



**45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS**

**AS POSSIBILIDADES E PROBLEMAS ACÚSTICOS DOS AEROFONES
(METAIS)**

PACS: 43.75.Fg

Maria Lúcia Grillo e Luiz Roberto Baptista
Laboratório de Acústica Ambiental e Musical (LACUSTAMM),
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ),
Rua São Francisco Xavier 524, sala 3034 D, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 20.550-013,
Tel: 55-21-23340844
E-mail: mluciag@uerj.br e maestroluizroberto@ig.com.br

ABSTRACT

The aerophones brass instruments group (horn, trumpet, trombone, tuba) emit sound through an applied pressure at a mouthpiece. Their sound emissions are very intense. The range of notes is made using pistos on tuba, trumpet and trombone band; the keys in the tube and stick in the slide trombone. Besides these systems the variation of pressure applied by the instrumentalist is of great importance, allowing the harmonic series is issued, generating the natural scale. When instruments are played with tempered instruments its necessary a greater attention of musicians to adequacy of pressure.

RESUMO

Os instrumentos do grupo dos aerofones metais (trompa, trompete, trombone, tuba) emitem o som através da pressão aplicada em um bocal. Suas emissões sonoras são muito intensas. A variação das notas se dá com o uso dos pistos na tuba, trompete e trombone de banda; das chaves na trompa e da vara no trombone de vara. Além desses sistemas a variação de pressão aplicada pelo instrumentista é de grande importância, o que permite que a série harmônica seja emitida, gerando a escala natural. Quando são tocados com instrumentos temperados é necessária uma maior atenção dos músicos com adequação da pressão.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Os aerofones metais são os instrumentos musicais que produzem o som através da pressão dos lábios em um bocal (sem o uso de palhetas como os aerofones madeiras). A vibração dos lábios faz a coluna de ar, do interior do tubo, vibrar também. Produzem um som muito intenso. São

45º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
8º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SMART CITIES AND
ENVIRONMENTAL ACOUSTICS

capazes de emitir os possíveis harmônicos, com o som fundamental tendo comprimento de onda aproximadamente de $4L$, onde L é o comprimento efetivo do tubo sonoro. Seus tubos são fechados na extremidade da embocadura e possuem formato parte cilíndrica e parte cônica e possuem uma campana (ou campânula) na extremidade aberta. A conicidade enriquece o som, pois faz com que um maior número de harmônicos esteja presente. Um tubo aberto-fechado cilíndrico só emite os harmônicos ímpares. Segundo Ribeiro (2005), normalmente as orquestras usam 3 trompetes, 4 trompas, 3 trombones (2 tenores e 1 baixo) e 1 tuba. Seus tubos são mais longos que os do grupo das madeiras, por isso são capazes de emitir sons mais graves, e não possuem orifícios. Segundo Henrique (2007), são feitos de material suficientemente rígido para que sua vibração possa ser desprezível. A variação das frequências emitidas é feita através da variação da pressão labial e da variação do comprimento efetivo do tubo, o que se dá com o uso das chaves ou dos pistos (ou pistões), ou da vara (no trombone). Exigem uma habilidade de técnica labial, do instrumentista, para a obtenção das notas da escala temperada, principalmente quando tocam com outros instrumentos que sejam temperados. O timbre e a intensidade podem ser alterados com o uso de surdinas.

O trompete em Si bemol, que é o mais usado, possui 3 pistos e cada um deles pode ser acionado de forma independente. Segundo Vasconcelos (2002), quando o dedo do executante baixa uma das chaves, faz o tubo aumentar, acrescentando uma parte que estava obstruída pelo pisto (gerando assim um som mais grave). Graças aos pistos o comprimento do tubo pode ter 8 valores: acionando cada pisto individualmente o músico pode obter 3 novos comprimentos (cada pisto acrescenta tamanhos diferentes), além do original sem nenhum acionamento; pode ainda acionar 2 de cada vez (3 possibilidades), ou ainda acionar os 3 ao mesmo tempo. A extensão do trompete em Si bemol vai normalmente de Mi 2 a Ré 5 em efeito, diferente do que se lê na música, pois é um instrumento transpositor. As músicas são escritas 1 tom acima, em clave de Sol. O trompete em Dó é não transpositor. O trompete piccolo é afinado 1 oitava acima e possui 4 pistos.

