



Métodos de cálculo

Índice

Introdução.....	3
Cálculo de R'_w e $D_{nT,w}$	4
Cálculo de R'_w e $D_{nT,w}$	5
Cálculo de R_{wij}	5
Nota relacionada às estruturas laterais a se considerar.....	6
Cálculo de R_{wi}	6
Nota relacionada a R_{wi}	9
Cálculo de ΔR_{wij}	9
Nota relacionada a $\Delta R_{w, ij}$	9
Cálculo de ΔR_w	10
Cálculo de K_{ij}	12
Cálculo do desempenho acústico de fachada ($D_{2m,nT,w}$)	17
Cálculo de D_{2mnTw}	17
Cálculo de R'_w	17
Cálculo de R_{wi}	17
Cálculo de D_{neiw}	18
Cálculo de K	18
Cálculo de ΔL_{fs}	18
Método de cálculo inverso.....	20
Determinação do Índice de Redução Sonora de uma esquadria	21
Cálculo do desempenho acústico de piso ao ruído de impacto ($L'_{nT,w}$).....	26
Cálculo de $L'_{nT,w}$	26
Cálculo de $L'_{n,w}$	26
Cálculo de L_{nweq}	27
Cálculo de ΔL_w	28
Cálculo do tempo de reverberação de um ambiente – T_{60}	30
Método de cálculo	30
Método de cálculo do T_{60} ideal.....	31

Introdução

Em seguida, informa-se uma síntese dos modelos de cálculo utilizados em PROJÉTUS.

Os procedimentos são expostos pelas normas:

- UNI EN 12354 – 1 (novembro de 2002) Isolamento sonoro aéreo entre ambientes.
- UNI EN 12354 – 2 (novembro de 2002) Isolamento sonoro de impacto entre ambientes.
- UNI EN 12354 – 3 (novembro de 2002) Isolamento sonoro aéreo contra o ruído exterior.

E pelo Relatório Técnico Italiano:

- UNI TR 11175 “Acústica em edifícios. *Guia para normas série UNI EN 12354 para a previsão dos desempenhos acústicos das edificações. Aplicação na tipologia construtiva nacional*”.

O cálculo do tempo de reverberação é efetuado utilizando a conhecida fórmula de Sabine.

No software são ainda inseridas algumas relações matemáticas derivadas da mais recente bibliografia.

Para informações ou atualização do software e dos manuais verificar: www.multinova.ind.br.

A utilização deste software demanda conhecimentos profissionais de Engenharia e Arquitetura. Considerando que o usuário pode utilizar tanto a base de dados do programa quanto lançar sua própria informação de massa superficial, a Multinova não se responsabiliza pelo lançamento de dados técnicos incorretos ou em desacordo com as normas técnicas vigentes.

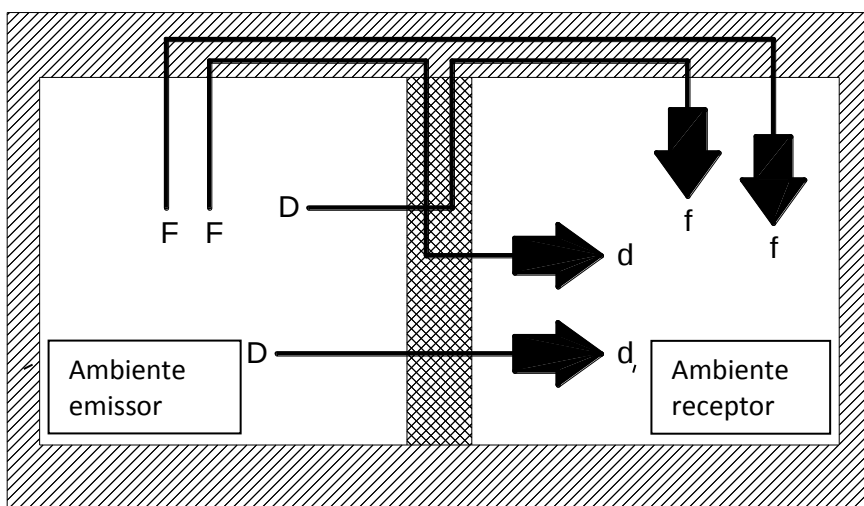
Adverte-se, ainda, que os dados constantes do programa são declarados por fabricantes de sistemas construtivos, não possuindo a Multinova responsabilidade quanto à informação repassada. Os resultados calculados no Software podem sofrer alterações devido à qualidade e ou utilização incorreta de materiais ou aplicação destes em desacordo com o especificado pelo Fabricante.

Cálculo de R'_w e $D_{nT,w}$

O Índice de Redução Sonora aparente (R'_w) e a Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{nT,w}$) caracterizam a capacidade de um elemento divisório (parede ou piso), posto em obra entre dois ambientes, da redução do ruído. Tais índices levam em conta, além das características intrínsecas de redução sonora da divisória, também todas as vias de transmissão sonora lateral.

Nas situações mais recorrentes, as vias de transmissão são treze (13), dos quais uma (01) é direta (através da divisória em observação) e doze (12) são de transmissão lateral (indireta), três para cada lado da parede. Nas figuras seguintes são configurados a via de transmissão direta (D_d) e as três vias de transmissão laterais para um dos quatro lados do elemento divisório (F_f , F_d , D_f) onde:

- D: indica o elemento divisório lateral ambiente emissor
- d: indica o elemento divisório lateral ambiente receptor
- F: indica a estrutura lateral lado ambiente emissor
- f: indica a estrutura lateral lado ambiente receptor



Cálculo de R'_w e $D_{nT,w}$

O Índice de Redução Sonora aparente (R'_w) de uma divisória que separa dois ambientes adjacentes pode ser calculado “combinando” entre elas treze (13) vias de ruído com a seguinte relação matemática:

$$R'_w = -10 \log \left(10^{\frac{-R_{wDd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{wFf}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{wDf}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{wFd}}{10}} \right)$$

onde:

$R_{w, ij}$ é o índice de redução sonora que caracteriza a via ij

n é o número de lados do elemento divisório (geralmente quatro)

O descritor $D_{nT,w}$ se obtém partindo de R'_w com a seguinte relação:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log \frac{0,16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s}$$

onde:

V é o volume do ambiente receptor [m^3]

T_0 é o tempo de reverberação de referência para ambientes habitacionais, igual a 0,5 segundos

S_s é a área do elemento de separação [m^2]

Cálculo de R_{wij}

Toda simples via de transmissão sonora “ ij ”, que parte da divisória “ i ” e termina na divisória “ j ”, é determinado com a relação:

$$R_{w,ij} = \frac{R_{w,i} + R_{w,j}}{2} + \Delta R_{w,ij} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S}{l_0 l_{ij}}$$

onde:

$R_{w,i}$ é o índice de avaliação de isolamento sonoro da estrutura “ i ” sem elementos de revestimento (contrapisos flutuantes, contraparedes, forros) (dB)

$R_{w,j}$ é o índice de avaliação de isolamento sonoro da estrutura “ j ” sem elementos de revestimento (contrapisos flutuantes, contraparedes, forros) (dB)

$\Delta R_{w, ij}$ é o aumento do índice de avaliação de isolamento sonoro devido à aposição de camadas de revestimento durante a via $i-j$ (contrapisos flutuantes, contraparedes, forros)

K_{ij} é o índice de redução das vibrações da via $i-j$ (dB)

S é a superfície das divisórias (m^2)

l_0

é o comprimento de referência igual a 1 m.

