

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA DIRECIONALIDADE SONORA DE UMA HARPA DE CONCERTO

Arruda, J.R.F.*; Gautier, F.**; Renger, M.**; Le Carrou, J.L.**;
Gilbert, J.**

*Laboratório de Vibroacústica (LVA), Unicamp, Campinas, Brasil

**Laboratoire d'Acoustique (LAUM), Université du Maine, Le Mans, França

e-mail: arruda@fem.unicamp.br

Resumo: A distribuição direcional da intensidade sonora emitida por uma fonte é caracterizada pela direcionalidade. A direcionalidade é um dos atributos do som produzido por instrumentos musicais que influenciam na percepção sonora do ouvinte. A combinação da direcionalidade da fonte sonora com a acústica da sala produz uma sensação de espacialização do som, que tem sido investigada com interesse crescente por pesquisadores da área de acústica musical e eletroacústica. Para reforçar a potência sonora de um instrumento musical em uma sala com meios eletroacústicos ou para sua reprodução sonora com meios eletroacústicos, é importante não só garantir a fidelidade em termos de resposta em frequência, mas também conhecer seus padrões de direcionalidade. Os padrões de direcionalidade diversos instrumentos têm sido caracterizados e reportados na literatura. Neste trabalho, a direcionalidade de uma harpa de concerto é investigada. As medidas frequenciais em regime estacionário foram feitas usando uma grade de medidas com 400 pontos distribuídos sobre uma superfície hemisférica erguida sobre um pequeno trecho cilíndrico em uma câmara semi-aneóica. Três pontos da tábua harmônica foram excitados com um excitador eletrodinâmico acionado por um sinal aleatório do tipo ruído branco, sendo um ponto de excitação para cada faixa de frequências analisada. Os resultados mostram que, em baixas frequências, a direcionalidade da harpa tem padrões simples e pode ser reproduzida com dois monopólos acústicos situados nas posições da tábua harmônica e da abertura traseira. Modelos mais complexos, constituídos de múltiplas fontes sonoras do tipo monopólo, foram ajustadas aos dados medidos para reproduzir os padrões de direcionalidade em frequências mais altas. A possibilidade de reprodução dos sons produzidos por uma harpa com uma matriz de alto-falantes mantendo suas características de direcionalidade é discutida.

1. INTRODUÇÃO

A distribuição direcional da intensidade sonora emitida por uma fonte é caracterizada pela direcionalidade (ou diretividade) [1]. Para defini-la, formulamos a potência sonora numa superfície esférica de raio r :

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} \int_{4\pi} P^2(r, \theta, \phi) r^2 d\Omega \quad (1)$$

onde c é a velocidade do som, ρ a densidade de massa e P a pressão sonora.

Separando as variáveis, tem-se:

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} r^2 P_r^2(r) \int_{4\pi} H^2(\theta, \phi) d\Omega \quad (2)$$

Na expressão acima, a direcionalidade é expressa por $H(\theta, \phi)$. O Fator de Direcionalidade é usualmente definido como:

$$D = \frac{I_{\text{direcional}}}{I_{\text{esférica}}} = \frac{P_r^2(r)}{P_e^2(r)} \quad (3)$$

onde

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} 4\pi r^2 P_e^2 \quad (4)$$

Neste trabalho, utilizaremos a função $H(\theta, \phi)$ para caracterizar a direcionalidade.

A direcionalidade é uma característica da fonte sonora. Os livros-texto de acústica geralmente tratam do problema da direcionalidade de fontes sonoras em geral e de alto-falantes em particular. A Figura 1 mostra a direcionalidade de um pistão rígido de raio a para $ka=10$, sendo k o número de onda ($k = \omega/c$), onde a função, que é axisimétrica e não depende do ângulo ϕ , é expressa por [1]:

$$H(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (5)$$

A combinação da direcionalidade da fonte sonora com a acústica da sala produz a sensação de espacialização do som. Para reforçar a potência sonora de um instrumento musical em uma sala com meios eletroacústicos ou para fazer sua reprodução sonora com meios eletroacústicos, é importante, portanto, conhecer seus padrões de direcionalidade. Os padrões de direcionalidade diversos instrumentos têm sido caracterizados e reportados na literatura [2]. Uma monografia recente [3] estuda a questão da direcionalidade dos instrumentos musicais tendo em vista a performance musical eletroacústica em salas de concerto e a captação de som em estúdios de gravação. Além de tratar da direcionalidade dos instrumentos, essa monografia aborda questões relativas à acústica de salas. Outros trabalhos recentes abordam a questão da direcionalidade de instrumentos musicais, demonstrando a atualidade do tema [4,5,6].

Pelo fato da direcionalidade de uma caixa de som ser muito diferente da direcionalidade de um instrumento musical, a percepção do som reproduzido eletroacusticamente é prejudicada. Curtin [7] relata que Pierre Boulez costumava dizer que a caixa de som torna 'anônima' uma gravação de um instrumento musical. Num artigo recente, Curtin [7] entrevista o Professor Weinreich da Universidade de Michigan, que introduziu o conceito de '*Directional Tone Color*', ou 'Colorido Direcional da Tonalidade'. Estes trabalhos publicados em veículos científicos e artísticos mostram que a direcionalidade é importante na percepção do som musical.

