



**CONSTRUÇÃO DA ESCOLA MUNICIPAL  
ALEGRINHO**  
RELATÓRIO DE PROJETO TÉCNICO DE ADEQUAÇÃO DE  
AMBIENTE INTERNO E FACHADA

OUTUBRO DE 2024

## REFERÊNCIAS CADASTRAIS

Cliente	Prefeitura Municipal de Pouso Alegre
Localização	Pouso Alegre, Minas Gerais
Título	Relatório de projeto técnico de adequação de ambiente interno e fachada
Contato	Suelene Marcondes de Souza Faria
E-mail	<a href="mailto:manutencaosmecpa@gmail.com">manutencaosmecpa@gmail.com</a>
Líder do projeto	Pedro Henrique Justiniano
Coordenador	Aloísio Caetano Ferreira
Projeto/centro de custo	CONTRATO 167/2021
Data do documento	30/10/2024

### Responsável Técnico – Coordenação

Aloisio Caetano Ferreira Engenheiro Hídrico	
Nº CREA: MG-97.132 /D	

### Responsável Técnico – Projeto Civil

Rafael Barbosa Carreira Arquiteto e urbanista	
Nº CAU: 00A1554115	

### ***Isenção de Responsabilidade:***

*Este documento é confidencial, destinando-se ao uso exclusivo do cliente, não podendo ser reproduzido por qualquer meio (impresso, eletrônico e afins) ainda que em parte, sem a prévia autorização escrita do cliente.*

## SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	12
2. CONFORTO ACÚSTICO .....	16
3. O TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	17
4. notas sobre absorção sonora.....	19
4.1. Propagação de som dentro de um ambiente.....	19
4.2. Coeficiente de absorção sonora aparente $\alpha$ .....	19
4.3. Cálculo do Tempo de Reverberação .....	20
5. isolamento acústico.....	21
5.1. Cálculo preditivos de isolamento de fachada .....	23
6. descrição dos ambientes .....	24
6.1. Análise tempo de reverberação .....	24
7. PROJEÇÃO DE SALAS.....	25
7.1. Análise do tempo de reverberação .....	25
7.1.1. Análise dos resultados .....	28
8. PROJETO ACÚSTICO.....	30
9. INTERVENÇÕES E RESULTADOS .....	32
9.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	33
9.2. Isolamento de fachadas.....	34
9.3. Nota de execução.....	34
10. considerações e conclusões.....	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Localização que será implementada a escola (em amarelo) e destaque para a distância ao aeroporto.....	12
Figura 1-2 – Localização da Escola Alegrinho na Macrozona de Desenvolvimento Urbano .....	13
Figura 1-3 – Localização da Escola Alegrinho com relação a ZEPU .....	14
Figura 3-1 – Variabilidade do espectro dos níveis de pressão sonora por frequências .....	17
Figura 7-1 – Comparação entre os tempos de reverberação atuais e os ótimos das salas de aula .....	26
Figura 7-2 – Comparação entre os tempos de reverberação atuais e os ótimos do refeitório .....	27
Figura 7-3 – Comparação entre os tempos de reverberação atuais e os ótimos da sala de direção .....	28

Figura 9-1 – Exemplo de aplicação do forro acústico OWA Lucero (Sirius) .....32

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1-1 – Parâmetros de Incomodidade (adaptado do Plano Diretor de Pouso Alegre).....	13
Tabela 3-1 – Faixa de tempo de reverberação ótimo para cada utilização do local..	18
Tabela 3-2 – Para o cálculo do TR de acordo com o uso pretendido.....	18
Tabela 5-1 – Classes de transmissão sonora e condições subjetivas (Bistafa, 2011) .....	22
Tabela 5-2 –Níveis de isolamento de fachadas segundo a norma ABNT NBR 15575-4:2021 .....	23
Tabela 7-1 – RT simulados e ideais das salas de aula .....	25
Tabela 7-2 – RT simulados e ideais do refeitório .....	26
Tabela 7-3 – RT simulados e ideais da sala de direção .....	27
Tabela 7-4 – Resumo da necessidade de tratamento acústico por ambiente .....	29
Tabela 9-1 – Coeficiente de absorção (por oitava) dos materiais utilizados no projeto .....	32
Tabela 9-2 – RT simulado, ideal e atingido para salas de aula .....	33
Tabela 9-3 RT simulado, ideal e atingido para o refeitório .....	33
Tabela 9-4 RT simulado, ideal e atingido para a sala de diretoria.....	34

## 1. APRESENTAÇÃO

Este memorial descritivo se refere ao projeto da escola Alegrinho localizada na cidade de Pouso Alegre, estado de Minas Gerais. A Figura 1 mostra, em amarelo, o local de implementação do projeto e destaca a sua distância em relação à pista do Aeroporto Regional de Pouso Alegre (PPY).