l_{ij} é o comprimento da junta entre as estruturas ij consideradas

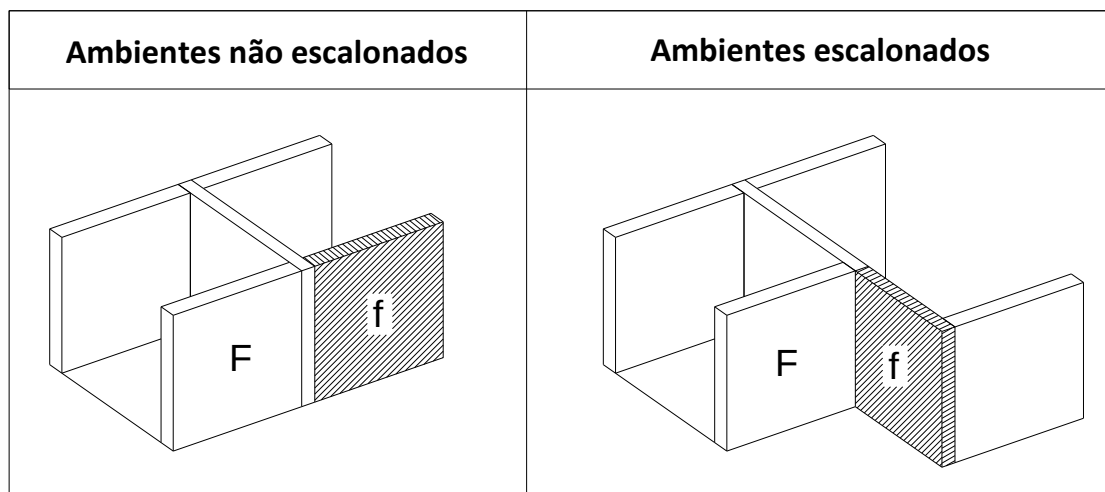
No caso que se esteja analisando a via direta (Dd) a fórmula se reduz a:

$$R_{w,Dd} = R_{w,D} + \Delta R_{w,Dd}$$

Em seguida, se informa uma série de indicações sobre os vários termos que compõem as relações matemáticas.

Nota relacionada às estruturas laterais a se considerar

Se os dois ambientes são entre eles escalonados e os volumes dos ambientes não correspondem, é necessário considerar como elemento lateral (f) no ambiente receptor a continuação da parede divisória.



Cálculo de R_{wi}

O Índice de Redução Sonora (R_w) de uma estrutura pode ser determinado baseando-se (em ordem de credibilidade):

- dados de laboratório
- correlações específicas
- relações gerais

Dados de laboratório

Como dados de laboratório, devem ser utilizadas informações mostradas em relatórios de prova obtidos mediante medições conforme à norma europeia de aprovação mais recente (normas da série ISO 10140).

Evidencia-se a necessidade de verificar se a amostra medida em laboratório seja totalmente similar à divisória que será feita em obra.

Em particular, caso sejam consideradas divisórias em tijolos, aconselha-se verificar:

- a composição da argamassa
- a presença de juntas na argamassa horizontais e verticais entre os tijolos
- a presença de traços de instalações ou de elementos de descontinuidade

No caso em que duas divisórias estejam disformes, necessário aplicar ao resultado da prova de laboratório oportunos coeficientes de correção. A dimensão de tais coeficientes deve ser avaliada pelo projetista com base na própria experiência.

Para as paredes em tijolos ou alvenaria, igualmente, aconselha-se verificar no certificado de prova os tempos de secagem da amostra medida.

Correlações específicas

Para as correlações específicas, pretende-se a utilização de exames de laboratório efetuados em divisórias tendo características morfológicas análogas àquelas em observação.

Relações gerais

Para as relações gerais, se pretendem adequados algoritmos matemáticos.

Em função da massa frontal da estrutura (m') (Kg/m^2) (definida como o produto entre a densidade e a espessura do elemento), e eventualmente de outros parâmetros, se obtém o valor de R_w do elemento divisório mediante uma apropriada equação.

Existem muitas fórmulas desenvolvidas por diferentes laboratórios, a seguir são elencadas algumas delas. Para cada fórmula são indicados o país de proveniência e os limites de validade.

Relações propostas por relatório técnico UNI TR 11175

Laboratórios italianos:

$$R_w = 20 \log (m')$$

Tal fórmula é válida para divisórias horizontais e verticais (individuais ou duplas) com $m' > 80 \text{ kg}/\text{m}^2$. No caso de paredes duplas a cavidade deve ser sem material de absorção sonora e de espessura igual ou menor a 5 cm.

Fórmula CEN:

$$R_w = 37,5 \log (m') - 42$$

Tal fórmula é válida para estruturas de base monolítica com $m' > 150 \text{ kg}/\text{m}^2$.

Nota: para as duas relações acima descritas, o Relatório Técnico UNI TR 11175 propõe adicionar um fator de cálculo igual a **- 2 dB**

Outras fórmulas

A seguir, se informam outras fórmulas empíricas, propostas por laboratórios italianos e europeus, obtidos por regressão de dados experimentais.

Paredes monocamada - laboratórios europeus:

Alemanha (válida para divisórias com $m' > 150 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 32,1 \log (m') - 28,5$

Áustria (válida para divisórias com $m' > 150 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 32,4 \log (m') - 26$

França (válida para divisórias com $m' > 150 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 40 \log (m') - 45$

França (válida para divisórias com $m' < 150 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 13,3 \log (m') + 12$

Grã-Bretanha (válida para divisórias com $m' > 100 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 21,6 \log (m') - 2,3$

Paredes monocamada - laboratórios italianos:

Itália - paredes de alvenaria leve (válida para divisórias com $m' > 100 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 16,9 \log (m') + 3,6$

Itália - paredes de alvenaria (válida para divisórias com $80 < m' < 400 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 16 \log (m') + 7$

Itália - paredes em blocos de argila expandida. (válida para divisórias com $115 < m' < 400 \text{ kg}/\text{m}^2$): $R_w = 26 \log (m') - 11$

Paredes de concreto celular autoclavado ($m' < 150 \text{ Kg}/\text{m}^2$): $R_w = 32,6 \log (m') - 22,5$

Paredes de concreto celular autoclavado ($m' \geq 150 \text{ Kg}/\text{m}^2$): $R_w = 26,1 \log (m') - 8,4$

Paredes duplas

Itália – paredes duplas em alvenaria

A relação foi obtida a partir de fontes bibliográficas, não foram mencionadas as condições de validade. Aconselha-se, assim, comparar os resultados com aqueles fornecidos pelas outras fórmulas.

$$R_w = 20 \log (m'd) - 10$$

Onde:

d espessura da cavidade [cm]

Itália - paredes de alvenaria, cavidade > 5 cm preenchido, ao menos parcialmente, com material poroso ou fibroso de absorção sonora.

$$R_w = 16 \log (m') + 10$$

Itália - paredes em blocos de argila expandida, cavidade sem material isolante interposto (válida para divisórias com $115 < m' < 400 \text{ kg/m}^2$):

$$R_w = 26 \log (m') - 11$$

Paredes em chapas de gesso revestido

Alemanha

Válida para divisórias feitas com estrutura individual:

$$R_w = 20 \log (m') + 10 \log (d) + e + 5$$

Válida para divisórias feitas com estrutura dupla:

$$R_w = 20 \log (m') + 10 \log (d) + e + 10$$

Onde:

d profundidade da cavidade em cm

e espessura do painel em fibra mineral em cm

As fórmulas são válidas para:

- massa entre 70-80 kg/m²
- espessura total “d” entre 25-30 cm
- valores de “e” contidos entre 6-8 cm.

Para valores superiores as fórmulas tendem a superestimar o resultado.

