



**III ENCONTRO NACIONAL  
I ENCONTRO LATINO-AMERICANO**

Gramado, RS, 4 a 7 de julho de 1995

**SISTEMATIZAÇÃO E FORMATAÇÃO DE PROCESSOS  
ANALÍTICOS DE CONFORTO ACÚSTICO  
NO EDIFÍCIO EM PROCEDIMENTO UNIFICADO**

Victor M. VALADARES; Roberta V. G. de SOUZA; Arqs., mestrandos  
Curso de Pós-Graduação em Eng. Civil - Centro Tecnológico da UFSC - Campus Trindade -  
Cx. Postal 476 - CEP 88.049 - Florianópolis, SC - TI: (048) 231.9272 - Fax: (048)231.9770  
Eleonora S. de ASSIS, Arq. M.Sc.

Depto. de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo - Escola de Arquitetura da UFMG  
R. Paraíba, 697 - CEP 30.130-140 - B. Horizonte - MG. TI: (031)261.6841 Fax: (031)261.7286

**RESUMO**

Apresenta-se uma proposta de formalização e sistematização de processos de análise numérica simplificada, em etapas da avaliação de desempenho acústico em edificações, objetivando organizá-las e torná-las mais didáticas para uso de estudantes e profissionais. Propõe-se uma tabela onde devem ser insendos os dados de especificação de materiais e suas características acústicas presentes no recinto em análise. a partir dos quais geram-se outros. por operações entre matrizes, tais como, perda por transmissão composta, absorção sonora de superfícies, obtendo os níveis de ruído interno, mediante avaliação espectral e/ou por valores globais e números únicos . comparado-os aos limites de conforto preconizados pela NBR-10. 152 / 87.

**ABSTRACT**

*In his paper presents a proposal for a didactic ~ system atization of simplified proces ses of numerical analysis in evaluation stages of buildings acoustical performance using matrix calculus. li aims to organize, these processes to make their use easier to students and professionals. It is presented a table where data about materials specified in project and as accoustics charachterisics, should be imput from these datas result others about compositive transmission loss, total absorption , in door noise leve/ with spectral and or global values and unix number evalutalion including an analysis considering the Brazilian normalization NBR-10. 152 / 87.*

**PALAVRAS-CHAVE**

Conforto Acústico; Acústica de Edifícios Ensino.

**INTRODUÇÃO**

O presente trabalho incorpora operações entre matrizes na formalização de uma proposta de sistematização de processos de análise numérica em etapas da avaliação de conforto acústico no ambiente construído em projeto ou avaliação pós-ocupação, objetivando organizá-las e torná-las mais didáticas.

Sob o ponto de vista do ensino de graduação de Conforto Acústico nos cursos de Arquitetura e Urbanismo, tem-se procurado fazer uma abordagem mais integrada das diversas etapas de análise existentes e já consolidadas, uma vez que a abordagem convencional, feita de forma estanque, distribuindo os modelos analíticos por capítulos distintos, não contribui para uma visão global que deve caracterizar o processo projetual ou de análise pós-ocupação em edifícios.

Desta forma, a devida integração de modelos analíticos de avaliação da capacidade de absorção, reverberação e isolamento das envoltórias para análise do desempenho acústico de ambientes internos, foi feita pela síntese de uma seqüência lógica dos procedimentos de cálculo, cujas etapas foram organizadas em linguagem matricial e os resultados expressos em Quadros Resumos (QR).

A seqüência consiste em abordar as características acústicas do ambiente segundo dois aspectos : **relacional e inerente**. Na **abordagem relacional**, avalia-se a influência do ambiente acústico de entorno sobre o recinto em enfoque, sendo importante lidar com conceitos relativos ao isolamento sonoro predominantemente. Na **abordagem inerente**, avalia-se o ambiente acústico do recinto em termos da acústica de salas, limitando-se à avaliação das condições de reverberação do local, lidando-se predominantemente com conceitos de absorção e reverberação. Este trabalho se limita a apresentar apenas a **abordagem relacional**, adotando-se o conceito do Índice de Redução Sonora entre Ambientes (NR) (EGAN, 1972) onde:

$$NR = IL_1 - IL_2 \quad [dB, \text{ por banda}] \quad [1]$$

$IL_1$  : nível de intensidade sonora produzido no ambiente 1

$IL_2$  : nível de intensidade sonora produzido no ambiente 2.

$$NR = TL + 10 \log (A/S) \quad [dB, \text{ por banda}] \quad [2]$$

TL : perda por transmissão de uma envoltória homogênea ou heterogênea em dB;

A: absorção sonora total do recinto receptor em sabines;

S: área da parede receptora do ruído em m<sup>2</sup>.