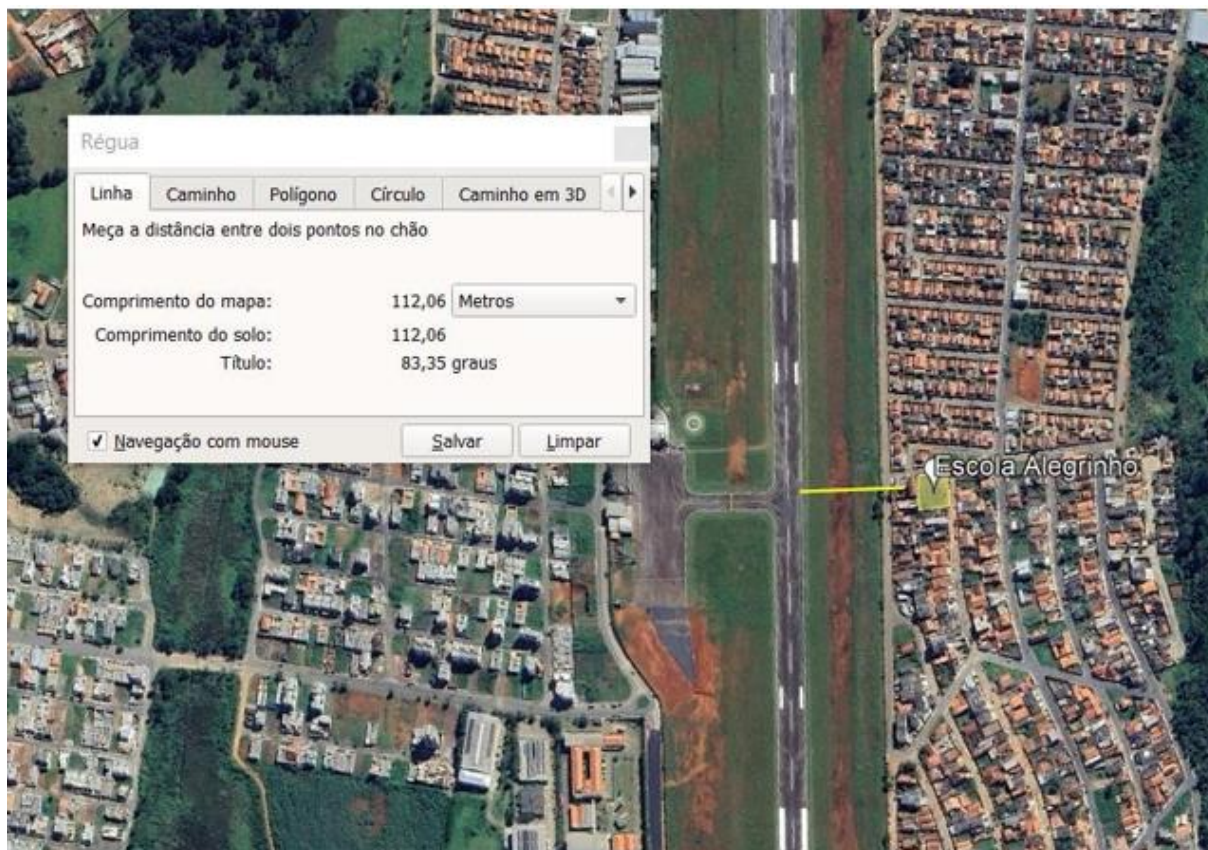


Figura 1-1 – Localização que será implementada a escola (em amarelo) e destaque para a distância ao aeroporto

Fonte: DAC Engenharia

Os ambientes que serão analisados são aqueles as normas ABNT NBR 10152:2017 e ABNT NBR 15575:2021 prescrevem requisitos acústicos de isolamento, além da adequação em relação ao tempo de reverberação das salas, os quais a ABNT NBR 12179:1992 define os parâmetros.

De acordo com o Plano Diretor de Pouso Alegre, Lei n. 6.476/2021 (POUSO ALEGRE, 2021), a área onde está localizado o terreno pertence a Macroárea de Qualificação Urbana (MQU), como ilustrado pela figura abaixo, que corresponde às



regiões com usos residenciais e não residenciais com padrão médio de urbanização e oferta de serviços públicos. Logo, como determinado no Anexo 9 – Quadro 7, deve atender aos seguintes parâmetros de incomodidade:

Tabela 1-1 – Parâmetros de Incomodidade (adaptado do Plano Diretor de Pouso Alegre)

Macroárea	Emissão de ruído diurno	Emissão de ruído noturno
Urbanização Consolidada	60 dB	55 dB
Qualificação Urbana	65 dB	55 dB
Transição Urbana	40 dB	35 dB
Resiliência Urbana	65 dB	55 dB
Industrialização e Desenvolvimento Econômico	70 dB	60 dB



Figura 1-2 – Localização da Escola Alegrinho na Macrozona de Desenvolvimento Urbano

Fonte: DAC Engenharia

Do mesmo modo o terreno se encontra também próximo a uma zona especial de projeto urbano de mobilidade urbana (ZEPU 3), mostrado na figura abaixo, ou seja, uma área apta a expansão dos sistemas de infraestrutura aeroportuários já existentes. Portanto é necessário ressaltar que apesar de atualmente pertencer a uma área

tranquila visto que o aeroporto é praticamente inativo, com uso intenso e crescente o cenário será completamente diferente no futuro.



Figura 1-3 – Localização da Escola Alegrinho com relação a ZEPU

Fonte: DAC Engenharia

Logo, seguindo as classes de ruído estabelecidas pela Norma de Desempenho ABNT NBR 15575:2021, conclui-se que pelo valor de 65 dB determinado no plano diretor para o local corresponde a classe II (61 a 65 dB). Todavia levando em consideração a projeção do ruído no local, optou-se por estabelecer o nível intermediário da classe III (66 a 70 dB) para salas como mínimo a ser alcançado no nível de desempenho ( $D_{2m,nT,w} = 30 \text{ dB}$ ), garantindo o conforto acústico para ruídos ainda maiores do que os estabelecidos na legislação vigente.

Para o conforto interno das salas, é necessário um tratamento do tempo de reverberação em razão de as salas possuírem grandes áreas, pés direitos altos, e, conseqüentemente, grandes volumes de ar. Os ambientes, que serão projetadas em relação ao tempo de reverberação, foram agrupadas por tipologia com características similares, isto é, área, volume, quantidade de janelas e mobília similares. As salas também possuem, em sua maioria, grande presença de mobiliários reflexivos sob o ponto de vista acústico, ou seja, mobiliários revestidos com materiais que absorvem

nada ou quase nada do som produzido no recinto. Além disso, o isolamento em relação ao ruído exterior também é previsto para duas fachadas da edificação

As duas fachadas a serem consideradas em projeto serão as que contém janelas (mais frágeis do ponto de vista acústico), denominadas fachada principal, aquela que tem sua face para a rua, e fachada posterior, aquela que não é voltada para a rua, mas que terá influência do ruído de aeronaves.



## 2. CONFORTO ACÚSTICO

O conforto acústico pode ser definido como a condição psicofísica para a qual um indivíduo, imerso em um campo sonoro, está em uma condição de bem-estar, em relação à atividade que está fazendo. Está, portanto, condicionada por diferentes situações, complementares entre si, como as características físicas da fonte (potência acústica, espectro, duração e tendência ao longo do tempo), as características psicofísicas dos indivíduos presentes, as características do ambiente e a atividade realizada pelos sujeitos.

