNIOR, B. Y. Recent Innovations in Acoustical Design and Research. In: CAVANAUGH, W.; WILKES, J. (Eds.). **Architectural Acoustics: principles and practice**. New York: John Wiley e Sons, Inc., 1999. p. 233-304.

TAKAHASHI, V. F. M. **Influência das Características Arquitetônicas na Qualidade Acústica de Salas de Concerto**. Campinas, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao CNPq, pelo apoio financeiro a este trabalho, e à Filarmônica de Berlim, por conceder o uso das imagens no trabalho.

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br