A partir desta última equação de NR, são necessárias equações para cálculo da absorção sonora, TL composto e transmissividade acústica, quando for o caso. Cada envoltória do recinto gera um NR respectivo a um ambiente contíguo de natureza interna ou externa do qual deve-se conhecer o espectro do ruído ou seu valor global, dependendo do âmbito da avaliação que se pretende fazer. Pelo QR proposto calcula-se o NR de uma envoltória específica. Uma vez conhecido o(s) NR crítico(s), pode-se obter o nível de ruído interno do local e compará-lo com índices de ruído de fundo para a atividade predominante do recinto, preconizados pela NBR -10.152/87. Havendo valor superior àquele da Norma, pode-se fazer os ajustes necessários de projeto, a partir da memória de cálculo sistematizada pelo QR. Vale ressaltar que, pelo QR proposto, calcula-se o NR de uma única envoltória, sendo que a equipe está desenvolvendo a avaliação das influências conjuntas dos distintos NR, quando for o caso, a fim de completar o método de avaliação.

## OS QUADROS-RESUMO

Foram criados quadros-resumo para Cálculo do Índice de Redução Sonora, Tempo de Reverberação e Coeficiente de Absorção Ótimo de ambientes para a disciplina de Conforto Acústico ministrado na Escola de Arquitetura da UFMG. Neste trabalho apresenta-se o primeiro dos quadros acima citados.

**Descrição do Quadro Resumo para Cálculo do Índice de Redução Sonora Entre Ambientes.** O QR apresenta uma seqüência lógica de itens que vão sendo preenchidos por conjuntos de dados pertinentes à análise que se pretende fazer. Cada conjunto de dados é, em geral, uma matriz compondo um conjunto de matrizes com as quais se fará as operações. O QR (*figura 01*) é composto por 9 itens a saber: nível de ruído externo, perda por transmissão, absorção das superfícies, absorção de corpos, absorção total, perda por absorção, índice de redução sonora entre ambientes do local, nível de ruído

interno definido por uma componente específica da envoltória e intervalos de valores preconizados pela norma NBR 10.152/87.

Figura 1. EXEMPLO DE UM QR PARA 6 BANDAS DE FREQUÊNCIA

Simb.	Unid.	FREQUÊNCIAS					
	(Hz)	125	250	500	1k	2k	4k

*Avaliação espectral*

**1. Nível de Ruído Externo**

LE	(dB)	$a_{jj}$					
----	------	----------	--	--	--	--	--

**2. Perda por Transmissão**

TL	(dB)	$c_{lj}$					
$t_i$	$(E_i/E_i)$	$d_{lj}$					
$s_i$	$(m^2)$	$e_{lv}$					
$\Sigma s_i \cdot t_i$	$(E_i/E_i \cdot m^2)$	$f_{lj}$					
TLC <sub>i</sub>	(dB)	$g_{lj}$					

**3. Absorção de superfícies**

$\alpha_{i-mat}$	$(E_a/E_i)$	$h_{lj}$					
$s_i$	$(m^2)$	$e_{lv}$					
$\Sigma A_i \cdot \alpha_i$	(sabine)	$r_{lj}$					

**4. Absorção de corpos**

$\alpha_{i-obj}$	$(E_a/E_i)$	$h''_{lj}$					
$n_i$	(sabine)	$l''_{lj}$					
$\Sigma n_i \cdot \alpha_i$	(sabine)	$r''_{lj}$					

**5. Absorção total**

A	(sabine)	$s_{lj}$					
---	----------	----------	--	--	--	--	--

**6. Perda por absorção**

R <sub>a</sub>	(sabine)	$t_{lj}$					
----------------	----------	----------	--	--	--	--	--