Para ambientes particulares, dada a complexidade dessas condições, são identificados diversos fatores que podem identificar o sentimento de percepção dos ouvintes. A boa recepção está ligada à presença de um nível sonoro suficiente e à percepção ótima das ondas sonoras, diretas e refletidas, das superfícies do ambiente.

Um conceito importante para grande parte dos recintos é a inteligibilidade. Esse conceito mensura a capacidade de se falar e ser compreendido dentro do local. A inteligibilidade é inversamente proporcional ao tempo de reverberação, então, quanto maior reverberação, pior inteligibilidade e quanto menor reverberação, melhor inteligibilidade. O cuidado com a inteligibilidade é essencial principalmente em ambientes com interação entre pessoas, como escolas, teatros, refeitórios, restaurantes, salas de reunião, espaços de trabalho, dentre outros, já que ele impacta na qualidade da compreensão do som produzido no local.

No caso em questão, propõe-se investigar se a configuração atual definida durante o projeto pode ser apropriada para o ambiente em relação à função que ele terá e, portanto, um bom desempenho acústico pode ser obtido no final do trabalho.

Dependendo da função para a qual o local é concebido, o ambiente tem requisitos particulares a serem atendidos: se para a música uma certa naturalidade é necessária durante a reprodução e uma boa qualidade geral, bem como uma certa amálgama com o som reverberante pode resultar em um efeito agradável auditivo; já no que diz respeito à fala, um certo grau de mistura com o som reverberado é tolerado.

A seguir, um parâmetro de considerável importância para caracterizar um espaço do ponto de vista acústico: o tempo de reverberação.

### 3. O TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A quantidade física básica que define a qualidade acústica de um ambiente confinado é o tempo de reverberação. O valor ótimo do tempo de reverberação representa o compromisso certo entre alcançar um nível sonoro suficiente para a compreensão auditiva sem esforço no ambiente e reduzir o ruído causado pelo excesso de reverberação.

O tempo de reverberação (TR), é definido como o intervalo de tempo (em segundos) necessário para que o nível de pressão sonora do campo sonoro gerado por uma fonte no seu interior diminua em 60 dB, em comparação com o valor no momento da cessação da emissão. Uma fonte sonora, em geral, dá origem a um sinal de amplo espectro, ou seja, em várias frequências. Além disso, devido à natureza dos materiais que cobrem as superfícies, o coeficiente de absorção sonora varia de acordo com a frequência: o tempo de reverberação, portanto, é uma função do espectro do sinal.

A figura abaixo mostra a variabilidade dos níveis sonoros em função das frequências, ressaltando os limiares de cada tipo de som, como região da fala, da música, bem como os limiares de dor e de audição.

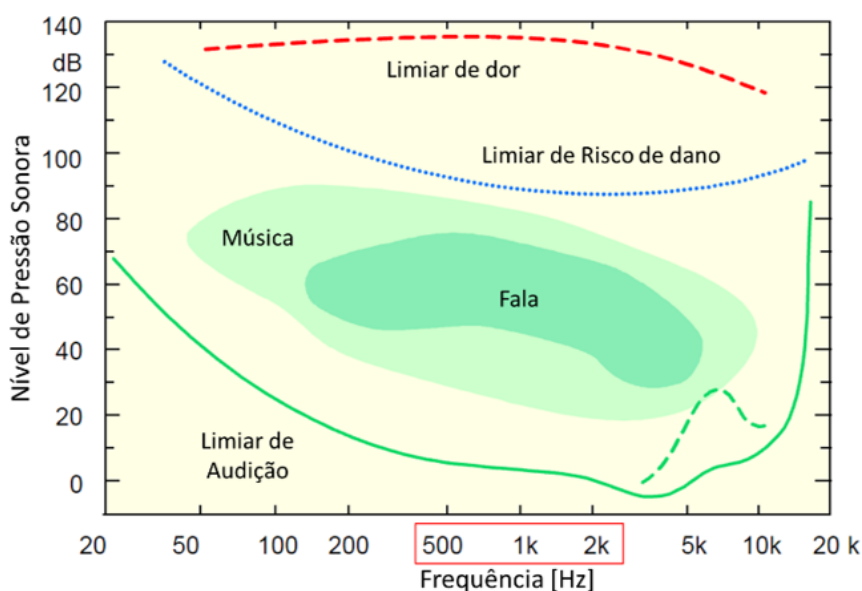


Figura 3-1 – Variabilidade do espectro dos níveis de pressão sonora por frequências

Os tempos de reverberação ideais com base no uso pretendido dos locais são destacados na tabela a baixo:

Tabela 3-1 – Faixa de tempo de reverberação ótimo para cada utilização do local

Ambiente	$RT_{OTI, 1000}$
Sala de conferências/Sala de eventos/Refeitórios	< 1 s
Óperas	1.2 - 1.8 s
Salas de música de câmara	1.4 – 2.0 s
Grandes salas de concerto	1.7 - 2.3 s
Igrejas	2.0 - 4.0 s

O valor ótimo do tempo de reverberação na frequência de 1000 Hz pode ser deduzido da fórmula empírica:

$$RT_{OTI,1000} = k \cdot \sqrt[3]{V} [s],$$

em que k pode variar de acordo com os valores indicados na tabela abaixo, e V é o volume da sala em [m³].

Tabela 3-2 – Para o cálculo do TR de acordo com o uso pretendido

k	Destinação de utilização
0,3-0,4	Língua falada
0.5-0.8	Música

## 4. NOTAS SOBRE ABSORÇÃO SONORA

Quando uma onda sonora atinge uma superfície, parte da energia incidente é refletida, parte absorvida e parte transmitida através da superfície. A parte transmitida depende das características de isolamento acústico da partição, que é representada pela atenuação, expressa em decibéis [dB], que o som sofre ao passar pela partição. A parte refletida e absorvida depende das características de absorção sonora da superfície, que transforma a energia acústica em calor. A absorção é principalmente uma função das características dos materiais que compõem uma partição, em particular rugosidade superficial, porosidade, flexibilidade. Além disso, dentro de um ambiente, a geometria das paredes que o delimitam e a posição recíproca destas é decisiva para o desenvolvimento de raios refletidos.