Cabe notar, ainda, que as sensações subjetivas da percepção sonora, estudadas dentro da especialidade chamada de Psicoacústica [8], têm características freqüenciais e temporais. Fenômenos como o mascaramento comprovam isto. Portanto, no estudo da direcionalidade, pode ser relevante estudar não apenas o comportamento em regime estacionário, como é usual, mas também o seu comportamento temporal. Neste trabalho foi feita uma primeira medição da direcionalidade temporal da harpa, mas os resultados da análise ainda não estão disponíveis. Apenas a metodologia usada nas medições será comentada neste caso.

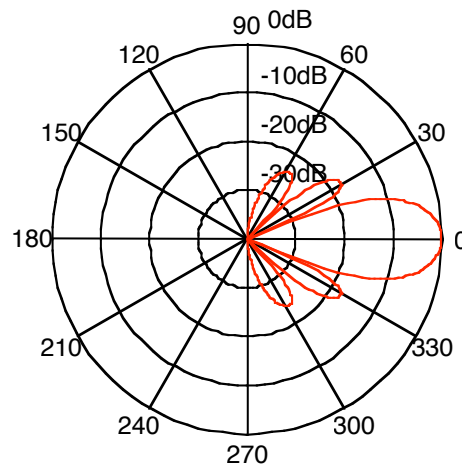


Figura 1: Direcionalidade de um pistão rígido no ar ($ka=10$).

2. DIRECIONALIDADE DA HARPA EM REGIME ESTACIONÁRIO

A harpa investigada é uma harpa de concerto Camac Atlantide Prestige (Figura 2). Três faixas de freqüência foram escolhidas: 100 Hz-1 kHz, 50-5 kHz e 5-15 kHz. Para cada uma delas, um ponto de excitação diferente foi escolhido e um excitador eletrodinâmico ('shaker') foi conectado através de uma haste flexível à tábua harmônica próximo ao ponto de fixação das cordas, acessível através das aberturas do fundo da caixa acústica do instrumento. Para as freqüências mais baixas, a primeira abertura, junto à base do instrumento, foi usada (correspondendo às notas mais baixas). Para a faixa média foi usada a abertura central e para a faixa mais alta a menor abertura, à altura das notas mais altas. A figura 3 mostra um esquema da montagem experimental para a faixa média.

Para levantar as curvas de direcionalidade, foi utilizada uma 'antena' de microfones de instrumentação omnidirecionais de 1/4" (eletreto, ICP), normalmente utilizados em um sistema de holografia acústica. A configuração da antena, composta de 35 microfones, montada em uma estrutura de modo a formar um círculo alongado nas duas pontas, é mostrada na Figura 4.



Figura 2: O modelo de harpa estudado (Camac Atlantide Prestige)

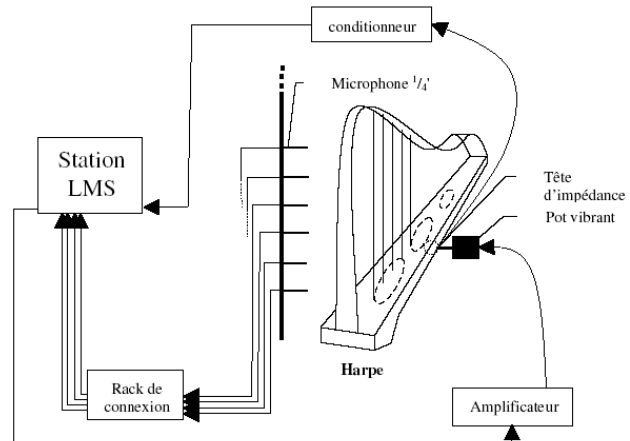


Figura 3: Esquema da montagem experimental.

A maioria dos estudos sobre a direcionalidade de instrumentos musicais preconiza uma distância entre a fonte e os microfones de 2m para que se possa considerar uma condição de campo distante [1]. Para uma frequência mínima de 150 Hz, uma distância mínima de 2,26m seria necessária para a condição de um comprimento de onda de distância da fonte, uma vez que a relação entre comprimento de onda e frequência é dada por [1] $\lambda_{\max} = c/f_{\min}$, onde λ_{\max} é o maior comprimento de onda na faixa e f_{\min} é a frequência mínima. A distância dos microfones foi fixada em 2,35m do centro geométrico da harpa, que pode, no nosso caso, ser representada por um retângulo de 1,20m de altura e 0,7m de lado. As diagonais deste retângulo são as descritas pela tábua de harmonia quando esta gira sobre um eixo vertical.

O ensaio foi feito em uma câmara semi-aneecóica do Centre de Transfert de Technologie du Mans, em Le Mans, França. A harpa foi colocada sobre um dispositivo giratório e as medições foram feitas em ângulos espaçados de 10°. A Figura 5 mostra uma fotografia da montagem experimental em câmara anecóica. A Figura 6 mostra a malha de pontos de medida em torno da harpa no ensaio em regime estacionário.