**7. Índice de redução do local**

R	(dB)	$x_{lj}$					
---	------	----------	--	--	--	--	--

**8. Nível de ruído interno**

LI	(dB)	$w_{lj}$					
----	------	----------	--	--	--	--	--

**9. Índices da NBR 10.152/87**

NC <sub>sup</sub>	(dB)	$y_{lj}$					
NC <sub>inf</sub>	(dB)	$y_{2j}$					
Faixas Críticas		$z_{lj}$					

*Avaliação global / n° único*

**1.a.**

NSI <sub>G</sub>	(dB)	$b_{II}$
------------------	------	----------

**2.a.**

CTS	(dB)	$c'_{II}$
$t_{500}$	$(E_i/E_i)$	$d'_{II}$
$s_i$	$(m^2)$	$\Sigma e'_{lv}$
$\Sigma s_i \cdot t_i$	$E_i/E_i \cdot m^2$	$f'_{II}$
TLC <sub>502</sub>	(dB)	$c'_{II}$

**3.a.**

NRC <sub>i</sub>	$(E_a/E_i)$	$h'_{II}$
$s_i$	$(m^2)$	$l'_{II}$
$\Sigma A_i \cdot NRC_i$	(sabine)	$r'_{II}$

**4.a.**

NRC <sub>i</sub>	$(E_a/E_i)$	$h''_{II}$
$n_i \cdot \alpha_i$	(sabine)	$l''_{II}$
$\Sigma n_i \cdot NRC_i$	(sabine)	$r''_{II}$

**5.a.**

A'	(sabine)	$s'_{II}$
----	----------	-----------

**6.a.**

R <sub>a</sub> '	(sabine)	$t'_{II}$
------------------	----------	-----------

**7.a.**

R <sub>global</sub>	(dB)	$x'_{II}$
---------------------	------	-----------

**8.a.**

LI <sub>global</sub>	(dB)	$w'_{II}$
----------------------	------	-----------

**9.a.**

NC <sub>sup-global</sub>	(dB)	$y'_{II}$
NC <sub>inf-global</sub>	(dB)	$y'_{2II}$
Avaliação		$z'_{II}$

**FORMULÁRIO**

1) TL <sub>i</sub> = tabelado	7) R <sub>i</sub> = TLC <sub>i</sub> + R <sub>a</sub>
2) TL <sub>i</sub> = 10 . log t <sub>i</sub>	8) R = Soma log. dos R <sub>i</sub>
3) t <sub>i</sub> = 10 <sup>(TL<sub>i</sub>/10)</sup>	9) LI = LE - R
4) TLC <sub>i</sub> = 10 . log (ΣS/Σt <sub>i</sub> . S <sub>i</sub> )	
5) A = Σ A <sub>i</sub> . α <sub>i</sub> + Σ n <sub>i</sub> . α <sub>i</sub>	
6) R <sub>a</sub> = 10 . log(A/S <sub>i</sub> ),	
onde A = absorção total do ambiente	
S <sub>i</sub> = área da parede	
pele qual o ruído atravessa	

**Entrada de dados na linguagem matricial.** Cada item do quadro deve ser representado por matrizes  $K = [k_{ij}]_{m \times n}$ . O significado do índice i varia conforme o item, e o índice j representa a variação de significados atribuídos à i, com relação à bandas de frequência com as quais se trabalha. Outros índices, como u, v por exemplo, foram inseridos à medida que novas atribuições de significados e sua respectiva variação de valores, não necessariamente em relação à frequência, tornaram-se necessários evidenciar. No caso de uma avaliação por valores globais, baseados em classe de transmissão sonora

(CTS) e coeficiente de redução de ruído (NRC), por exemplo, tais valores, entre outros, foram dispostos em matrizes unitárias.

As matrizes presentes nos itens do QR serão geradas ora por um conjunto de elementos previamente definidos e agrupados; ora por operações matriciais de adição, subtração e multiplicação. Quando se utilizar operações matriciais, apresentar-se-á um modelo matemático de cálculo para cada elemento correspondente da matriz, baseado em expressões de cálculo consolidadas pela bibliografia especializada, indicadas na *figura 1*. De uma forma geral as matrizes envolvidas no processo de análise serão das seguintes ordens:  $m \times n$ ,  $m \times 1$ ,  $1 \times n$ ,  $2 \times n$  ou  $1 \times 1$ . Apresenta-se, a seguir, origem das matrizes de cada item. À medida que o leitor for conhecendo-as, poderá identificá-las na *figura 1*, localizando-as no QR.