### 4.1. Propagação de som dentro de um ambiente

As várias reflexões que se desenvolvem dentro de uma sala chegam ao ouvinte em tempos sucessivos, determinando uma permanência do próprio sinal no ambiente por um determinado tempo (possivelmente somando-se a outros sinais, entretanto emitidos pela fonte). Se o atraso entre o sinal direto produzido pela fonte e os vários sinais refletidos é significativo, a compreensão torna-se difícil. Especificamente, se essa diferença não exceder 35 ms, há um fortalecimento do sinal direto (efeito Haas), ou seja, o ouvinte percebe o som da fonte como mais forte, o que facilita a escuta até mesmo de ouvintes colocados a uma certa distância da fonte. Além desse intervalo de tempo, no entanto, obtém-se um efeito de percepção extremamente desagradável e irritante, o eco.

### 4.2. Coeficiente de absorção sonora aparente $\alpha$

A relação entre  $E_i$ , que é a energia incidente em uma superfície, e a chamada  $E_a$ , que é a energia absorvida, é definida como o coeficiente de absorção  $\alpha$ , conforme a fórmula a seguir:

$$\alpha = E_a / E_i.$$



O coeficiente de absorção de um material depende de três fatores: o ângulo de incidência, a frequência do som incidente e a conformação do próprio material, tanto na superfície quanto internamente.

A área de absorção sonora equivalente  $A$ , é definida como o produto a seguir:

$$A = \alpha \cdot S,$$

com  $S$  a superfície, em  $m^2$ , do material com coeficiente de absorção  $\alpha$ . É uma boa prática considerar primeiro o valor de  $A$ , útil para determinar a quantidade total de área absorvente necessária dentro de um determinado ambiente. Desta forma, obtém-se o valor de  $S$  (superfície a ser revestida com um material com um determinado  $\alpha$ ) dependendo das características de vários materiais levados em consideração para o tratamento acústico.

### 4.3. Cálculo do Tempo de Reverberação

Na fase de projeto, o tempo de reverberação pode ser determinado usando a equação de Sabine, identificada com base em observações experimentais:

$$RT_{60} = 0.163 \frac{V}{A_{tot}} \quad [s]$$

$$A_{tot} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i + \sum_{j=1}^m n_j \cdot A_j$$

Em que:

$V [m^3]$  é o volume do salão,

$S_i [m^2]$  é a área da  $i$ -ésima superfície,

$\alpha_i$  é o  $i$ -ésimo coeficiente de absorção superficial,

$A_j [m^2]$  é a absorção de uma unidade do  $j$ -ésimo tipo,

$n_j$  é o número de unidades do  $j$ -ésimo tipo.

A relação de Sabine é válida para  $V < 10000 m^3$  e  $\alpha_m < 0,3$ , com

$$\alpha_m = \frac{\sum_i S_i \cdot \alpha_i + \sum_j n_j \cdot A_j}{\sum S_i}$$

O valor ótimo do tempo de reverberação pode ser deduzido, respectivamente, para as frequências de 500 e 1 kHz, a partir das seguintes fórmulas empíricas:

$$RT_{OTI,500} = 0.5 + 10^{-4}V \quad [s]$$

$$RT_{OTI,1000} = k \cdot \sqrt[9]{V} \quad [s]$$

Em que  $k$  é inferido da tabela 3-2.

## 5. ISOLAMENTO ACÚSTICO

Para que apresente boas características acústicas, o ambiente a ser projetado deve apresentar estanqueidade acústica em relação ao seu entorno, ou seja, as paredes, lajes, portas e janelas deverão apresentar coeficientes de transmissão sonora baixos.

O parâmetro principal para definição da prestação de isolamento é chamado de perda na transmissão sonora (PT), que, em linhas gerais, é dado pela seguinte equação:

$$PT = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau} \quad [dB],$$

Em que,  $\tau$  representa a transmissão sonora.

A perda na transmissão dos materiais sólidos e homogêneos é variável no espectro da frequência. A variação dos valores se dá de acordo com as regiões onde se está realizando a análise, são elas: região controlada pela rigidez; região controlada pela ressonância; região controlada pela massa; e região controlada pela coincidência.

Na prática, a massa é o que tem a maior influência sobre a prestação do material quanto ao isolamento e a lei que rege essa região do espectro é dada por:

$$PT = 20 \cdot \log(f \cdot M) - 47 \quad [dB],$$

Em que,

$f$  [Hz] é a frequência,

$M$   $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$  é a densidade superficial da divisória.

A Classe de Transmissão Sonora (STC) é um parâmetro definido pela ASTM E413-04 para definir essa prestação das divisórias. São as condições para definir a classe de uma divisória:

1. Diferença entre o valor de PT do contorno e da partição deficiente não exceder 8 dB em nenhuma banda de 1/3 de oitava;

2. A soma das deficiências nas dezesseis bandas de 1/3 de oitava entre 125 Hz e 4000 Hz não exceder 32 dB.

A tabela abaixo mostra a classificação de STC e os resultados subjetivos gerados.

Tabela 5-1 – Classes de transmissão sonora e condições subjetivas (Bistafa, 2011)

STC	Privacidade	Classificação
25	Voz normal facilmente inteligível	Precária
30	Voz elevada razoavelmente inteligível, Voz normal pouco inteligível	Fraca
35	Voz elevada pouco inteligível, Voz normal não inteligível	Razoável
40	Voz elevada não inteligível, voz normal inaudível	Boa
45	Voz elevada ouvida muito fracamente	Muito boa
50	Voz elevada inaudível	Excelente

A metodologia de medição especificada nas normas ABNT NBR ISO 16283-3:2021 e ABNT NBR ISO 10052:2022 está baseada na emissão de ruído do ambiente exterior à fachada, mediante uma fonte sonora padronizada, posicionada de forma normalizada e medição dos níveis de pressão sonora em bandas de frequência no exterior a uma distância de 2 metros da fachada e no recinto receptor. A diferença entre ambos os níveis, com uma correção segundo as condições acústicas do recinto receptor (obtidas pela medição do tempo de reverberação), proporciona a Diferença de nível padronizada ( $D_{2m,nT}$ ), que é convertida em um número único, conforme ABNT NBR ISO 717-1:2021, obtendo-se a Diferença de nível padronizada ponderada ( $D_{2m,nT}$ ), que é o valor comparável com os níveis de desempenho da ABNT NBR 15575-4:2021 (norma de desempenho).