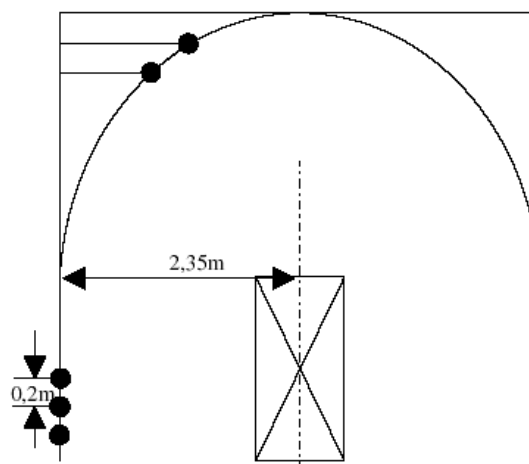


Figura 4: Configuração da “antena” de medição com 35 microfones.

Num primeiro ensaio, as medidas foram feitas em um hemisfério com 360° para verificação da simetria da fonte. Verificada a simetria, as demais medições foram simplificadas para 180° para diminuir o volume de dados medidos. A excitação foi feita com um sinal de excitação aleatório do tipo ruído branco. A medida de amplitude e fase foi feita para cada microfone usando como sinal de referência o sinal de força medido com uma cabeça de impedância. A amplitude e a fase da pressão em cada ponto foram obtidas multiplicando o espectro cruzado entre a pressão e o sinal de referência pela raiz quadrada do auto-espectro deste sinal. A aquisição foi simultânea em 36 canais.

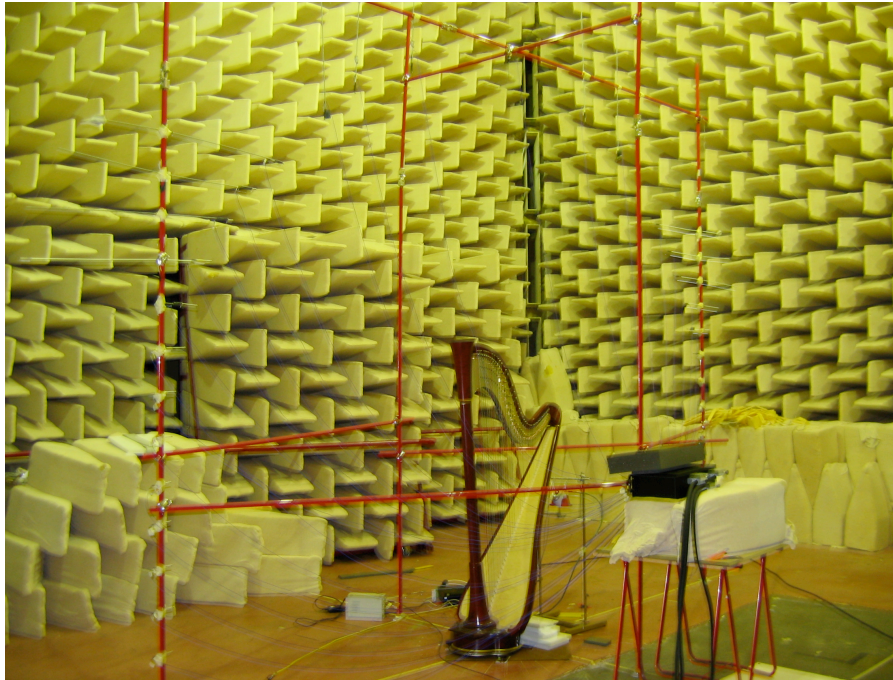


Figura 5: Fotografia da montagem experimental em câmara anecóica

Para cada frequência, tem-se um padrão de direcionalidade que pode ser visualizado traçando a distribuição da pressão em função do ângulo de rotação da harpa θ e da altura z em relação ao solo (ângulo ϕ). Para ilustrar, as Figuras 7, 8 e 9 mostram a distribuição de pressões nas frequências de 148, 198 e 248 Hz.