Segundo Sadie (1994), a trompa é um tubo delgado cônico, gradualmente afilado, entre 2 e 5,5 m de comprimento, enrolado em um, dois ou três círculos e expandindo-se em larga campana em boca de sino. Possui três, quatro ou cinco chaves, cuja função é variar o comprimento do tubo, como acontece com os pistos no trompete. As trompas simples (1 enrolamento) são afinadas em Fá, as duplas podem ser afinadas em Fá ou em Si bemol (mais usadas nas orquestras), dependendo da posição de uma chave. As triplas podem ser em Fá, Si bemol ou em Fá agudo (uma oitava acima). Suas músicas são escritas na clave de Sol e sua extensão vai de Fá 1 a Dó 4. Alguns poucos músicos conseguem atingir uma 5ª acima ou uma 4ª abaixo (SADIE, 1994:964). Segundo Vasconcelos (2002), o som fundamental é praticamente impossível de ser obtido na trompa, sendo o Fá 1 o primeiro harmônico. O som de cerca de 45 Hz é muito grave e sua emissão é dificultada devido ao pequeno diâmetro de seu tubo, que favorece o primeiro harmônico. Seu timbre pode ser modificado se o músico coloca a mão obstruindo parcialmente a campana. Por vezes esse procedimento altera as notas em cerca de 1 semitom para baixo (mão colocada em forma de concha – aumenta o tubo e a massa acústica).

Segundo Vasconcelos (2002), o trombone possui o bocal em forma de taça e um tubo cilíndrico nos dois terços iniciais, antes de se expandir em um tubo cônico e uma campana. Um tubo desliza dentro do outro, alterando assim o comprimento acústico, por isso é chamado de trombone de vara. A técnica da vara envolve 7 posições que abaixam a altura da série harmônica progressivamente por semitons, a primeira (mais aguda) com vara totalmente retraída, a sétima (mais grave) com vara plenamente estendida. A nota fundamental no instrumento padrão, o trombone tenor em Si bemol (série harmônica em Si bemol, também chamado trombone em Dó, considerando que o instrumento não é transpositor) em primeira posição, é Si bemol -1, usando o primeiro harmônico temos o Si bemol 1 e na sétima posição Mi 1. As notas mais agudas são alcançadas por pressão labial (SADIE, 1994:963). Vasconcelos (2002) considera que o trombone

constitui uma família completa à parte: o contralto, o tenor, o baixo e o contrabaixo. O trombone é o único dos metais que consegue emitir desde a fundamental até os harmônicos mais agudos. Os outros não emitem de uma forma aplicável a nota fundamental.

A tuba é o baixo do naipe dos metais. Assim como no caso do trombone, Vasconcelos (2002) observa que a tuba forma uma família completa de instrumentos, cada um de tamanho e afinação diferentes. Segundo Ribeiro (2005), atualmente costuma-se utilizar, alternativamente, 3 tipos de tuba na orquestra sinfônica: uma pequena tuba em Dó, com 6 pistos, que atinge 4 oitavas completas; a tuba baixo (ou contrabaixo) em Dó ou em Si bemol, com 4 ou 5 pistos e a tuba tenor em Si bemol, com 3 pistos. E Vasconcelos (2002) acrescenta que hoje existem 5 tipos de tuba, sendo uma delas a tuba dupla que, à semelhança do trombone ou da trompa, combina 2 afinações no mesmo instrumento, dependendo do acionamento de uma chave. Seu grupo envolve também o eufônico e o souzafone. Lemos em Sadie (1994) que “seu tubo largo e cônico, campana ampla e bocal em forma de taça profunda, dão-lhe uma sonoridade aveludada e rica, mais parecida com a da trompa do que com a do trompete ou do trombone”. Algumas possuem a campana para frente, que são as tubas usadas em bandas e paradas. (SADIE, 1994:968)

Normalmente a sonoridade da tuba é potente e, sobretudo, muito grave. Porém ela consegue ser doce e emitir sons em pianíssimo, isto é, com pouquíssima intensidade, no registro médio. Com essas características a tuba tem a função primordial, na orquestra sinfônica, de acompanhamento e reforço grave dos trombones, aumentando-lhes a consistência acústica e escondendo discretamente seu “mordente” característico e normalmente indesejado (substituição de 1 nota por várias notas próximas). (RIBEIRO, 2005:184) É o maior e mais visível instrumento da orquestra e exige uma boa capacidade pulmonar do executante, e até um treinamento específico. O músico não pode tocar seguidamente uma música, uma vez que precisa recuperar-se do esforço que seu desempenho exige.

DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

A origem desses instrumentos vem da Antiguidade, de conchas do mar e chifres de animais, com formato cônico, que eram soprados para servirem de fontes sonoras em cerimônias religiosas e advertência de perigos. Possuíam tubos curtos, de no máximo meio metro, que emitiam frequência em torno de 300 Hz e eram capazes de emitir apenas algumas notas, usando os 2 ou 3 primeiros harmônicos. Alguns instrumentos vieram de troncos de plantas, que são aproximadamente cilíndricos e bem mais longos que as conchas ou chifres, com cerca de 1 a 2 metros. Devido ao tamanho, esses atingem frequências mais baixas, em torno de 60 Hz, com baixa intensidade, e apenas 1 harmônico é acessível (FLETCHER e ROSSING, 2008:429).

Segundo Rossing (1990), acredita-se que só na Idade Média esses instrumentos foram usados para tocar músicas. Nessa época começaram as tentativas para a produção de possibilidades melódicas mais variadas. Fizeram então buracos laterais, semelhantes aos usados hoje nos aerofones classificados como madeiras. Desenvolveram então bocais pequenos para facilitar a emissão das notas. Começaram a fabricar instrumentos de madeira ou metal. Segundo Fletcher e Rossing (2008), entre os instrumentos desse tipo que sobreviveram desde o Barroco, temos a corneta, com tubo normalmente de meio metro e levemente curvo (lembrando sua origem em chifres de animais) e a serpente, em forma de S.

Segundo Ribeiro (2005), por volta de 1770, um músico tcheco chamado Kelbel criou o sistema de chaves para instrumentos de sopro, que foi aplicado à corneta. Posteriormente, em 1815, o fabricante alemão de instrumentos Johann Stölzel criou o sistema de pistos (ou pistões) e assim os

metais passaram a ser os “grandes e tonitroantes instrumentos sinfônicos que hoje conhecemos”. (RIBEIRO, 2005:164)

Claudio Monteverdi (1567-1643) foi o primeiro compositor a utilizar o trompete em suas músicas, na sua ópera Orfeo, de 1607. Esse instrumento foi muito usado em todo o Barroco, incentivado pela nobreza. Porém a situação política influenciou nesse uso, com a queda da monarquia absoluta, que culminou com a Revolução Francesa. O segundo Concerto de Brandenburgo, em Fá maior, composto por Bach (1695-1750), em 1717, usa o trompete junto com uma flauta e um oboé e o 1º violino. Vivaldi (1685-1741) compôs um Concerto para dois trompetes, cordas e contínuo. Em torno de 1777 foi construído, em Dresden, o trompete de chaves, impulsionado pela criação das orquestras de Viena e Mannheim, e mais tarde foram acrescentados os pistos. Com esse desenvolvimento passou a ser mais frequente seu uso, mais tarde.

O precursor direto da trompa é o olifante, construído com presa de elefante (séc. IX). Segundo Ribeiro (2005), a partir de inícios do século XVIII começa a evolução da trompa natural, com a possibilidade de acrescentar, entre o bocal e o início do tubo, pequenos tubos adicionais (os pontis). Mas isso dificultava a execução das músicas. Nessa época Ademis Hampel descobriu que uma das mãos podia ser usada para abaixar meio tom cada som, quando colocada dentro do pavilhão (na campana), além de modificar o timbre e a intensidade (o efeito bouché ou cuivré). Criaram também a surdina, que pode ser usada para modificar seu som. No séc. XIX o sistema de pistos foi adotado na trompa. Vários autores, como Vivaldi, Haydn, Mozart, Brahms, Strauss e Hindemith, incluíram em suas composições solos de trompa.

O trombone teve como precursor direto a buccina romana, usada em guerras. Na Idade Média era usado o saquebute, que significa “puxe e empurre”, que deu origem ao sistema de vara deslizante. No séc. XIX, segundo Ribeiro (2005), criou-se o trombone de pistos, sendo mais usado em bandas. Giuliani Gabrieli (1557-1612), na passagem da Renascença para o Barroco, na Catedral de São Marcos em Veneza, usa o trombone. Também Claudio Monteverdi usa o trombone na sua ópera Orfeo. Mozart (1756-1791) incluiu o trombone na ópera Il Dissoluto Punito. O trombone ganhou importância com Beethoven, no 4º movimento da Quinta Sinfonia, em 1807.