O Manual da Associação Brasileira para a Qualidade Acústica ressalta que as esquadrias são os elementos mais vulneráveis no isolamento acústico de uma fachada e, por isso, condicionam seu desempenho.

As esquadrias são sistemas complexos formadas por vários elementos (vidro, persiana, ferragens, sistema de fechamento, vedações etc.), sendo que cada um deles tem papel importante no desempenho final do conjunto. Portanto, é recomendável que os fabricantes forneçam ensaios de laboratório, a fim de comprovar seu isolamento acústico. Além disso, a instalação na obra deve ser da melhor qualidade e ensaiada por amostragem aleatória para verificação do atendimento ao

requisito de desempenho pretendido.

A referida norma de desempenho estabelece no seu item 12.3.3 parâmetros de projeto baseados na classe de ruído do entorno do ambiente no qual o edifício está inserido, o qual é reproduzido pela tabela abaixo.

Tabela 5-2 –Níveis de isolamento de fachadas segundo a norma ABNT  
NBR 15575-4:2021

Ruído Externo		$D_{2m,n,T,w}$ (dB)		
Classe de Ruído	$L_{inc}$ (dB)	Mínimo	Intermediário	Superior
I	$\leq 60$	$\geq 20$	$\geq 25$	$\geq 30$
II	61 a 65	$\geq 25$	$\geq 30$	$\geq 35$
III	66 a 70	$\geq 30$	$\geq 35$	$\geq 40$

Esses testes, no entanto, ainda não fazem parte da realidade brasileira. Usualmente a especificação das esquadrias são realizadas baseadas em predições de desempenho previstos na literatura especializada de acordo com a estratigrafia desses elementos, o que pode gerar imprecisões no resultado do isolamento, uma vez que as transmissões por frestas ou má-vedação pode ser considerável, além de transmissões advindas das conexões com o sistema de vedação. A Associação Brasileira das Indústrias de Vidros informa que uma fresta equivalente a 0,1% da área de uma esquadria com isolamento acústico de 34 dB pode reduzir em 6 dB o seu desempenho. Com uma fresta de 1% de área, o desempenho dessa mesma esquadria é reduzido em 16 dB.

## 5.1. Cálculo preditivos de isolamento de fachada

A metodologia de cálculo que prevê o isolamento efetivo de uma fachada ( $D_{2m,nT}$ ) composta por diversos elementos de diferentes características de isolamento ( $R_w$ ) é previsto pela ISO 12354-3:2017, sendo seus valores ponderados segundo a ISO 717-1:2021.

$$D_{2m,nT} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \cdot \log_{10} \left( C_{sab} \cdot \left( \frac{V}{T_0 \cdot S} \right) \right),$$



Em que:

$S$  é a superfície total da fachada considerada do interno do ambiente receptor em  $m^2$ ;

$V$  é o volume do ambiente receptor em  $m^3$ ;

$T_0$  é o tempo de reverberação de referência igual a 0,5 s;

$C_{sab}$  é a constante de Sabine, que é igual a 0,16 s/m;

$\Delta L_{fs}$  é a diferença de nível de pressão sonora na fachada (apêndice C da ISO 12354-3);

$R'_w$  é o índice de redução sonora ponderado aparente, o qual pode ser calculado por:

$$R'_w = -10 \cdot \log_{10} \left( \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} \cdot 10^{-\frac{R_{wi}}{10}} + \sum_{i=1}^m \frac{A_0}{S} \cdot 10^{-\frac{D_{n,e,wi}}{10}} \right),$$

Em que:

$R'_{wi}$  é o índice de redução sonora de cada  $i$ -ésimo elemento que compõe a fachada com área  $S_i$ ;

$S_i$  é a área de cada  $i$ -ésimo elemento em  $m^2$ ;

$$A_0 = 10 \text{ m}^2$$

## 6. DESCRIÇÃO DOS AMBIENTES

Nos ambientes de estudo, destacou-se os ambientes em contato com as fachadas para isolamento apropriado, sendo eles salas de aula, refeitório e sala de direção.

### 6.1. Análise tempo de reverberação

Foram analisadas salas de aula, refeitório e sala de direção. Nesses locais existe uma grande presença de superfícies refletoras, como o tampo das mesas, carteiras, cadeiras, paredes pintadas e esquadria com vidro, reiterando a necessidade da utilização de materiais absorvedores para controle do tempo de reverberação.

## 7. PROJEÇÃO DE SALAS

### 7.1. Análise do tempo de reverberação

Com base no projeto arquitetônico e na concepção dos ambientes prevista, foram feitas simulações utilizando o *software* ODEON.

#### ➤ Salas de aula

A tabela abaixo apresenta o tempo de reverberação simulado e o ideal e os classifica em atendido ou não. A figura abaixo mostra a diferença existente entre os valores simulados SEM intervenção acústica e os valores ideais de tempo de reverberação para a salas de aula.

Tabela 7-1 – RT simulados e ideais das salas de aula

f [Hz]	RT [s]		Atende?
	RT Simulado	RT Ideal	
125	1,32	1,20	Não
250	1,77	0,89	Não
500	2,09	0,75	Não
1000	2,48	0,69	Não
2000	2,31	0,72	Não
4000	1,80	0,75	Não