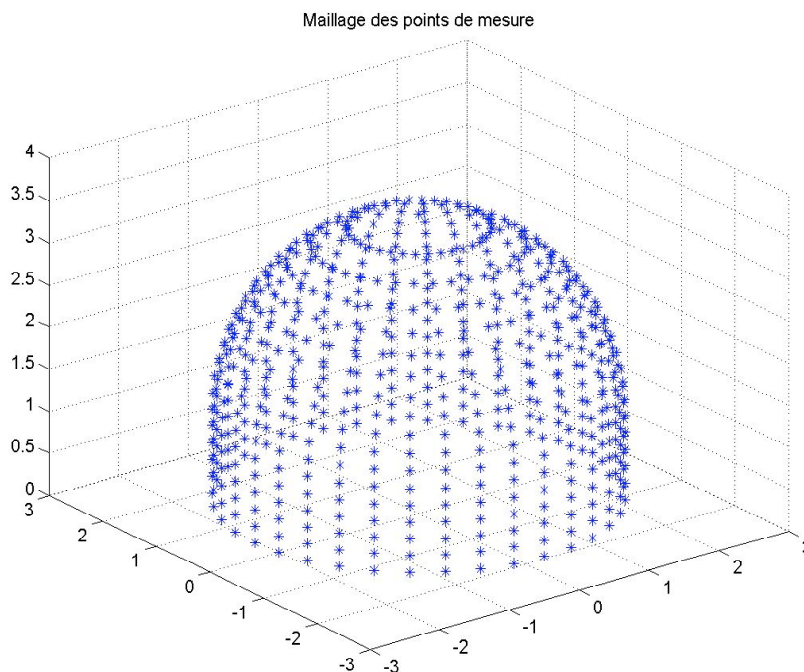


Figura 6: Malha de pontos de medida da pressão no ensaio em regime estacionário

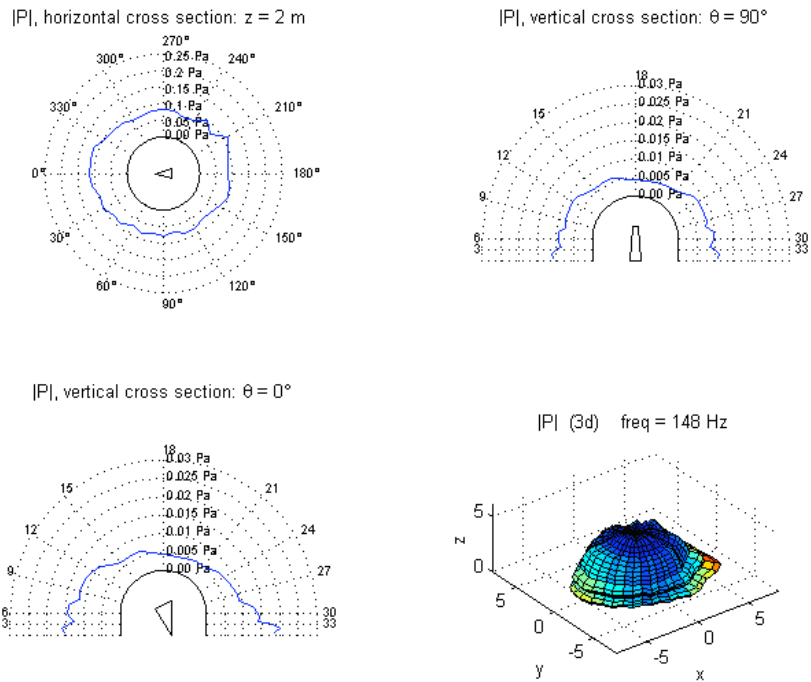


Figura 7: Representação gráfica da direcionalidade medida em 148 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D.

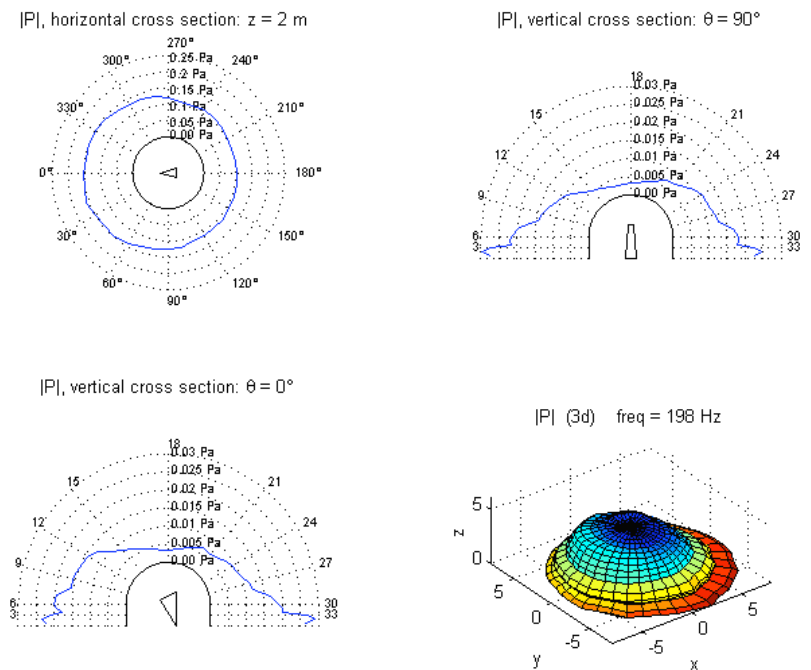


Figura 8: Representação gráfica da direcionalidade medida em 198 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D.

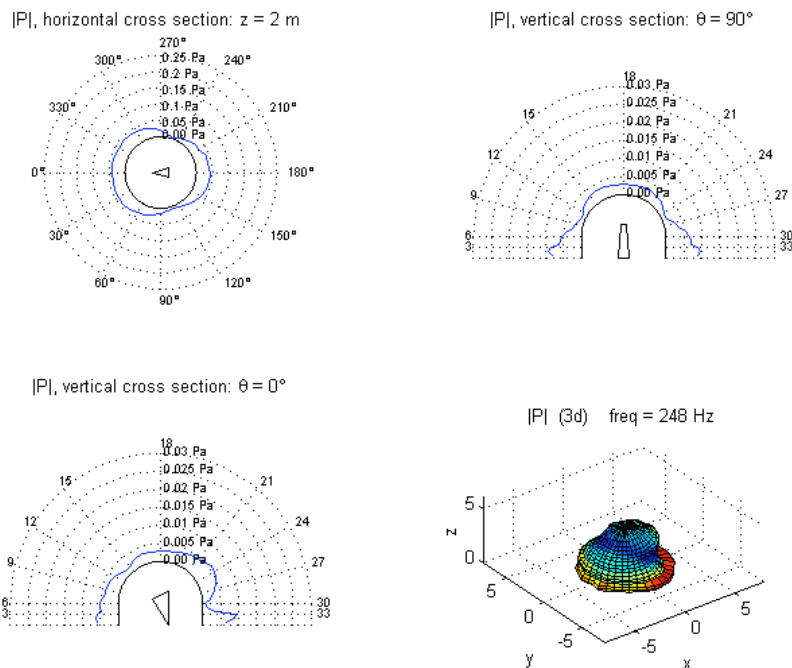


Figura 9: Representação gráfica da direcionalidade medida em 248 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D.