Segundo Vasconcelos (2002), não se sabe quem inventou a tuba, que apareceu pela primeira vez por volta de 1820, numa banda militar alemã. Os instrumentos que deram origem à tuba, segundo Ribeiro (2005), foram o serpentão (ou serpente) e o oficleide, sendo este último destinado à música militar, criado entre 1790 e 1800, por um professor de música de Lisieux (França). Carlos Gomes usou o oficleide em sua Missa de Nossa Senhora da Conceição, em 1859. Spontini usou o oficleide em uma de suas óperas (1836), bem como Berlioz (1846) e Mendelssohn (1826). Em torno de 1832, um fabricante francês de instrumentos musicais criou um oficleide com pistões e em 1835 um fabricante alemão construiu uma tuba em Fá, com 5 pistos. Segundo Ribeiro (2005), “o primeiro grande momento da tuba na música sinfônica é sem dúvida o solo confiado ao instrumento por Berlioz, com a execução do tema Dies Irae da Missa de Requiem gregoriana, no último movimento da sua Symphonie Fantastique (1830).” (RIBEIRO, 2005:185)

OSCILAÇÕES EM UM TUBO E GERAÇÃO DO SOM

A interação entre a vibração labial, o escoamento de ar e os modos acústicos do tubo resulta em uma vibração auto-excitada, que produz o som. “Os lábios do músico têm uma função de controle do fluxo do ar e a sua vibração produz-se por influência do efeito de Bernoulli, que correlaciona as flutuações de pressão nos lábios com as flutuações de velocidade do escoamento de ar produzido”. (HENRIQUE, 2007:602) A equação de Bernoulli, que tem a forma (eq. 1)

$$p + (1/2) \rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (\text{eq. 1})$$

expressa que, ao longo de uma linha de corrente a energia mecânica total de um fluido se mantém constante, onde v é a velocidade de escoamento e ρgh a energia potencial, que nos instrumentos musicais é desprezível.

Os aerofones metais são instrumentos do tipo aberto-fechado. Em geral possuem um tubo que é parte cilíndrico e parte cônico. Conforme Henrique (2007), para que um tubo fechado-aberto tenha todos os harmônicos é necessária uma conicidade mínima. O tubo cilíndrico possui apenas os harmônicos ímpares. A conicidade é dada pela relação $B = r_2/r_1$, onde r_1 é o raio do tubo na embocadura e r_2 o raio na extremidade oposta.

A equação de onda generalizada, quando existe uma mudança de seção do tubo, pode ser escrita como na eq. 2:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[S(x) \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \frac{1}{c^2} S(x) \frac{\partial^2}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{eq. 2})$$

onde $S(x)$ representa a área da seção do tubo variável com x , distância do ponto considerado à embocadura. Para tubos cilíndricos, S é constante e a equação de onda toma a forma (eq. 3):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{eq. 3})$$

As ondas formadas dentro dos tubos são estacionárias: são geradas no bocal e refletidas na extremidade aberta. A reflexão ocorre por causa da diferença de impedâncias na fronteira do tubo do instrumento para o ar. A impedância característica é dada por $(P/V) = \rho_0 c$, onde ρ_0 é a densidade volumétrica e c é a velocidade do som no meio. A impedância expressa a resposta vibratória de um sistema diante de uma excitação.

Acima de uma determinada frequência, denominada frequência de corte, as ondas formadas dentro do tubo deixam de ser refletidas na extremidade aberta. Isso ocorre quando o comprimento de onda for da ordem de grandeza do diâmetro do tubo. Quando o músico introduz sua mão na campana da trompa, a frequência de corte sobe porque a abertura diminui. Em tubos largos essa frequência será baixa. A frequência de corte depende também do comprimento do tubo (HENRIQUE, 2007:532).