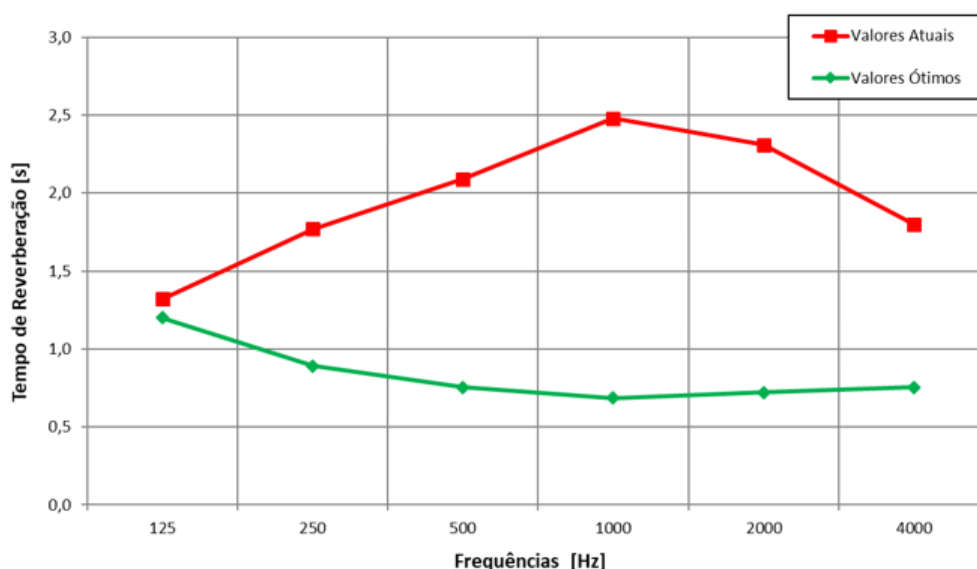


Figura 7-1 – Comparação entre os tempos de reverberação atuais e os ótimos das salas de aula

### ➤ Refeitório

A tabela abaixo apresenta o tempo de reverberação simulado e o ideal e os classifica em atendido ou não. A figura abaixo mostra a diferença existente entre os valores simulados SEM intervenção acústica e os valores ideais de tempo de reverberação para o refeitório.

Tabela 7-2 – RT simulados e ideais do refeitório

f [Hz]	RT [s]		Atende?
	RT Simulado	RT Ideal	
125	1,28	1,28	Sim
250	1,55	0,95	Não
500	1,76	0,80	Não
1000	2,05	0,73	Não
2000	1,84	0,77	Não
4000	1,48	0,80	Não

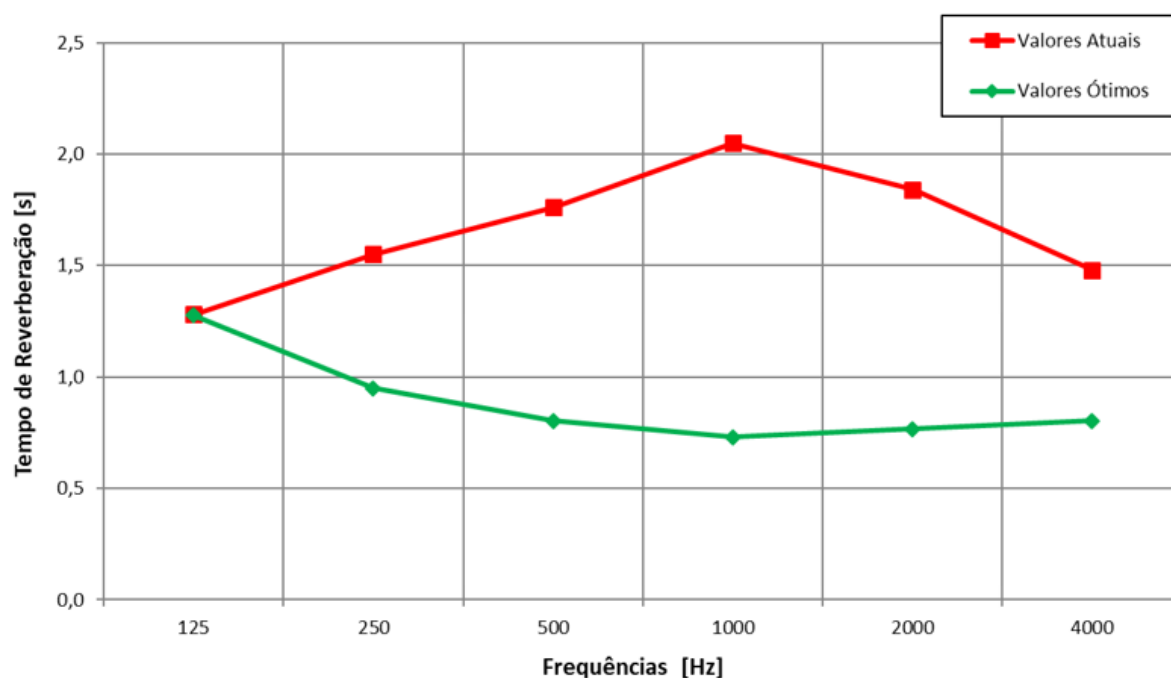


Figura 7-2 – Comparação entre os tempos de reverberação atuais e os ótimos do refeitório

#### ➤ Sala de Direção

A tabela abaixo apresenta o tempo de reverberação simulado e o ideal e os classifica em atendido ou não. A figura abaixo mostra a diferença existente entre os valores simulados SEM intervenção acústica e os valores ideais de tempo de reverberação para a sala de direção.

Tabela 7-3 – RT simulados e ideais da sala de direção

f [Hz]	RT [s]		Atende?
	RT Simulado	RT Ideal	
125	1,10	1,10	Sim
250	1,46	0,82	Não
500	1,70	0,69	Não
1000	1,97	0,63	Não
2000	1,99	0,66	Não
4000	1,61	0,69	Não