3. MODELAGEM POR FONTES SONORAS ELEMENTARES

Existem várias maneiras de se fazer a modelagem matemática de uma fonte sonora. No caso de instrumentos de corda, o mecanismo de geração do som inicia-se pela excitação mecânica das cordas que, então, vibram em suas frequências naturais, que formam uma série harmônica (na verdade aproximadamente harmônica, uma vez que as cordas reais não têm um comportamento ideal). As cordas são ligadas a uma estrutura flexível, com uma superfície importante, capaz de transformar de forma eficiente as vibrações em som radiado (tábua harmônica). Como, em frequências muito baixas, a eficiência da radiação de cascas flexíveis é reduzida (as dimensões da superfície teriam que ser demasiado grandes), os instrumentos possuem cavidades acústicas que possuem modos em baixas frequências responsáveis pela produção de som em notas mais graves. Estas caixas devem ter volume tanto maior quanto mais graves forem as notas que se desejam atingir. Os modelos mais fiéis às características físicas do problema são os modelos que representam a estrutura mecânica do instrumento, particularmente a tábua harmônica e a caixa acústica com suas aberturas. As vibrações desta estrutura imersa no fluido que é o ar geram o campo acústico em torno do instrumento. Ao estudo das vibrações de uma estrutura imersa num meio fluido e sua interação dá-se o nome de vibroacústica [9]. No caso de instrumentos musicais, como o fluido é o ar, pode-se, em uma primeira aproximação, considerar que o ar não altera substancialmente a resposta da estrutura mecânica, no caso em madeira, e o problema pode ser tratado de forma desacoplada: calculam-se as vibrações da estrutura e, num segundo passo, o campo sonoro gerado por estas vibrações das superfícies. Mesmo assim, a complexidade da geometria dos instrumentos musicais e a dificuldade em caracterizar os materiais (madeiras) de que são feitos, tornam o problema de difícil solução, mesmo utilizando poderosos “softwares” baseados em métodos numéricos como o método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno [10].

Uma outra abordagem, mais simples e mais antiga, para modelar fontes sonoras é o chamado método das fontes elementares. Este método vem sendo objeto de interesse renovado pela comunidade de acústica [11,12] por ser de fácil implementação computacional e beneficiar-se dos avanços verificados na álgebra linear computacional, tais como os métodos de regularização [13]. Neste método, a fonte física real, no nosso caso o instrumento musical, é substituída por um conjunto de fontes sonoras elementares, que podem ser monopólos, dipolos ou fontes de ordem mais elevada. O mais comum, e que será usado aqui, é utilizar monopólos.

O campo de pressão sonora criado por um monopólo em espaço semi-anecóico pode ser obtido colocando-se uma fonte igual de forma simétrica à superfície rígida (Figura 10) e a pressão resultante para uma vazão da fonte Q pode ser expressa como:

$$p(r, \omega) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-jkr}}{|r|} \left(1 + \frac{|r|}{|r'|} e^{-jk(r'-r)} \right) \right\} Q \quad (6)$$

onde $j = \sqrt{-1}$.

Um primeiro modelo muito simples para representação da harpa como fonte sonora em baixas frequências, baseado em estudos anteriores desenvolvidos no Laboratoire d'Acoustique da Universidade do Maine (LAUM) consiste de apenas dois monopólos, um situado na tábua de harmonia e um situado na abertura na caixa acústica, ambos próximos à base do instrumento, onde as baixas frequências são excitadas. A Figura 11 mostra a posição das duas fontes. As coordenadas utilizadas no modelo foram $y_t=0,26\text{m}$, $z_t=0,45\text{m}$, $y_h=0,41\text{m}$ e $z_h=0,37\text{m}$. As vazões destas duas fontes são denotadas por Q_t e Q_h , respectivamente. A pressão numa posição distante de r_t em relação a Q_t e de r_h em relação a Q_h é expressa como:

$$p(r_t, \omega) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-jkr_t}}{|r_t|} \left(1 + \frac{|r_t|}{|r'_t|} e^{jk(r'_t-r_t)} \right) + \frac{e^{-jkr_h}}{|r_h|} \left(1 + \frac{|r_h|}{|r'_h|} e^{jk(r'_h-r_h)} \right) \right\} \times \begin{Bmatrix} Q_t \\ Q_h \end{Bmatrix} \quad (7)$$

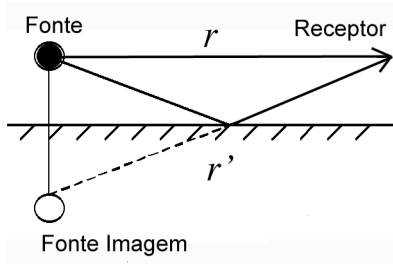


Figura 10: Configuração para representação de um monopólo em espaço semi-anecóico.