Pisos

Itália – piso em concreto armado

(válida para pisos com $250 < m' < 500 \text{ kg/m}^2$): $R_w = 23 \log (m') - 8$

Nota relacionada a R_{wi}

No caso de estruturas revestidas com camadas adicionais, os índices R_{wi} e R_{wj} a serem inseridos na fórmula para o cálculo de R_{wij} são aquelas das estruturas de base, sem camadas adicionais como: contraparedes, forros ou contrapisos flutuantes.

No caso de estruturas laterais constituídas por paredes duplas com cavidade ou por paredes com revestimento leve, os índices R_{wi} e R_{wj} a serem inseridos na fórmula para o cálculo de R_{wij} são aqueles da própria camada interior.

Cálculo de ΔR_{wij}

ΔR_{wij} se calcula mediante a relação:

$$\Delta R_{w,ij} = \Delta R_{w,i} + \frac{\Delta R_{w,j}}{2} \text{ se } \Delta R_{wi} < \Delta R_{wj}$$

ou

$$\Delta R_{w,ij} = \Delta R_{w,j} + \frac{\Delta R_{w,i}}{2} \text{ se } \Delta R_{wi} > \Delta R_{wj}$$

Onde:

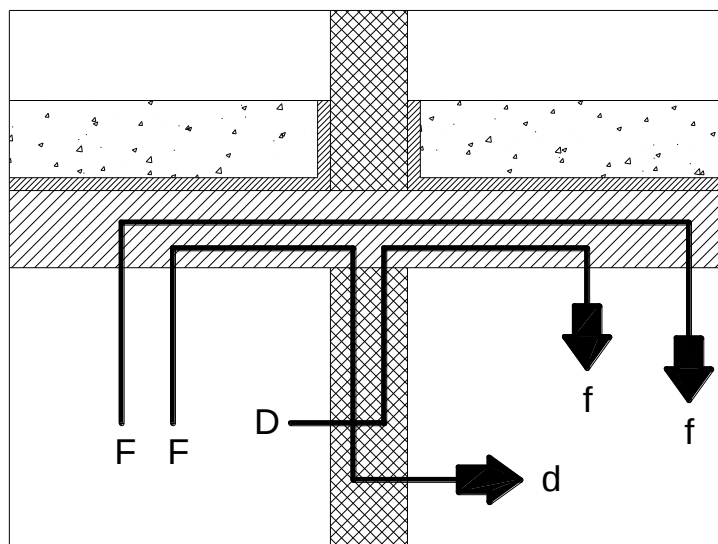
ΔR_{wi} : aumento de R_w devido à camada de revestimento no lado i

ΔR_{wj} : aumento de R_w devido à camada de revestimento no lado j

Obviamente, no caso não esteja presente alguma camada de revestimento $\Delta R_w = 0$

Nota relacionada a $\Delta R_{w, ij}$

As camadas de revestimento a serem consideradas no cálculo de $\Delta R_{w, ij}$ são somente aquelas que efetivamente são atravessadas pela via de transmissão do ruído obtido em observação. Desta forma, por exemplo, caso se esteja considerando as vias que atravessam pelo piso sobre a parede em observação, os contrapisos flutuantes do plano superior não serão considerados influentes (v. figura).



Cálculo de ΔR_w

O aumento da Redução Sonora ΔR_w , característico de uma determinada estrutura de revestimento, pode ser dado por ensaios de laboratório ou se calcula em função da frequência de ressonância (f_0) do sistema “estrutura de base-revestimento”.

No caso, se estejam analisando camadas adicionais cuja camada elástica é diretamente fixada à estrutura de base sem vigas ou sustentações (ex.: contrapisos flutuantes):

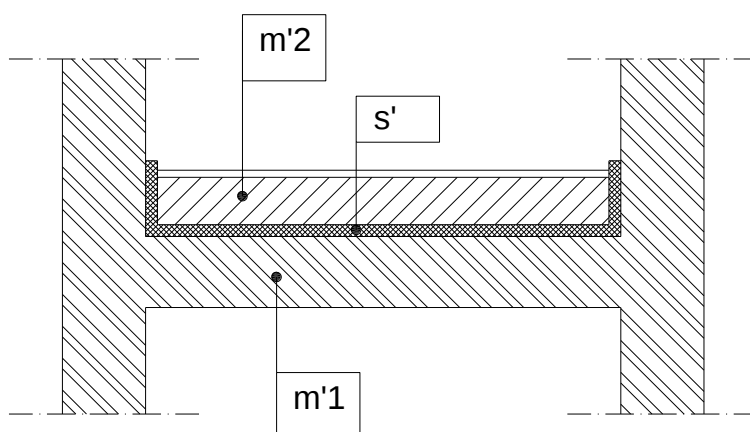
$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)}$$

onde:

s' é a rigidez dinâmica da camada elástica interposta obtida segundo ensaios de laboratório em conformidade à UNI EN 29052-1; 1993 [MN/m³]

m'_1 é a massa por unidade de superfície da estrutura de base em kg/m² (ex.: a laje de sustentação)

m'_2 é a massa para unidade de superfície da estrutura de revestimento em kg/m² (ex.: o contrapiso flutuante)



No caso, se estejam analisando camadas adicionais não diretamente ligadas à estrutura de base, feitas com vigas e sustentações e com a cavidade preenchida com material poroso tendo resistência ao fluxo do ar > 5 kPas/m² (ex.: contraparedes ou forros em placa de estuque com fibra mineral na cavidade):

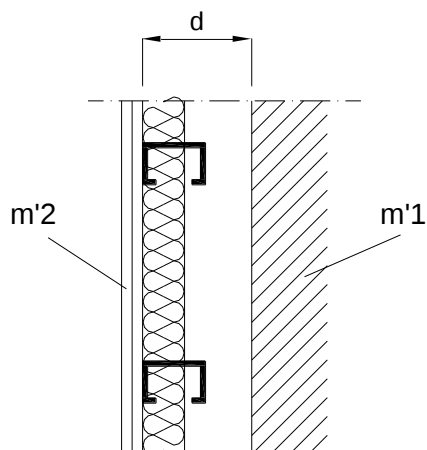
$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,111}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)}$$

onde:

d é a espessura da cavidade [m] (distância entre parede e contraparede sem material isolante)

m'_1 é a massa para unidade de superfície da estrutura de base em kg/m²

m'_2 é a massa para unidade de superfície da estrutura de revestimento em kg/m²



Em função de f_o e do Índice de Redução Sonora (R_w) da estrutura de base da tabela seguinte se obtém o valor de ΔR_w

Frequência de ressonância f_o	ΔR_w
$f_o \leq 80$	$35 - \frac{R_w}{2}$
$80 < f_o \leq 100$	$32 - \frac{R_w}{2}$
$100 < f_o \leq 125$	$30 - \frac{R_w}{2}$
$125 < f_o \leq 160$	$28 - \frac{R_w}{2}$
$160 < f_o \leq 200$	-1
$200 < f_o \leq 250$	-3
$250 < f_o \leq 315$	-5
$315 < f_o \leq 400$	-7
$400 < f_o \leq 500$	-9
$500 < f_o \leq 1600$	-10
$f_o > 1600$	-5

Cálculo de Kij

O índice de redução das vibrações K_{ij} , característica da via i-j, pode ser determinado conhecendo:

- o tipo de conexão entre a parede divisória e as estruturas laterais
- as massas para unidade de superfície das estruturas envolvidas.