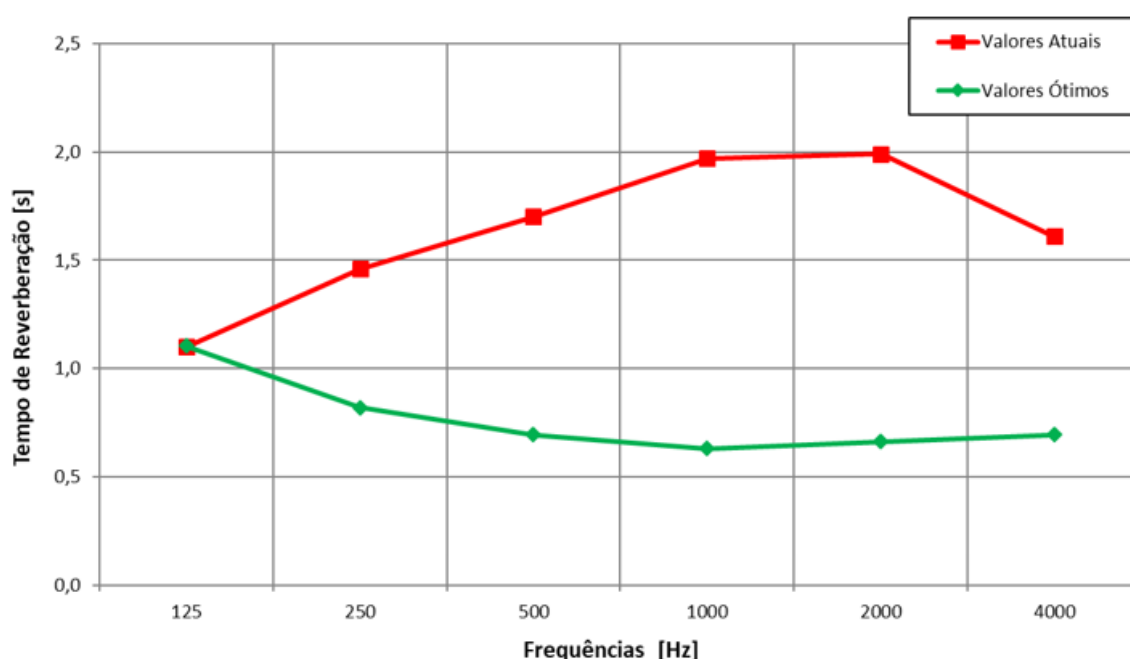


Figura 7-3 – Comparação entre os tempos de reverberação atuais e os ótimos da sala de direção

### 7.1.1. Análise dos resultados

Conforme análise dos dados apresentados em tabelas e imagens acima, temos que o tempo de reverberação simulado (ambiente sem intervenção acústica) não atinge o tempo de reverberação ótimo (ideal) em nenhuma das salas simuladas, com exceção da frequência da oitava de 125 Hz nas salas de diretoria e refeitório.

Para um projeto acústico eficiente, é necessário que o TR do ambiente seja igual ou inferior aos valores ótimos em todas as oitavas de frequência. Para isso, devem ser aplicados materiais com capacidade de reduzir esse TR, ou seja, matérias acústicas absorventes. A tabela abaixo resume as informações supracitadas, indicando a necessidade ou não de tratamento acústico por sala analisada.

Tabela 7-4 – Resumo da necessidade de tratamento acústico por ambiente

Ambiente	Necessita de tratamento acústico?
Sala tipo 1	Sim
Sala tipo 2	Sim
Sala tipo 3	Sim

## 8. PROJETO ACÚSTICO

Para a avaliação acústica do desempenho das salas, a fim de otimizar a estrutura, a forma e a escolha dos materiais de acabamento interior, foi utilizado o *software* de previsão *Odeon 12*. Este programa permite criar um modelo acústico tridimensional do ambiente e calcular os diferentes parâmetros acústicos que caracterizam qualitativamente o espaço sonoro com o método Ray-Tracing.

No método Ray-Tracing a fonte é vista como o ponto de emissão de raios acústicos de energia que se propagam no volume, refletindo nas superfícies de acordo com as leis da óptica. A energia transmitida pela fonte é distribuída e transmitida por raios acústicos, projetados por ela seguindo um índice de diretividade com base em hipóteses específicas:

- i. aplicam-se as aproximações da acústica geométrica;
- ii. nas superfícies de contorno o som reflete especularmente;
- iii. a energia sonora da fonte é quantizada em um número finito de pacotes associados a raios sonoros, também chamados de partículas sonoras ou fônons;
- iv. a partir da posição da fonte, os raios sonoros se propagam em todas as direções de acordo com as leis da acústica geométrica;
- v. os raios sonoros têm uma seção idealmente infinitesimal e constante;
- vi. A divergência geométrica da energia sonora emitida é representada pela divergência geométrica do conjunto de raios sonoros;
- vii. Os raios sonoros perdem energia devido ao efeito:
  - a. absorção de superfícies de contorno impactadas
  - b. da atenuação do som do ar
- viii. Na recepção, os quanta de energia sonora associados aos diferentes raios podem ser somados.

No método *Ray-Tracing* também é necessário levar em conta o fenômeno de difusão, ou espalhamento, ou a mudança de trajetória, ou deflexão, de partículas de energia devido à incidência nas superfícies de fronteira rugosas. Esta deflexão é, no campo acústico, uma função da razão entre a rugosidade das superfícies e o comprimento de onda, ou seja, a frequência, de acordo com o fenômeno tipicamente ondulatório de "espalhamento".

A modelagem que será relatada nesta parte do relatório é o resultado de avaliações que se baseiam nas geometrias das salas e nos valores ótimos da ação dos tempos de reverberação que deverão ser alcançados.

A modelagem do projeto também foi realizada utilizando o software Odeon Auditorium DK, SONarchitect e planilhas eletrônicas.

Lembrando que, durante o projeto, foram avaliados os tempos de reverberação das salas atualmente (com base no projeto arquitetônico), antes da intervenção de correção acústica e foram calculados os valores ótimos para o ambiente em questão (com base no tamanho e tipo de uso da sala) e com base nas necessidades do cliente procedeu-se ao dimensionamento da intervenção para a melhoria do conforto acústico interno. O mesmo processo foi feito para a análise do desempenho das fachadas.



## 9. INTERVENÇÕES E RESULTADOS

O material selecionado para o controle do tempo de reverberação foi o forro acústico. Ele deve ser aplicado em toda área de teto das salas de aula, sala de diretoria e refeitório que estão em contato com as fachadas.

As principais características de absorção deste produto são mostradas na tabela abaixo. A figura abaixo mostra um exemplo de como é a aplicação de um material do tipo proposto.