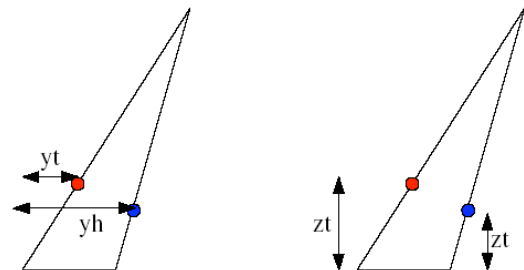


Figura 11: Posição dos dois monopólos no modelo simples da harpa

Dado um conjunto de pontos onde a pressão é medida, tem-se um igual número de equações como a equação (7). Estas equações constituem um sistema linear de equações, tendo como incógnitas as duas vazões, e podem ser organizadas de forma matricial. A solução deste sistema pode ser expressa da forma:

$$\begin{Bmatrix} Q_t \\ Q_h \end{Bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\rho} [Geo]^+ \{p(r, \omega)\} \quad (8)$$

onde $[]^+$ denota a inversa generalizada de uma matriz, que produz, neste caso, a solução de mínimos quadrados. Assim, são obtidas as vazões dos monopólos que caracterizam a harpa em baixas frequências. A Figura 12 compara a distribuição das pressões numa elevação de $z=0,6\text{m}$ calculada com o modelo de duas fontes e a distribuição obtida experimentalmente. Observou-se que as vazões das duas fontes são de magnitude aproximadamente igual e fase oposta (Figura 13). Isto veio confirmar a interpretação física do fenômeno em baixas frequências proposta no LAUM em estudos anteriores, mostrada na Figura 14.

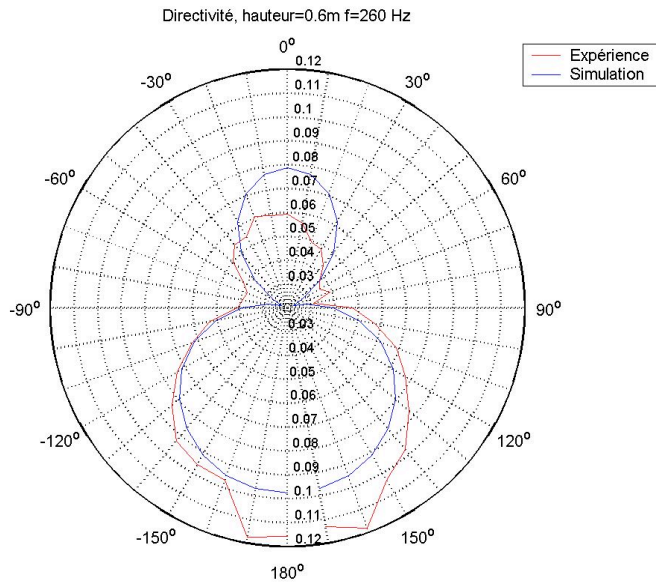


Figura 12: Direcionalidade medida da harpa e direcionalidade do modelo de duas fontes elementares em 260 Hz.

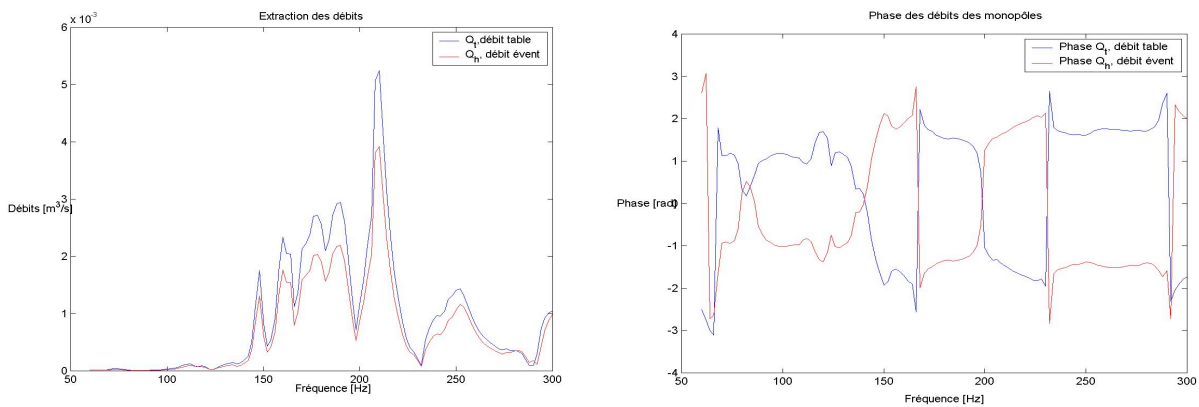


Figura 13: Magnitude e fase das vazões Q_t e Q_h .

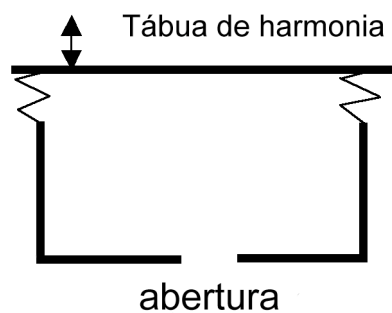


Figura 14: Modelo físico da harpa em baixas frequências proposto no LAUM.

Para frequências de até cerca de 300 Hz o modelo de dois monopólos representa razoavelmente bem o padrão de direcionalidade da harpa. Para frequências superiores são necessários mais monopólos. A Figura 15 mostra a direcionalidade do modelo de dois monopólos comparada à direcionalidade medida na harpa em 352 Hz, deixando evidente que o modelo não consegue representar a direcionalidade de 4 lóbulos da harpa.