**Abordagem matricial no Quadro Resumo.** O item 1 do QR apresenta uma matriz  $A = [a_{ij}]_{1 \times n}$ , onde cada  $a_{ij}$  corresponde a um nível de pressão sonora em dB por banda de frequência. A *figura 1* apresenta os elementos da matriz variando por bandas de oitava de 125 Hz a 4 KHz. Quando se quiser avaliar o nível de ruído externo a partir de um valor global, este será representado pela matriz unitária  $B = [b_{ij}]_{1 \times 1}$ .

Em se tratando da análise de uma parede homogênea, o item 2 fica definido pela matriz referente à perda por transmissão (TL) da parede,  $C = [c_{ij}]_{1 \times n}$ . Quando a parede a ser analisada é heterogênea, o item 2 será composto por 4 matrizes, além da matriz  $C = [c_{ij}]_{m \times n}$  que apresenta os valores de TL para cada componente da parede: a matriz  $D = [d_{dj}]_{m \times n}$ , onde entram os valores dos coeficientes de transmissividade acústica dos materiais presentes na componente heterogênea; a matriz  $E = [e_{uv}]_{1 \times q}$ , corresponde às áreas de cada componente; a matriz  $F = [f_{fj}]_{1 \times n}$ , representando o produto  $E \times D$ , onde  $q = m$ ; e a matriz  $G = [g_{gj}]_{1 \times n}$  onde entrarão os valores de TL composta da parede heterogênea.

Os valores da matriz D são obtidos a partir dos valores dos elementos da matriz  $C = [c_{ij}]_{m \times n}$  onde

$$d_{dj} = 10^{(c_{ij}/10)}, \quad d = i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad [3]$$

Os elementos da matriz E são calculados a partir de dados do projeto arquitetônico e a matriz F possui seus elementos obtidos pela expressão

$$f_{fi} = \left( \sum_{u,v} e_{uv} \right) \left\{ \left[ \sum_{k=1}^m (e_{uk} \cdot d_{kj})^{-1} \right] \right\}, \quad f = i = 1; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad [4]$$

A matriz  $G = [g_{gj}]_{1 \times n}$  resulta do produto entre o escalar  $\sum_{u,v} e_{uv}$ , área total da parede, e a matriz

$F' = [f'_{fj}]_{1 \times n}$  onde  $f'_{fj} = (1/f_{fj})$ ,  $f = 1; j = n$ , para  $f_{fj} \in F$ . Assim,

$$g_{gj} = \left( \sum_{u,v} e_{uv} \right) (f'_{fi}), \quad g = i = 1; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad [6]$$

Ao se avaliar a parede por número único, define-se a matriz  $C' = [c'_{ij}]_{1 \times 1}$ , onde  $c'_{ij}$  pode ser obtido pelo método da ASTM / E 413-70T "Determination of Sound Transmission Class", baseado no elemento  $c_{ij}$  ou  $g_{gj}$  cujo índice  $j$  correspondente a 500 Hz, referentes à da matriz C ou G respectivamente.

Os itens 3, 4, e 5 referem-se à absorção sonora. No item 3 são reunidas matrizes referentes ao cálculo da absorção sonora do recinto, levando-se em contas apenas a contribuição das superfícies internas de suas paredes (teto, piso, etc...). Assim trabalha-se com as matrizes  $H = [h_{ij}]_{m \times n}$ , referente aos coeficientes de absorção sonora;  $L = [l_{uv}]_{1 \times q}$  que reúne as áreas de cada tipo de material de acabamento utilizado e a matriz da absorção total das superfícies internas  $R = [r_{rj}]_{1 \times m}$ , resultante do produto entre as matrizes L e H, sendo  $q = m$  e

$$r_{rj} = \sum_{k=1}^m (l_{uk} \cdot h_{kj}), \quad r = u = 1; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad [7]$$