Tabela 9-1 – Coeficiente de absorção (por oitava) dos materiais utilizados no projeto

Frequências (Hz)	$\alpha_{\text{Forro}}^*$
125	0,35
250	0,45
500	0,5
1000	0,65
2000	0,70
4000	0,55

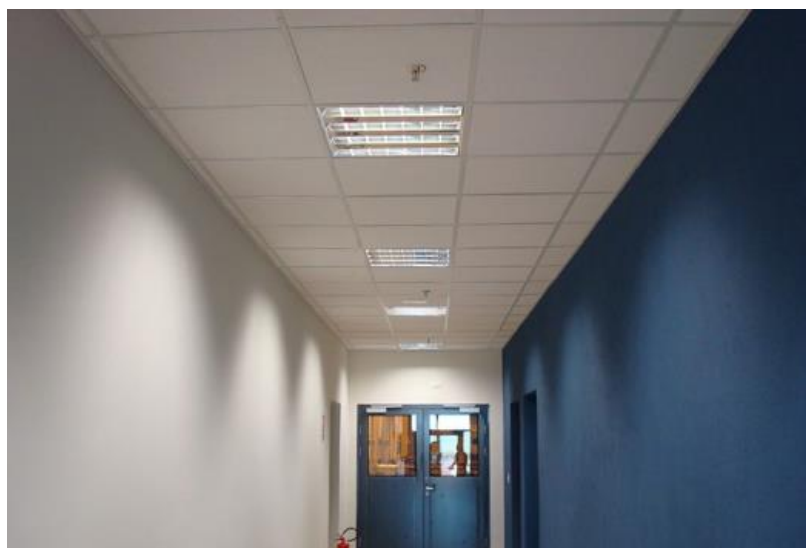


Figura 9-1 – Exemplo de aplicação do forro acústico OWA Lucero (Sirius)

## 9.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Após a modelagem do *software*, será reportada uma proposta de projeto. Os materiais selecionados para o controle do tempo de reverberação foram: forro acústico.

Tabela 9-2 – RT simulado, ideal e atingido para salas de aula

f [Hz]	RT [s]			Atende?
	RT Simulado	RT Ideal	RT Atingido	
125	1,32	1,20	0,68	Sim
250	1,77	0,89	0,68	Sim
500	2,09	0,75	0,67	Sim
1000	2,48	0,69	0,58	Sim
2000	2,31	0,72	0,54	Sim
4000	1,80	0,75	0,60	Sim

Tabela 9-3 RT simulado, ideal e atingido para o refeitório

f [Hz]	RT [s]			Atende?
	RT Simulado	RT Ideal	RT Atingido	
125	1,28	1,28	0,67	Sim
250	1,55	0,95	0,64	Sim
500	1,76	0,80	0,63	Sim
1000	2,05	0,73	0,55	Sim
2000	1,84	0,77	0,51	Sim
4000	1,48	0,80	0,56	Sim

Tabela 9-4 RT simulado, ideal e atingido para a sala de diretoria

f [Hz]	RT [s]			Atende?
	RT Simulado	RT Ideal	RT Atingido	
125	1,10	1,10	0,62	Sim
250	1,46	0,82	0,63	Sim
500	1,70	0,69	0,62	Sim
1000	1,97	0,63	0,55	Sim
2000	1,99	0,66	0,52	Sim
4000	1,61	0,69	0,58	Sim

## 9.2. Isolamento de fachadas

Os resultados obtidos para a análise de isolamento acústico no *software* SONarchitect foram satisfatórios e todos valores são superiores ao mínimo estabelecido de 30 dB, chegando a alcançar inclusive o valor intermediário para a Classe de Ruído III. Logo, com a aplicação da janela indicada em projeto será possível obter um conforto maior mesmo com maior emissão de ruído na região.

## 9.3. Nota de execução

### ➤ Esquadrias

Recomenda-se, do ponto de vista de isolamento e de estanqueidade acústica dos ambientes que todas as portas e janelas de todos os ambientes tenham o máximo de vedação possível. Todas as frestas deverão ser evitadas e, caso inevitáveis, tapadas com borracha ou qualquer material que garanta a não passagem de ar.

### ➤ Forro

Para o condicionamento acústico dos ambientes descritos neste relatório, prevê-se o forro de fibra mineral que deve apresentar CAC maior que 30 dB.

- Fazer a paginação das placas de acordo com o ambiente e pranchas.
- Verificado o esquadro do ambiente.

- Instalar as cantoneiras de perímetro na altura demarcada, com auxílio da furadeira, parafusos e buchas.
- Nivelar a grade de suspensão, com auxílio do nível.

## 10. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Este documento é o resultado da análise realizada para o projeto da acústica da Escola Municipal Alegrinho, localizada nas Ruas Lourdes Souza Santos e Rua Vinte e Um, possuindo a frente para a Rua Lourdes Souza Santos, no bairro Colina Verde, na cidade de Pouso Alegre – MG.

Como a escola está em fase de projeto, foi necessária a simulação dos ambientes nos *softwares*, conforme descrito ao longo deste documento. Por meio dessas simulações foi possível definir os materiais acústicos, suas especificações, os absorvedores (forro acústico) impactarão diretamente nos parâmetros objetivos referentes à fala e os isolantes (esquadrias) impactarão diretamente no controle do ruído proveniente do exterior da edificação. Além disso, o desempenho das fachadas também foi simulado de acordo com a ISO12354-3:2017 antes e depois das intervenções propostas, sendo seus resultados comparados com os parâmetros da NBR 15575:2021.

Para o controle do tempo de reverberação, optou-se pela utilização de forro em fibra mineral, com um índice único coeficiente de absorção sonora (NRC), que, no entanto, é importante se ressaltar que é um número médio, sendo, portanto, fortemente recomendado que se observe o gráfico da absorção em oitavas e que sejam o mais similar possível com o mostrado no corpo deste relatório.

Para o isolamento, optou-se pela utilização de janelas acústicas com índice de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) de 32 dB

Recomenda-se que a instalação dos materiais acústicos de absorção e das janelas sigam às instruções dos fabricantes.

Ressalta-se ainda a necessidade do cuidado na execução e instalação das esquadrias, uma vez que usualmente são as imperfeições nesse processo que permitem a passagem de ar de um ambiente ao outro e, conseqüentemente, passagem do som.

Obs.: quaisquer alterações no projeto e nos materiais indicados poderá gerar resultados diferentes dos projetados.