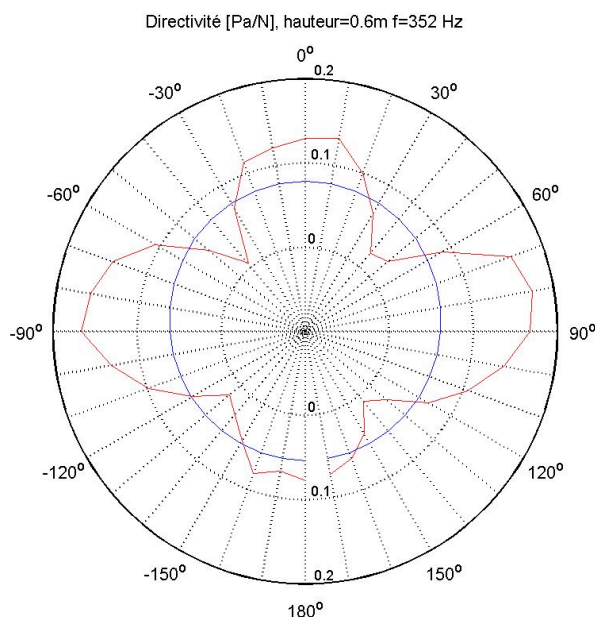


Figura 15: Direcionalidade medida da harpa e direcionalidade do modelo de duas fontes elementares em 352 Hz.

4. DIRECIONALIDADE TEMPORAL DA HARPA EM REGIME TRANSITÓRIO

Como comentado antes, o comportamento temporal da direcionalidade de um instrumento musical também é relevante para a percepção sonora. Neste trabalho foi feita uma primeira medição da direcionalidade temporal da harpa, mas os resultados da análise ainda não estão disponíveis. Apenas a metodologia usada nas medições será brevemente descrita aqui.

Como o estudo temporal exige que todos os sinais de pressão sejam registrados simultaneamente, o sistema de aquisição de sinais de 36 canais usado impôs uma limitação ao número de pressões medidas. Como um dos canais foi usado para registro de voz, decidiu-se fazer uma antena circular plana de 35 microfones com base na hipótese de que a direcionalidade horizontal é mais importante que a vertical no caso em estudo.

Foram registrados os sons produzidos por uma harpista, primeiramente com cada nota separadamente e, depois, com glissandi. Diversos registros temporais em diferentes faixas de frequência e com diferentes durações foram feitas. A harpa é dotada de 46 cordas, sendo as de número 45 a 34 cordas de aço, as de 33 a 7 de tripa e as de 6 a 0 de nylon. No primeiro registro, na faixa DC-2kHz, com 8 segundos de duração, todas as cordas foram sucessivamente excitadas, da Do45 à Sol00. Da corda 45 à corda 25, o ataque é feito da mão esquerda e, da 24 à 00, da mão direita. A corda 25 pode ser atacada indiferentemente da mão direita ou esquerda. Num segundo teste, para cada fixa de cordas, foi escolhida uma faixa de frequências mais apropriada e um tempo de duração adequado, de 1,6s, DC-10,2kHz, para a faixa de notas mais altas (Sol00 a Do24) a 5,12s, DC-3,2kHz, para as mais baixas (Sol41 a Do45). Os glissandi ascendentes, descendentes, em terças e super glissandi foram analisados na faixa DC-3,2kHz com 5,12 segundos de gravação. Além destes, foram gravados ainda os chamados 'sons harmônicos', obtidos pela harpista bloqueando alguns modos das cordas opondo-lhes a palma da mão durante o ataque. Os sons xilofônicos são obtidos abafando a base da corda com um dedo durante o ataque. Os sons ditos 'de violão' são provocados pelo ataque da corda em sua base.

A Figura 16 mostra um esquema do aparato experimental e a Figura 17 uma fotografia tirada durante as gravações.

O conjunto de sinais digitalizados está organizado em um CD-ROM aguardando a análise de direcionalidade temporal, que será feita na seqüência do projeto e reportada em futuros trabalhos.