K_{ij} depende do parâmetro M definido como:

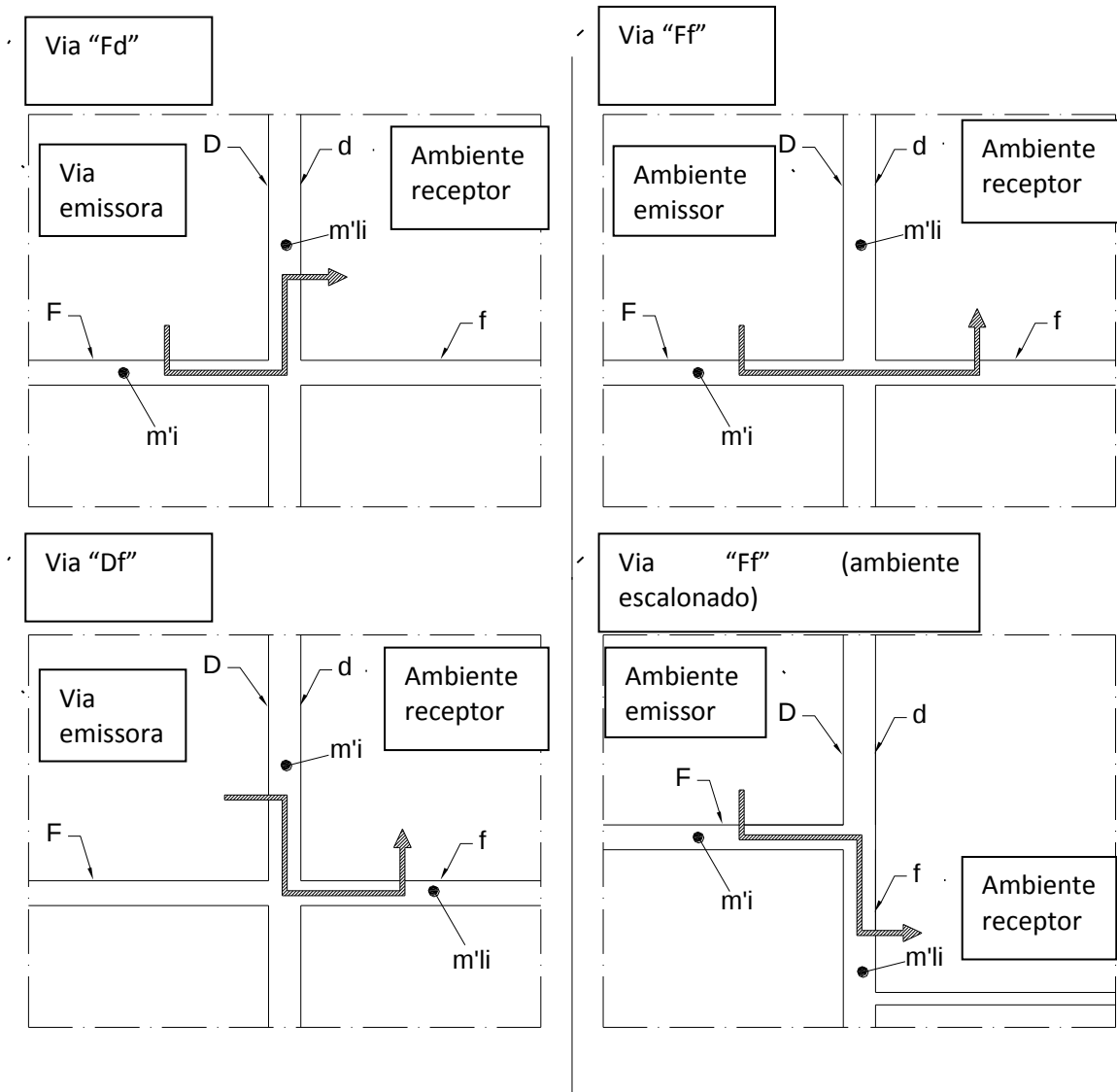
$$M = \log \frac{m'_{li}}{m'_i}$$

onde:

m'_i é a massa superficial do elemento "i" da via lateral i-j (kg/m^2)

m'_{li} é a massa superficial do elemento perpendicular ao elemento "i", a esse conectado na junta considerada (kg/m^2)

Exemplos:

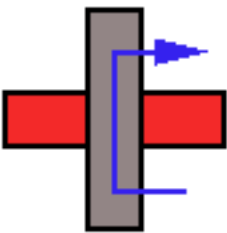
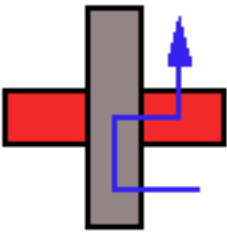


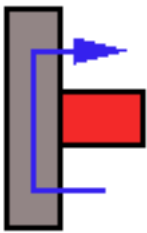
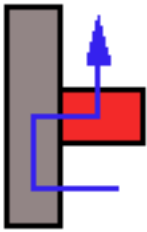
Nota relacionada a M

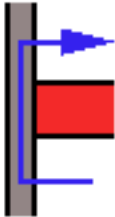
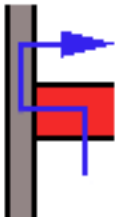
No caso de estruturas revestidas com camadas adicionais, para o cálculo do índice M se considera a massa somente da estrutura de base.

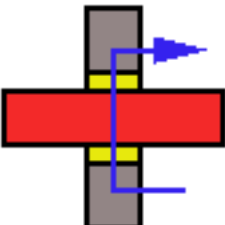
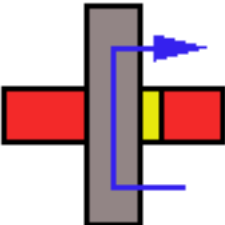
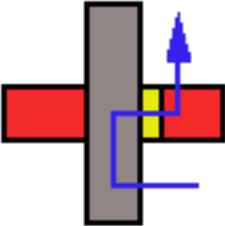
No caso de estruturas laterais constituídas por paredes duplas com cavidade ou por paredes com revestimento leve, o índice M se calcula considerando a massa de toda a estrutura.

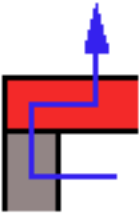
Nas tabelas seguintes são mostradas as relações para calcular K_{ij} com base ao tipo de ligação e ao tipo de via considerado.

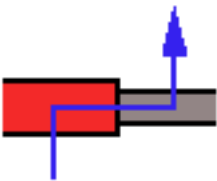
TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	K_{ij}
Rígida em cruz (conexão entre paredes pesadas, ex.: em alvenaria)		$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7 M^2$
		$K_{12} = 8,7 + 5,7 M^2$

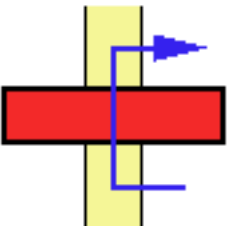
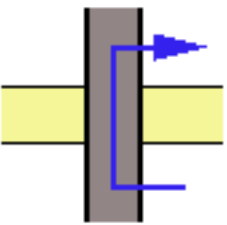
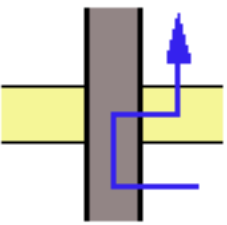
TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	K_{ij}
Rígida em T (conexão entre paredes pesadas, ex.: em alvenaria)		$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7 M^2$
		$K_{12} = 5,7 + 5,7 M^2$

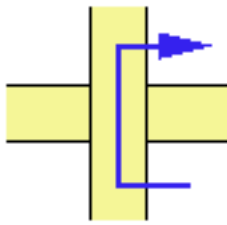
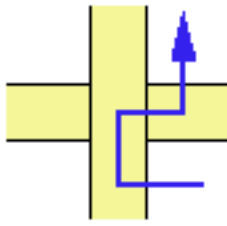
TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	Kij
Estrutura homogênea e fachada leve		$K_{13} = 5 + 10M$ $K_{13} > 5 \text{ dB}$
		$K_{12} = 10 + 10 M $

TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	Kij
Estruturas homogêneas com camada de separação de isolamento acústico		$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7 M^2 + 12$
		$K_{24} = 3,7 + 14,1M + 5,7 M^2$ $0 > K_{24} > -4 \text{ dB}$
		$K_{12} = 5,7 + 5,7 M^2 6$

TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	Kij
Estrutura homogênea com ângulo		$K_{12} = 15 M - 3$ $K_{12} > -2 \text{ dB}$
TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	Kij

Estrutura homogênea com troca de espessura		$K_{12} = 5M^2 - 5$
--	---	---------------------

TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	Kij
Dupla parede leve e estrutura homogênea		$K_{13} = 10 + 20M$ $K_{13} > 10 \text{ dB}$
		$K_{24} = 3 + 14,1M + 5,7 M^2$ $m'1/m'2 > 3$ Nota: Para este via Acoustic utiliza a relação matemática proposta em UNI TR 11175, não aquela informada em UNI EN 12354-1 ($K_{24} = 3 - 14,1M + 5,7 M^2$). Esta última fórmula, segundo quanto indicado pela maioria dos membros da Comissão Acústica UNI, resulta em não correta.
		$K_{12} = 10 + 10 M $

TIPO DE LIGAÇÃO	VIA DE TRANSMISSÃO	Kij
Paredes duplas leves acopladas		$K_{13} = 10 + 20M$
		$K_{12} = 10 + 10 M $

O valor do índice K_{ij} deve, em todo caso, ser superior ou igual a um valor mínimo dado pela relação:

$$K_{ij} = 10 \log \left[l_{ij} l_0 \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right]$$

onde:

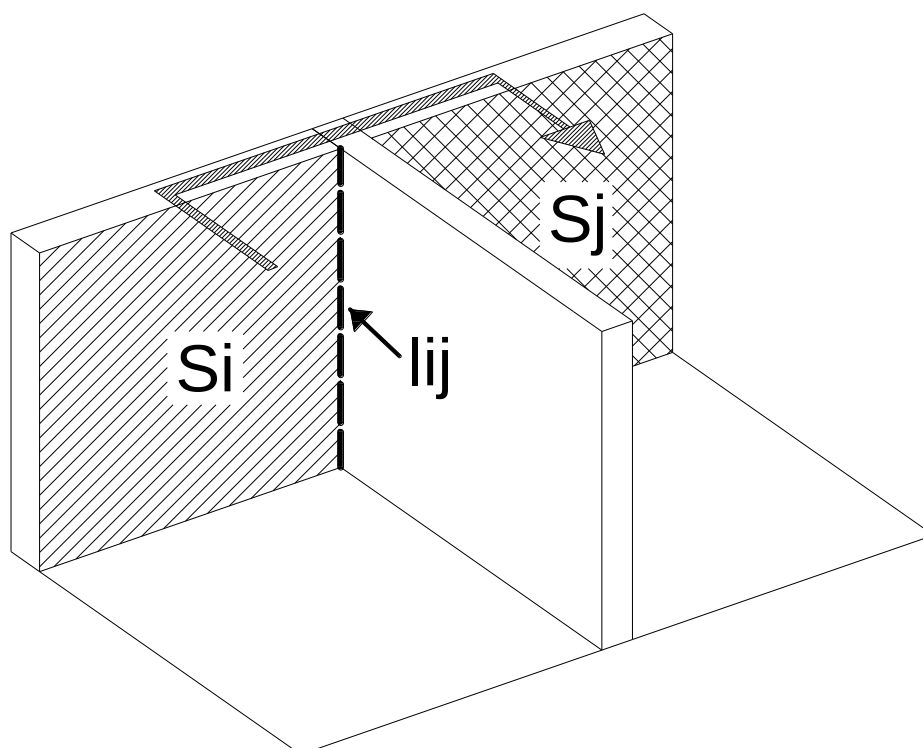
S_i é a superfície do elemento i no ambiente emissor [m^2]

S_j é a superfície do elemento j no ambiente receptor [m^2]

l_{ij} é o comprimento da junta ij [m]

l_0 é o comprimento de referência igual a 1 m

A imagem que segue representa os vários fatores caso considerar-se o via lateral ij = Ff



Cálculo do desempenho acústico de fachada ($D_{2m,nT,w}$)

O índice de avaliação do desempenho acústico de fachada, sendo a Diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros de distância da fachada (D_{2mnTw}), caracteriza a capacidade da fachada, de um específico cômodo, de redução do ruído proveniente do exterior.

Tal índice depende do Índice de Redução Sonora aparente da fachada (R'_w), da presença ou ausência de barreiras externas e das dimensões do cômodo em observação.

Cálculo de D_{2mnTw}

O índice D_{2mnTw} é calculado com a seguinte relação

$$D_{2m,nTw} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{V}{6T_0 S_{tot}} \right)$$

onde:

R'_w é o Índice de Redução Sonora aparente da fachada [dB]

ΔL_{fs} é o termo corretivo que quantifica a influência de eventuais elementos vedantes [dB]

V é o volume do ambiente considerado [m³]

T_0 é o tempo de reverberação de referência, assumido como sendo igual a 0,5 s

S_{tot} é a superfície de fachada vista do interior [m²]

Cálculo de R'_w

O Índice de Redução Sonora aparente (R'_w) da fachada é calculado com base nos valores do índice de redução sonora (R_w) dos simples elementos que a constituem (elementos opacos e esquadrias) e na base dos índices de isolamento acústico (D_{nwi}) dos pequenos elementos presentes sobre a mesma.

Para os pequenos elementos atribuem-se os elementos de edificações, com a exceção de portas e janelas, com área menor de 1 m² (ex.: aberturas de ventilação, entrada de ar, caixas das persianas).

$$R'_w = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{tot}} 10^{\frac{-R_{wi}}{10}} + \frac{A_0}{S_{tot}} \sum_{i=1}^p 10^{\frac{-D_{n,e,i}}{10}} \right) - K$$

onde:

R_{wi} é o Índice de Redução Sonora do elemento i que constitui a fachada [dB]

S_i é a superfície do elemento i de fachada vista do interior do ambiente [m²]

S_{tot} é a superfície global da fachada vista do interior do ambiente [m²]

A_0 são as unidades de absorção de referência, igual a 10 m²

$D_{n,e,i}$ é o índice de avaliação do isolamento acústico normalizado do pequeno elemento i [dB]

K é a correção relativa à contribuição da transmissão lateral

Cálculo de R_{wi}

Para a determinação do Índice de Redução Sonora “de laboratório” R_{wi} os simples elementos que constituem a fachada se retorna ao quanto informado no parágrafo **Cálculo de R_{wi}** do capítulo precedente.

Para a determinação do Índice de Redução Sonora de uma vedação se retorna aos parágrafos seguintes.

Cálculo de D_{neiW}

O índice próprio de isolamento acústico dos pequenos elementos pode ser dado por certificados de ensaios de laboratório.

Para nenhuma ventilação à prova de som, como os furos de aeração tradicionais dos ambientes da cozinha o termo D_{neiW} pode ser dado por:

$$D_{neiW} = -10 \log \frac{S_{open}}{10}$$

Onde S_{open} é a superfície da abertura [m²]

Cálculo de K

A contribuição da transmissão lateral é geralmente desprezível. Se, porém os elementos de fachada rígidos e pesados (aqueles de concreto ou tijolos) estão conectados rigidamente a outros elementos rígidos no interior do ambiente receptor, como pavimentos ou paredes divisórias, a transmissão lateral pode contribuir na transmissão sonora total. Isto poderia tornar relevante se são solicitados elevados requisitos de isolamento do ruído.