Ao se trabalhar com número único de absorção sonora, é útil se definir uma matriz  $H' = [h'_{ij}]_{m \times 1}$ . O valor da absorção total nestas circunstâncias será a matriz unitária  $R' = [r'_{rj}]_{1 \times 1}$  oriunda de  $L \times H'$ , e

$$r'_{rj} = \left( \sum_{u,v}^{l,q} l_{uv} \right) h_{ij}, \quad r=i=j=1. \quad [8]$$

O item 4 possui procedimento semelhante ao item 3, levando-se em conta, agora, a absorção de corpos. Defini-se, então, as matrizes:  $H'' = [h''_{ij}]_{m \times n}$ , para os coeficientes de absorção;  $L' = [l'_{uv}]_{l \times v}$ , para reunir os números de corpos considerados;  $R'' = [r''_{rj}]_{l \times n}$ , representando valores da absorção dos corpos, resultante do produto  $L' \times H''$ , onde

$$r''_{rj} = \sum_{k=1}^m (l'_{rk} \cdot h''_{kj}), \quad r=i=1; j=1,2,\dots, n. \quad [9]$$

Para a avaliação baseada em número único referente à absorção, é útil definir as matrizes unitárias  $H''' = [h'''_{ij}]_{l \times l}$  referente ao coeficiente de absorção e  $R''' = [r'''_{rj}]_{l \times l}$  referente ao valor total da absorção para corpos presentes no ambiente, onde

$$r'''_{rj} = \left( \sum_{u,v}^{l,q} l'_{uv} \right) \cdot h'''_{ij}, \quad r=i=j=1. \quad [10]$$

O item 5 contém valores referentes à absorção total dos ambientes, reunindo as contribuições parciais dos materiais de acabamento das superfícies internas e dos corpos presentes. Em se tratando da avaliação espectral, cria-se a matriz  $S = [s_{ij}]_{l \times n}$  como adição entre as matrizes  $R$  e  $R''$ , onde

$$s_{ij} = r_{rj} + r''_{rj}, \quad i=r=1; j=1,2,\dots, n. \quad [11]$$

Para avaliação por número único, é importante definir a matriz unitária  $S' = [s'_{ij}]_{l \times l}$  resultado da adição entre as matrizes  $R'$  e  $R'''$ , onde

$$s'_{ij} = r'_{ij} + r'''_{ij}, \quad i=j=1 \quad [12]$$

O item 6 reúne dados referentes à contribuição da absorção para o isolamento sonoro reunidos na matriz  $T = [t_{ij}]_{l \times n}$ , onde

$$t_{ij} = 10 \cdot \log \left[ \left( \sum_{u,v}^{l,q} e_{uv} \right)^{-1} \cdot s_{ij} \right], \quad i=j=1, 2, \dots, n. \quad [13]$$

Avaliando-se por número único, a perda por absorção é indicada pela matriz unitária  $T' = [t'_{ij}]_{l \times l}$ , onde

$$t'_{ij} = 10 \cdot \log \left[ \left( \sum_{u,v}^{l,q} e_{uv} \right)^{-1} \cdot s'_{ij} \right], \quad i=j=1 \quad [14]$$

O item 7 indica valores referentes ao índice de redução sonora do ambiente em relação à uma parede específica, que estão reunidos na matriz  $X = [x_{ij}]_{l \times n}$ , obtida pela soma entre as matrizes  $C = [c_{ij}]_{l \times n}$  (ou  $G = [g_{ij}]_{l \times n}$  caso a parede seja homogênea ou heterogênea) e  $T = [t_{ij}]_{l \times n}$ , onde

$$x_{ij} = c_{ij} + t_{ij}, \quad i=1; j=1,2,\dots, n. \quad [15]$$

Se a análise estiver sendo feita por números únicos, o índice de redução será expresso pela matriz unitária  $X' = [x'_{ij}]_{l \times l}$ , gerada pela soma entre as matrizes  $C'$  e  $T'$ , para