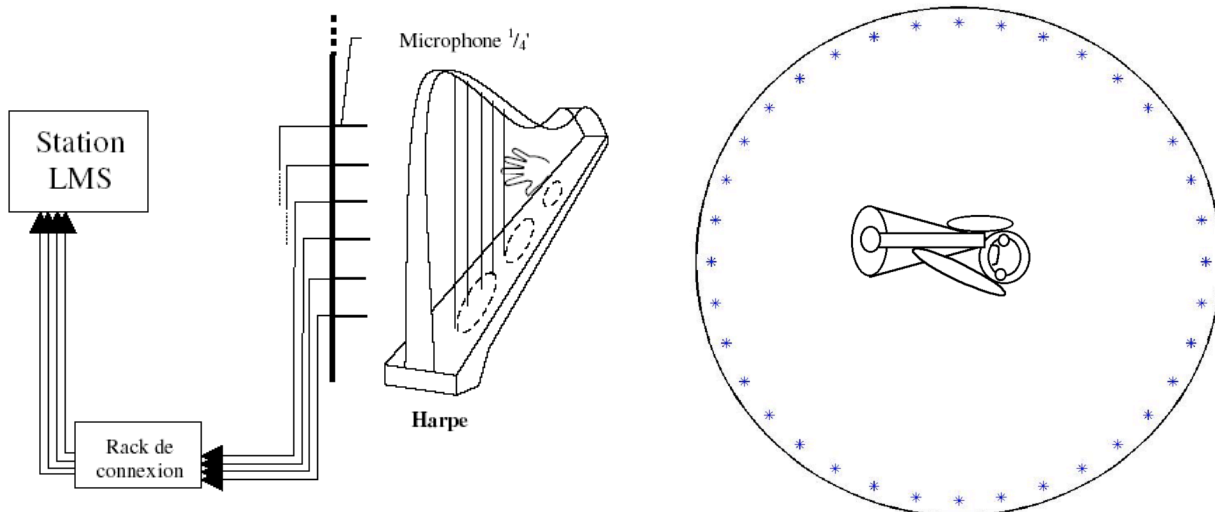


Figura 16: Esquema do aparato experimental para medida temporal da direcionalidade.



Figura 17: Fotografia do aparato experimental na medida temporal da direcionalidade.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foram feitas medidas de direcionalidade em uma harpa de concerto em regime estacionário no domínio da frequência. Em baixas frequências (abaixo de 300 Hz) confirmaram-se estudos realizados no LAUM que indicavam que a harpa funciona basicamente como um dipólo com a tábua de harmonia e a caixa acústica atuando como monopólos em oposição de fase. Em frequências mais elevadas, constatou-se que são necessários vários monopólos para representar a direcionalidade de padrões mais complexos da harpa. Utilizou-se o método das fontes elementares para obter os modelos.

Resta fazer uma análise sistemática para caracterizar a harpa em toda a faixa de funcionamento utilizando as ferramentas implementadas neste estudo. Já foram iniciados estudos sobre a otimização do número e do posicionamento das fontes para cada faixa de frequências.

Foram feitas também medidas temporais com a harpa tocada por uma harpista, mas a análise destas medidas ainda não foi realizada. Espera-se poder investigar o efeito de espacialização

temporal dinâmica com estes dados. O estudo da direcionalidade em regime estacionário deverá auxiliar na interpretação dos fenômenos de direcionalidade temporal.

Esta é uma pesquisa em andamento e deverá ter continuidade através de novos trabalhos de graduação, dissertações e teses. O trabalho foi desenvolvido em colaboração entre o Laboratório de Vibroacústica da UNICAMP e o Laboratoire d'Acoustique da Université du Maine (França). Futuramente, espera-se poder desenvolver fontes eletroacústicas de direcionalidade capazes de reproduzir o comportamento direcional da harpa.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos aos alunos E. Boboeuf e F. Grignon da Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, que realizaram as medidas como parte de seu trabalho de graduação e ao Centre de Transfert de Technologie du Mans por ter cedido suas instalações, sua instrumentação e a orientação de seu corpo técnico para a realização das medições. O primeiro autor agradece ainda o apoio da CAPES, que financiou sua estada no LAUM em estágio pós-doutoral.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., *Fundamentals of Acoustics*, 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons, 1982, 524p.
- [2] Meyer, J., *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, Frankfurt: Verlag das musikinstrument, 1980. 259p.
- [3] Mannis, J.A., *Elementos de Acústica de Salas, Tomada e Projeção do Som na Performance Eletroacústica*, monografia do Programa de Doutorado em Música da UNICAMP, 2003, 27p.
- [4] Jeong, C.-H., Ih, J.-G., *Modeling of Sound Fields Considering the Acoustical Characteristics of Korean Traditional Musical Instruments*, Proc. Internoise, 2003, Seogwipo, Korea, 8p.
- [5] Hill, T.J., Richardson, B.E., Richardson, S.J., *Acoustical Parameters for the Characterisation of the Classical Guitar*, Acta Acustica, Vo. 90, 2004, pp. 335-348.
- [6] Stepanek, J., Otcenasek, Z., *Sound Directivity Spectral Spaces of Violins*, Proc. ISMA 2001, Perugia, Italy, pp. 133-136.
- [7] Curtin, J., *The Violin Finally Speaks*, The Strad, April 2000, pp. 390-394.
- [8] Zwicker, Eberhard, Fastl, Hugo, *Psychoacoustics Facts and Models*, Springer Series in Information Sciences, Vol. 22, 2nd Ed., 1999, 416 p.
- [9] Hughes WO, McNelis ME, *Recent advances in vibroacoustics*, Sound and Vibration, 2002, 36 (6), pp. 20-27.
- [10] *Boundary Element in Acoustics: Fundamentals and Computer Codes*, Editor T.W. Wu, WIT Series on Advances in Boundary Elements, Vol. 7, 2000.
- [11] Pinho, M.E.V.; Arruda, J.R.F., *On The Use of the Equivalent Source Method for Nearfield Acoustic Holography*. Anais do 17th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2003), ABCM, São Paulo, SP, Nov. 10-14, 2003. CD-ROM, paper 0503, 10 p.
- [12] Magalhaes MBS, Tenenbaum RA, *Sound sources reconstruction techniques: A review of their evolution and new trends* Acta Acustica 90 (2), 2004, pp. 199-220.
- [13] Nelson, P.A., Yoon, S.H., *Estimation of acoustic source strength by inverse methods: part II, experimental investigation of methods for choosing regularization parameters*, Journal of Sound and Vibration, 2000(a), 233(4), pp 669-705.