ESPECTROSCOPIA SONORA

A figura 1 apresenta os espectros de frequência da trompa em Si bemol e do trombone de vara tenor em Dó (escrita e efeito são iguais – série harmônica em Si bemol), ambos emitindo a mesma nota Si bemol 2. A trompa é um instrumento transpositor e consideramos a frequência emitida, isto é, a nota de efeito e não de escrita, neste caso 233 Hz aproximadamente. Podemos observar a diferença de timbres através da relação das intensidades dos harmônicos, porém a envolvente espectral é semelhante, o que mostra timbres parecidos. A trompa apresenta os harmônicos mais agudos, mais que o trombone. Isso evidencia o efeito ao qual Henrique (2007) faz referência, como som brilhante e claro, devido à presença de harmônicos agudos com muita energia. A harmonicidade tem influência da pressão aplicada no bocal, por isso o instrumentista procurou aplicar aproximadamente a mesma pressão, correspondente a um forte do instrumento. Tanto o trombone quanto a trompa apresentam espectros com grande harmonicidade, o que pode ser observado superpondo um ao outro. As linhas mais intensas formam um grupo, cuja fundamental é a frequência do Si bemol 2. Podemos observar, tanto no espectro do trombone quanto no espectro

da trompa, a presença de linhas de menor intensidade entre as linhas da série harmônica do Si bemol 2. Esses pequenos picos são da série harmônica do Si bemol 1. Então vemos um exemplo de um som multifônico. As duas séries harmônicas se superpõem, fazendo com que os picos da série harmônica do Si bemol 2 seja reforçada. Podemos também observar a formação de uma terceira série harmônica, mais visível na trompa, mas de pequena intensidade em ambos os espectros, mostrando a presença da nota Si bemol -1, provavelmente por sons diferenciais.

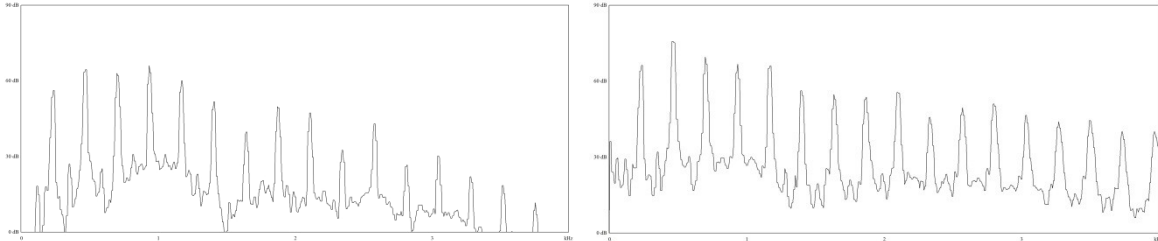


Fig. 1: trombone de vara tenor em Si bemol (esq.) e trompa em Si bemol (dir.) – nota Si bemol 2

O som multifônico está explicado por Henrique (2007): “Apesar dos instrumentos de sopro da orquestra serem concebidos para a execução de sons isolados de altura definida, em determinadas condições é possível a obtenção de mais do que um som soando simultaneamente”. Nem sempre esses sons são obtidos, pois normalmente necessitam de certos ajustes na embocadura, segundo Backus, ou mesmo um ataque explosivo. (HENRIQUE, 2007:543)

Na figura 2 vemos os espectros do trompete em Si bemol e da tuba em Si bemol, ambos emitindo a nota Si bemol 2 (mesma frequência da figura 1). Os dois apresentam som multifônico: as séries harmônicas do Si bemol 1 e do Si bemol 2, como na figura 1. O trompete apresenta, de forma mais intensa que a tuba, os harmônicos superiores, mais agudos, isso mostra a diferença dos timbres. A tuba concentra a energia sonora na região grave. O trompete é mais harmônico que a tuba, o que pode ser observado pelo deslocamento para frequências maiores nos harmônicos superiores da tuba.

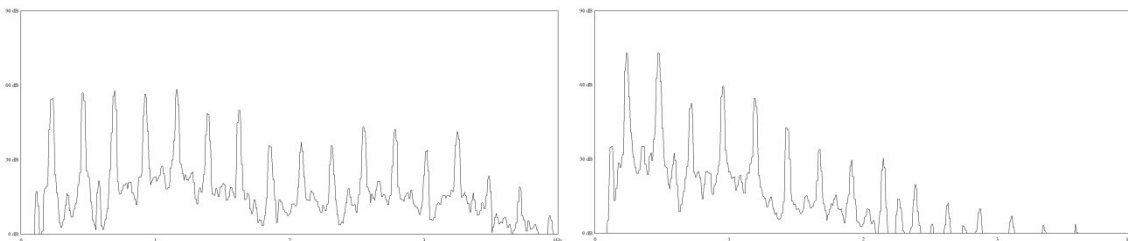


Figura 2: trompete em Si bemol (esquerda) e tuba em Si bemol (direita) – nota Si bemol 2