Consequentemente, em favor da segurança, nos casos que comportam a presença de elementos rígidos, pode-se considerar a transmissão lateral, de maneira “global”, diminuindo o isolamento sonoro de 2 dB. (K = 2 dB). Caso contrário K = 0.

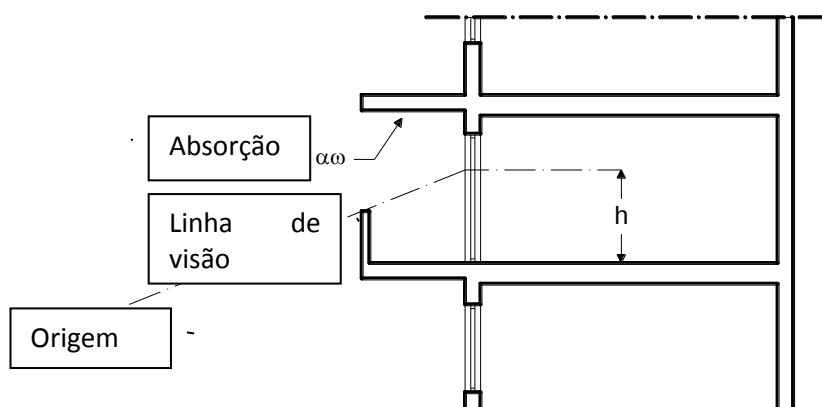
Cálculo de ΔL_{fs}

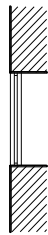
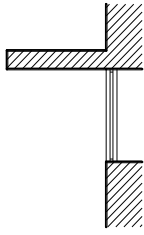
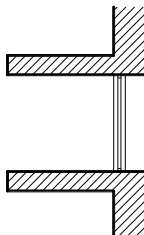
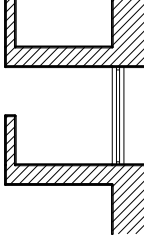
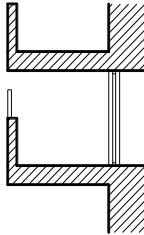
No seguinte prospecto são mostrados alguns exemplos de ΔL_{fs} correlatos às características de fachada, à absorção acústica das superfícies debaixo da varanda e ao modo de incidência das ondas sonoras.

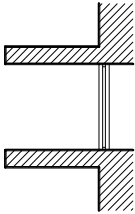
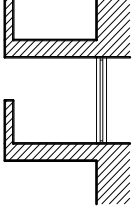
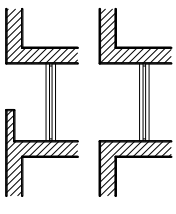
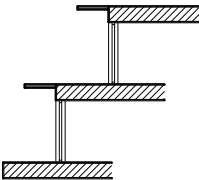
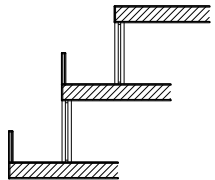
A forma da fachada é definida pela sua seção vertical, que são mostradas somente as vedações acústicas significativas, como exemplo, os parapeitos das varandas com seção completa. A absorção α_w se refere ao índice de avaliação da absorção acústica das superfícies debaixo da varanda.

O valor máximo de $\alpha_w = 0,9$ se aplica também caso seja ausente uma superfície refletora acima da parte de fachada considerada.

A direção da onda sonora incidente sobre a fachada se caracteriza mediante a altura definida pela interseção entre a linha de visão da origem e o plano de fachada.



	Fachada plana	Mezanino			Mezanino			Mezanino			Mezanino		
													
a_w	NSA	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
$h < 1,5 \text{ m}$	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	NSA	1	NSA		
$1,5 \text{ m} \leq h \leq 2,5 \text{ m}$	0	NSA			-1	0	2	0	1	3	NSA		
$h > 2,5 \text{ m}$	0	NSA			1	1	2	2	2	3	3	4	6

	Varanda			Varanda			Varanda			Terraço					
															
										Vedações abertas			Vedações fechadas		
a_w	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
$h < 1,5 \text{ m}$	-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	2	1	1	3	3	3
$1,5 \text{ m} \leq h \leq 2,5 \text{ m}$	-1	1	3	0	2	4	1	1	2	3	4	5	5	6	7
$h > 2,5 \text{ m}$	1	2	3	2	3	4	1	1	2	4	4	5	6	6	7

Legenda

Mezanino: terraço contínuo	Varanda: terraço descontínuo limitado lateralmente	NSA: Não se aplica
-------------------------------	---	-----------------------

Método de cálculo inverso

No parágrafo precedente foi descrito o método de cálculo do parâmetro $D_{2m,nT,w}$. Conhecendo as características acústicas das estruturas que constituem a fachada e a geometria do ambiente receptor se obtém o relativo índice de isolamento acústico.

Em alguns casos, porém, pode ser necessário realizar um cálculo inverso. Como exemplo, pode resultar útil definir o desempenho mínimo de isolamento sonoro que devem possuir as esquadrias para que toda a fachada obtenha um determinado valor de $D_{2m,nT,w}$.

Invertendo, de maneira oportuna, os algoritmos matemáticos ilustrados anteriormente, se obtém a seguinte relação

$$R_{w,esquadria} = -10 \log \left(\frac{S_{tot}}{S_{totesquadria}} \left(10^{\beta} - \frac{A_0}{S_{tot}} \sum_{i=1}^p 10^{\frac{-D_{n,e,i}}{10}} - \sum_{i=1}^n \frac{S_{iparede}}{S_{tot}} 10^{\frac{-R_{wparede}}{10}} \right) \right)$$

Onde:

$R_{w,esquadria}$: Índice de Redução Sonora mínimo que devem possuir as esquadrias para que toda a fachada determine o valor de $D_{2m,nT,w}$ solicitado [dB].

$S_{tot\ esquadria}$: superfície total das esquadrias [m²]

$$\beta = \frac{-D_{2m,nTw} + \Delta L_{fs} + 10 \log \left(\frac{V}{6T_0 S_{tot}} \right) - K}{10}$$

$S_{iparede}$: superfície da parede i [m²]

$R_{wi\ parede}$: Índice de Redução Sonora da parede i [dB]

Para as outras siglas considerando-se os mesmos significados mostrados anteriormente

Determinação do Índice de Redução Sonora de uma esquadria

O Índice de Redução Sonora (R_w) de uma esquadria deve ser preferencialmente, definido com base em resultados de exames de laboratório.

Caso não se disponha de tais exames, o índice R_w pode ser determinado se se conhecem:

- as características do envidraçamento acústico
- a posição das esquadrias,
- a dimensão e a forma da proteção
- a classe de obstrução do ar da esquadria

O Índice de Redução Sonora de projeto, $R_{w,Resquadria}$, pode ser calculado adotando a seguinte relação:

$$R_{w,Resquadria} = R_w + KP + KRA + KDS + KFG + KF_{1,5} + KF_{3} + KGB \text{ (dB)}$$

onde:

R_w é o índice de Índice de Redução Sonora da esquadria

KP é um coeficiente que considera a tipologia de esquadria

KP esquadria = -2 dB; KP porte = -5 dB)

KRA é um coeficiente para adicionar se a tela tem superfície < 30% com relação à superfície total da esquadria

KDS é um coeficiente para adicionar caso se considerem esquadrias com dupla proteção móvel e sem sustentação vertical central

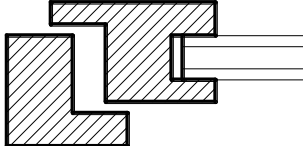
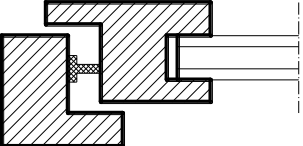
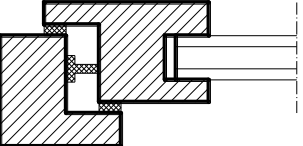
KFG é um coeficiente para adicionar caso se considerem esquadrias com proteção não observada e com maior superfície transparente