$$x'_{ij} = c'_{ij} + t'_{ij}, \quad i=j=1 \quad [16]$$

O item 8 diz respeito à matriz cujos elementos correspondem ao nível de ruído transmitido ao ambiente através da parede analisada dentro das condições definidas na *Introdução*. Esta matriz,  $W = [w_{ij}]_{l \times n}$  é definida para avaliação espectral, obtida pela subtração matricial entre  $A$  e  $X$ , onde

$$w_{ij} = a_{ij} - x_{ij}, \quad i=1; j=1,2,\dots, n. \quad [17]$$

No caso de um avaliação envolvendo números únicos esta matriz torna-se unitária, sendo definida como  $W' = [w'_{ij}]_{l \times l}$ , resultado da subtração matricial entre  $B$  e  $X'$ . Então

$$w'_{ij} = b_{ij} - x'_{ij}, \quad i=j=1 \quad [18]$$

O item 9 representa uma matriz cuja primeira e segunda linhas correspondem, respectivamente, aos valores superiores e inferiores apresentados pela NBR 10.152/87 em função do tipo de cômodo avaliado. Caso a avaliação seja espectral, esta matriz é definida como  $Y = [y_{ij}]_{2 \times n}$ , onde

$y_{1j}$ , ( $j = 1, 2, \dots, n$ ): valor que representa o nível sonoro aceitável para atividade; [19]  
 $y_{2j}$ , ( $j = 1, 2, \dots, n$ ): valor que representa o nível sonoro para conforto.

Para avaliação por números únicos, define-se  $Y' = [y'_{ij}]_{2 \times 1}$ , onde  $y'_{1j} = NC$  superior;  $y'_{2j} = NC$  inferior, sendo tais valores obtidos da NBR 10.152/87 em função do tipo de cômodo avaliado. Uma vez completados os itens 8 e 9, os valores dos elementos das respectivas matrizes são comparados, tanto para avaliação espectral como em termos de valores globais. No primeiro caso, faz-se a comparação dos elementos da matriz  $W$  com os da matriz  $Y$ . Caso  $w_{1j} > y_{1j}$ , os valores excedem o nível sonoro aceitável para a finalidade, gerando desconforto, sem necessariamente implicar em risco à saúde; Para  $y_{1j} < w_{1j} < y_{2j}$ , os valores estão entre o nível sonoro para conforto e o aceitável; Se  $w_{1j} < y_{1j}$ , os valores são também aceitáveis. No segundo, comparam-se os elementos das matrizes  $W'$  e  $Y'$ . Caso  $w'_{11} > y'_{11}$ , os valores excedem o nível sonoro aceitável para a finalidade, gerando desconforto, sem necessariamente implicar em risco à saúde. Para  $y'_{21} < w'_{11} < y'_{11}$ , os valores estão entre o nível sonoro para conforto e o aceitável; Se  $w'_{11} < y'_{21}$ , os valores também são aceitáveis. Uma vez comparados os itens 8 e 9, pode-se identificar problemas de desempenho acústico no ambiente e, caso necessário, se propor correções de forma a tornar o ambiente acusticamente compatível com a NBR.

## CONCLUSÃO

O conjunto final de dados obtidos de operações matriciais e dispostos nas tabelas do QR, onde se apresentam integradamente todas as etapas da análise numérica da avaliação acústica proposta, oferece possibilidades objetivas de formatação e sistematização dos modelos matemáticos envolvidos no procedimento, sendo suficientemente flexível para admitir uma grande diversidade de hipóteses sobre situações de projeto, o que facilita ter uma visão global dos aspectos acústicos considerados no processo projetual ou de análise de pós-ocupação nos edifícios. O QR consiste, então, numa memória de cálculo didática e organizada a qual o aluno ou profissional podem recorrer sempre que necessário, com rápida identificação de resultados parciais e suas fontes.

## REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Níveis de ruído para conforto acústico*. ABNT, dez. 1987.
2. EGAN, M. David. *Concepts in architectural acoustics*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1972.
3. JOSSE, Robert. *La acústica en la construcción*. Barcelona, Gustavo Gili, 1975.
4. GERGES, Samir N.Y. *Ruído: fundamentos e Controle*. Florianópolis, S.N.Y.Gerges, 1992.
5. SILVA, Pêrides. *Acústica arquitetônica*. Belo Horizonte, Edições Engenharia e Arquitetura, 1971.