A figura 3 evidencia a presença da surdina no trompete em Si bemol, emitindo a nota Si bemol 2. (As linhas preenchidas com cor preta são do trompete com surdina). Vemos um pequeno deslocamento para frequências mais altas, no espectro com a surdina, o que já era de se esperar, devido à diminuição do comprimento efetivo do tubo com a presença da surdina. O trompete sem surdina apresenta picos de pequena intensidade entre os harmônicos, o que não aparece com a colocação da surdina. Esses pequenos picos são da série harmônica do Si bemol 1, devidos ao som multifônico (também observado na figura 2). Vemos a diferença de timbre, que pode ser observado comparando as intensidades relativas dos picos com e sem surdina. Com a presença da surdina esse som multifônico desapareceu quase totalmente.

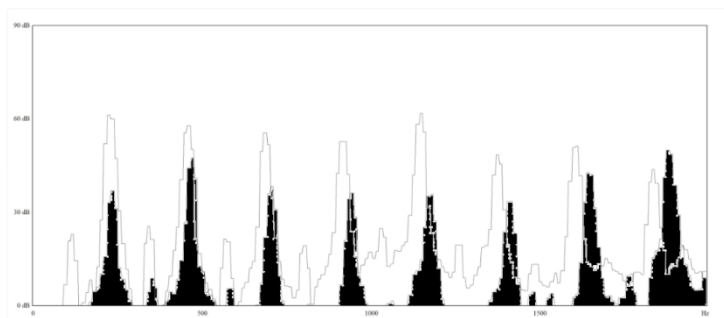


Fig. 3: Trompete em Si bemol: com surdina em preto, sem surdina transparente – nota Si bemol 2

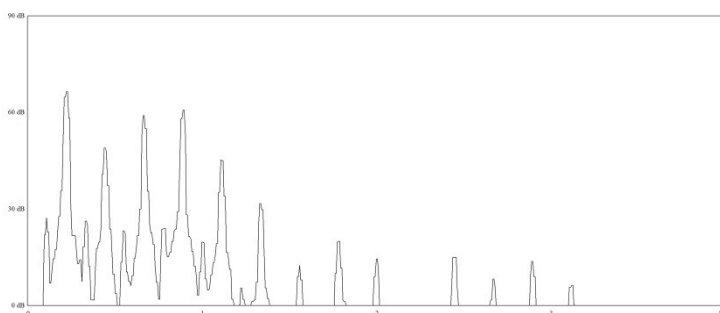


Fig. 4: Trompa em Si bemol – nota Si bemol 2 com cuivré – passa a Lá 2

A figura 4 mostra a trompa em Si bemol emitindo o que seria Si bemol 2, porém com efeito de cuivré (com a mão dentro da campana), o que faz a nota descer um semitom. Então ouve-se o Lá 2, o que se confirma pela frequência fundamental, 220 Hz. A redução de frequência é devida à diminuição da largura da campana, aumento da massa acústica e do comprimento do tubo. O timbre foi claramente modificado, com um forte decaimento, principalmente nos harmônicos de maiores frequências. Esse espectro pode ser comparado com o da figura 1, com a trompa emitindo o Si bemol 2.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos auxílios financeiros que têm permitido o desenvolvimento de nossas pesquisas. Agradecemos também a Maria das Graças Neto Soares pelo auxílio na preparação das figuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fletcher, N. H. e Rossing, T. (2008) *The Physics of Musical Instruments*, New York: Springer.
 Henrique, L. L. (2007). *Acústica Musical*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
 Ribeiro, J. A. dos S. (2005) *Sobre os Instrumentos Sinfônicos e em torno deles*, Rio de Janeiro: Record.
 Rossing, T. (1990). *The Science of Sound*, Massachusetts: Addison-Wesley.
 Sadie, S. (Ed.) (1994). *Dicionário Grove de Música*, Rio de Janeiro: Jorge Zahar.
 Vasconcelos, J. (2002). *Acústica Musical e Organologia*. Porto Alegre: Movimento.