$KF_{1,5}$ é um coeficiente para adicionar caso se considerem esquadrias com superfície < 1,5 m²

KF_{3} é um coeficiente para adicionar caso se considerem esquadrias com chapas de vidro > 3 m²: **$KF_{3} = -2$ dB;**

KGB é um coeficiente para adicionar caso se considerem esquadrias com amarras

Os valores de R_w e dos coeficientes KRA , KDS , KFG , $KF_{1,5}$ e KGB são mostrados pelas tabelas que seguem:

Tipo de vedação		
1	2	3
		

Tipo de esquadria	Descrição da esquadria	Classe de permeabilidade ao ar (UNI EN 12207)	Rw (C;Ctr)	Coeficientes				
				KRA (dB)	KDS (dB)	KFG (dB)	KF 1,5 (dB)	KGB (dB)
1	Vidro de pelo menos 3 mm + 3 mm e câmara de pelo menos 8 mm. Ou envidraçamento acústico com Rw medido experimentalmente ≥ 27 dB.	≤ 2	25	0	0	0	0	0
2	Vidro de pelo menos 3 mm + 3 mm e câmara de pelo menos 12 mm. Ou envidraçamento acústico com Rw medido experimentalmente ≥ 30 dB e com acabamento central	≤ 2	30	0	0	0	0	0
2	Vidro de pelo menos 4 mm + 4 mm e câmara de pelo menos 12 mm. Ou envidraçamento acústico com Rw medido experimentalmente ≥ 29 dB e com acabamento central	≤ 2	33 (2;5)	-2	0	-1	0	0
2	Vidro de pelo menos 4 mm + 4 mm e câmara de pelo menos 15-16 mm. Ou envidraçamento acústico com $Rw \geq 30$ dB com acabamento central	> 2	34 (2;6)	-2	0	-1	0	0
2	Vidro de pelo menos 6 mm + 4 mm e câmara de pelo menos 12 mm. Ou envidraçamento acústico com Rw medido experimentalmente ≥ 32 dB e com acabamento central	> 2	35 (-2;-4)	-2	0	-1	0	0

2	Vidro de pelo menos 6 mm + 4 mm e câmara de pelo menos 15-16 mmn. Ou envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 33 dB e com acabamento central	>2	36 (-1;-4)	-2	0	-1	0	0
2	Vidro de pelo menos 6 mm + 4 mm e câmara de pelo menos 15-16 mm. Ou envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 35 dB e com acabamento central	>2	37 (-1;-4)	-2	0	-1	0	0
3	Vidro de pelo menos 8 mm + 4 mm e câmara de pelo menos 15-16 mm. Ou envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 38 dB e com acabamento externo em correspondência ao batente das telas, acabamento central e acabamento interno.	>2	38 (-2;-5)	-2	0	0	0	0
3	Vidro de pelo menos 10 mm + 4 mm e câmara de pelo menos 20 mm. Ou envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 39 dB e com acabamento central e acabamento externo em correspondência ao batente das telas (caso A) ou com acabamento central e acabamento interno (caso B).	>2	39 (-2;-5)	-2	0	0	0	0

3	Envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 40 dB e com acabamento central e acabamento externo em correspondência ao batente das telas (caso A) ou com acabamento central e acabamento interno (caso B).	>2	40 (-2;-5)	-2	0	0	-1	-1
3	Envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 41 dB e com acabamento central e acabamento externo em correspondência ao batente das telas (caso A) ou com acabamento central e acabamento interno (caso B).	>2	41 (-2;-5)	0	0	0	-1	-2
3	Envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 44 dB e com acabamento central e acabamento externo em correspondência ao batente das telas (caso A) ou com acabamento central e acabamento interno (caso B).	>2	42 (-2;-5)	0	-1	0	-1	-2
3	Envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 46 dB e com acabamento central e acabamento externo em correspondência ao batente das telas (caso A) ou com acabamento central e acabamento interno (caso B).	>2	43 (-2;-4)	0	-2	0	-1	-2

3	Envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 49 dB e com acabamento central e acabamento externo em correspondência ao batente das telas (caso A) ou com acabamento central e acabamento interno (caso B).	>2	44 (-1;-4)	0	-2	1	-1	-2
3	Envidraçamento acústico com R_w medido experimentalmente ≥ 51 dB e com acabamento central e acabamento externo em correspondência ao batente das telas (caso A) ou com acabamento central e acabamento interno (caso B).	>2	45 (-1;-5)	0	-2	1	-1	-2

Cálculo do desempenho acústico de piso ao ruído de impacto ($L'_{nT,w}$)

O índice de avaliação do desempenho acústico de piso ao ruído de impacto, sendo o Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L'_{nT,w}$), caracteriza o ruído percebido no ambiente perturbado (receptor) quando é ativada uma fonte normalizada de ruído de impactos (Tapping Machine) no piso em observação. Quanto mais baixo é o seu valor, então maior será a capacidade do piso de atenuar o ruído de impacto.

Tal índice depende do Nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado ($L'_{n,w}$) e das dimensões do cômodo em observação.

Cálculo de $L'_{nT,w}$

O índice $L'_{nT,w}$ é calculado com a seguinte relação

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \log \left(\frac{V}{30} \right)$$

onde:

$L'_{n,w}$ é o Nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado [dB]

V é o volume do ambiente considerado [m^3]

Cálculo de $L'_{n,w}$

O índice $L'_{n,w}$ é calculado com a seguinte relação

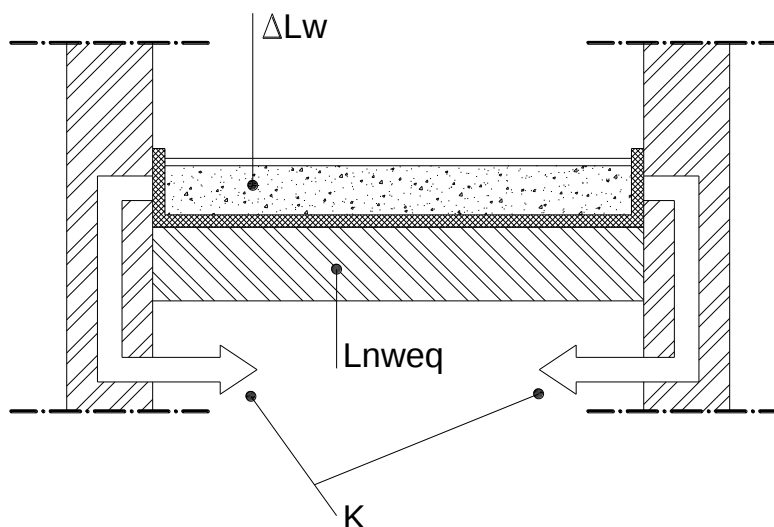
$$L'_{n,w} = L_{nweq} - \Delta L_w + K$$

onde:

L_{nweq} é o nível de ruído de impacto equivalente referido ao piso “em osso”, destituído da camada de contrapiso flutuante [dB]

ΔL_w é o índice de avaliação relativo à redução dos ruídos de impacto devido à presença de contrapiso flutuante ou revestimento elástico [dB]

K é a correção a ser realizada para a presença de transmissão lateral de ruído. O seu valor depende da massa superficial do piso “em osso” e da massa superficial das estruturas laterais [dB]



Cálculo de L_{nweq}

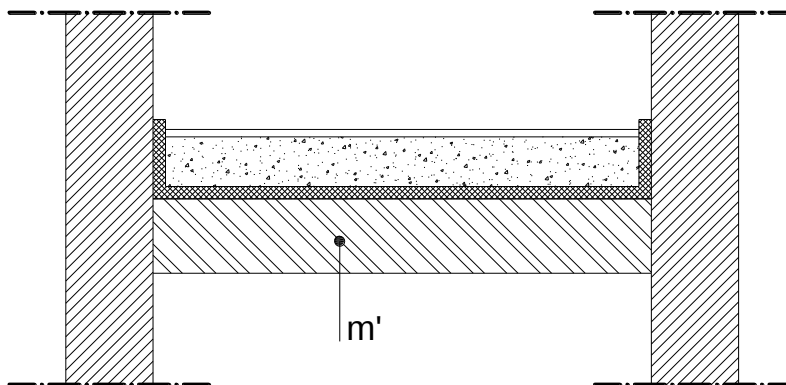
O valor de L_{nweq} , relativo à estrutura destituída de contrapiso flutuante, pode ser conseguido por ensaios de laboratório ou calculado com a seguinte relação (proposta pela UNI EN 12354-2 e UNI TR 11175)

$$L_{nweq} = 164 - 35 \log \frac{m'}{m'_0}$$

onde:

m' é a massa superficial das camadas de pisos abaixo do contrapiso flutuante (kg/m^2)

m'_0 é a massa de referência igual a 1 kg/m^2



Segundo exigido pela norma UNI EN 12354-2:2002, tal fórmula é utilizável para pisos de tipo “homogêneo” tendo massa por unidade de área (m') compreendida entre 100 e 600 kg/m^2 .

Os pisos que são considerados como “homogêneos” pela norma são:

- Pisos em concreto sólido construído em obra
- Pisos em concreto celular sólido, autoclavado
- Pisos feitos com tijolos furados
- Pisos feitos com “vigas e alvéolos”
- Pisos feitos com “lajes em concreto”
- Pisos feitos com vigas em concreto.

A norma, então, não parece prever a utilização de tal fórmula para pisos do tipo “Laje pré-fabricada em concreto” ou por pisos em madeira.

Para os pisos de tipo cimento armado, foi proposta pelos pesquisadores italianos a seguinte relação matemática que resulta ser, em favor da segurança, relacionada à relação informada na norma internacional.

$$L_{nweq} = 160 - 30 \log \frac{m'}{m'_0}$$

onde:

m' é a massa superficial das camadas de pisos abaixo do contrapiso flutuante (kg/m^2)

m'_0 é a massa de referência igual a 1 kg/m^2

A relação é utilizada pela PROJÉTUS no cálculo do ruído de impacto ($L'_{n,w}$) apontado “Fórmula não normativa obtida pela bibliografia”.

Cálculo de ΔL_w

O índice ΔL_w de revestimentos elásticos e de contrapisos flutuantes pode ser obtido por certificados de laboratório conforme à norma ISO 10140.

Alternativamente, para os contrapisos flutuantes o índice pode também ser dado, analiticamente, mediante as relações:

$$\Delta L_w = 30 \log \frac{f}{f_0} + 3 \quad (\text{para contrapisos flutuantes feitos em concreto})$$

$$\Delta L_w = 40 \log \frac{f}{f_0} - 3 \quad (\text{para contrapisos flutuantes feitos a seco})$$

onde:

f é a frequência de referência igual a 500 Hz

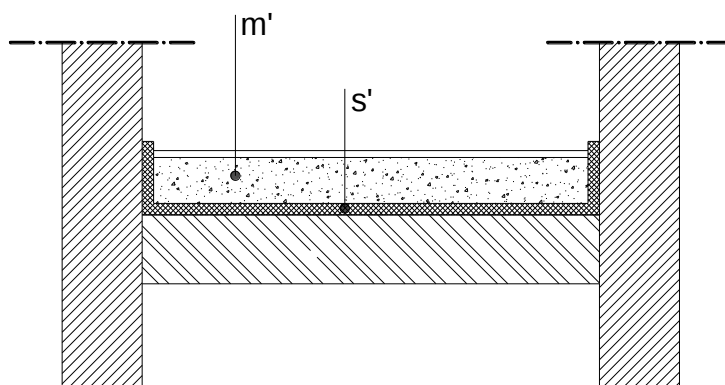
f_0 é a frequência de ressonância do sistema contrapiso + camada elástica, calculada com base na seguinte relação:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}}$$

onde:

s' é a rigidez dinâmica da camada elástica interposta obtida segundo ensaios de laboratório em conformidade à UNI EN 29052-1; 1993 [MN/m³]

m' é a massa superficial do contrapiso acima da camada elástica [kg/m²]



Cálculo de K

O valor do índice K é obtível pela seguinte tabela. Isso depende da massa superficial do piso de sustentação (camadas de piso inferiores ao material elástico) e da massa superficial média das paredes laterais.

No cálculo da massa superficial média das paredes laterais não se consideram as paredes revestidas com uma camada isolante tendo frequência de ressonância inferior a 125 Hz (ex.: contraparedes em placa de estuque).

m' piso de sustentação [kg/m ²]	m' paredes laterais médias [kg/m ²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Cálculo do tempo de reverberação de um ambiente – T_{60}

O tempo de reverberação (T_{60}) é um parâmetro que permite caracterizar a resposta acústica de um ambiente. Valores elevados de T_{60} (> 2 segundos) são característicos de ambientes “reverberantes” (ex.: igrejas ou academias). Valores baixos (< 0,4 segundos), ao contrário, são típicos de ambientes “surdos” (cômodos muito mobiliados etc.).

Método de cálculo

O tempo de reverberação de um ambiente pode ser calculado com a fórmula de Sabine:

$$T_{60} = \frac{0,16V}{A}$$

onde:

V volume do ambiente [m^3]

A área de absorção equivalente total do ambiente [m^2]

O parâmetro A, caracteriza a capacidade do ambiente de absorver as ondas sonoras, depende das superfícies refletoras e de absorções acústicas dos elementos humanos ou de mobiliários presentes no ambiente.

$$A = \sum_{i=1}^k S_i \alpha_i + \sum_{j=1}^m n_j A_j$$

onde:

S_i superfície i (m^2)

α_i coeficiente de absorção da superfície i

n_j número de elementos do tipo j

A_j absorção total de um elemento do tipo j

Visto que os coeficientes de absorção variam com base na frequência considerada, também o tempo de reverberação varia com base na frequência.

Método de cálculo do T60 ideal

Para o cálculo do tempo de reverberação ideal foram propostos vários algoritmos. PROJETUS utiliza as seguintes relações, informadas em UNI 11367 (Apêndice C).

Tempo de reverberação ideal médio entre as frequências 500 Hz e 1000 Hz

	T_{ott} [s]
Ambiente desocupado destinado a palavra falada	$T_{ott} = 0,32 \log(V) + 0,03$
Ambiente desocupado destinado à atividade esportiva	$T_{ott} = 1,27 \log(V) - 2,49$

onde:

V volume do ambiente [m³]

Nas relações matemáticas não estão indicados os limites inferiores ou superiores para o valor de V. A norma, porém, informa um gráfico que destaca para os ambientes destinados a palavra falada com volumes compreendidos entre 50 e 2000 metros cúbicos, e para os ambientes destinados a atividades esportivas volumes compreendidos entre 2000 e 10000 metros cúbicos.

A norma “sugere” que os resultados das medidas em obra, executadas em ambientes desocupados, são para manter-se adequados se os tempos de reverberação, definidos nas bandas de oitava compreendidas entre 250 Hz e 4000 Hz, são inferiores ou iguais a 1,2 vezes o tempo de reverberação ideal

$$T_i \leq 1,2 T_{ott}$$

Onde:

T_i tempo de reverberação detectado em obra (na banda de oitava i) em ambiente desocupado [s]