

# **CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA REABILITAÇÃO DE CLAUSTROS**

**SÍLVIA RAQUEL CARVALHO VILELA**

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS**

---

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

---

FEVEREIRO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais, Maria José e Joaquim, por tudo!

## **AGRADECIMENTOS**

Findo este trabalho, gostaria de agradecer a todos os que possibilitaram a sua concretização:

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, orientador desta tese, um particular agradecimento pelo empenho, interesse, entusiasmo e disponibilidade sempre demonstrados, assim como pelas sugestões dadas e revisão pormenorizada deste trabalho;

Ao Eng.º António Eduardo Costa, pelo cuidado e dedicação na realização das medições acústicas, assim como pela disponibilidade e bom humor;

Aos responsáveis pelos imóveis estudados e a todos os que de alguma forma auxiliaram na concretização das medições acústicas, pela facilidade no acesso e ajuda dispensadas;

À Dr.ª Maria João e à Dr.ª Paula da biblioteca do IPPAR, pela atenção e disponibilidade prestadas;

Ao Eng.º e amigo Alípio Torre, à Eng.ª Mónica Mota e ao amigo Ricardo Rodrigues, pelo interesse e colaboração;

Ao Ricardo pelo incentivo, paciência, carinho e apoio, sempre.



## RESUMO

O presente trabalho pretende caracterizar acusticamente o efeito da reabilitação de claustros de edifícios religiosos históricos que podem, ou não, ter sofrido alterações na sua utilização mas que, actualmente, têm as suas galerias ou pátio central fechados com vidro – claustros ‘fechados’-. O tema surgiu no seguimento da tese de Mestrado em Construções de Edifícios, de Anabela Carvalho, em que se caracterizaram os claustros ‘abertos’ e se mediram parâmetros como tempo de reverberação, RASTI, propagação do ruído emitido e caracterizadores do ruído de fundo.

Neste estudo, realizaram-se medições de dois parâmetros acústicos objectivos nas galerias dos claustros: tempo de reverberação, nas frequências dos 125 Hz aos 4 kHz e RASTI. Foram medidos quatro pontos em duas galerias perpendiculares, para cada um dos claustros. A medição de apenas ½ claustro foi realizada por admissão da existência de simetria dessas duas galerias relativamente às duas restantes.

A amostra escolhida abrange seis claustros de épocas construtivas e estilos arquitectónicos variados, sendo a construção mais antiga do séc. XI e a mais recente do séc. XVIII. Todas as conclusões retiradas têm por base esta amostra.

Verificou-se que a Inteligibilidade da palavra, apesar do fecho das galerias e conseqüente aumento da reverberação, é conseguida em três dos seis claustros estudados, uma vez que os valores médios de RASTI variam entre 0,47 e 0,50 nesses casos. Nos restantes três claustros, o RASTI tem valores de 0,40 a 0,42, o que parece ser insuficiente para as utilizações actuais dos espaços em questão, onde é importante a Inteligibilidade da palavra.

O Tempo de reverberação médio obtido para as frequências estudadas situa-se entre os 2,2 e 3,4 segundos, o que parece elevado para utilizações onde se valoriza fundamentalmente a Inteligibilidade da palavra.

Na relação entre parâmetros acústicos conclui-se que a variabilidade dos valores de RASTI é explicada, sobretudo, pelos valores do Tempo de Reverberação nas bandas de frequências dos 250 Hz, 500 Hz e 4 kHz.

Nas relações simples entre parâmetros acústicos e arquitectónicos, observou-se que os mais interferentes nos valores do tempo de reverberação e RASTI são a altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ), o volume ( $V$ ) e, principalmente, a absorção sonora equivalente ( $A$ ) e que a largura das galerias ( $L_m$ ) parece não ter relação significativa com os parâmetros acústicos medidos, tal como a área de abertura para capelas ( $Scap$ ) e área de vidro ( $S_v$ ).

Para correlações baseadas em modelos gerais lineares entre parâmetros acústicos e parâmetros geométricos observou-se que a variabilidade dos valores de RASTI é fortemente justificada (97%) pelo volume ( $V$ ) e pela área de vidro ( $S_v$ ), encontrando-se as melhores correlações para as bandas de frequência mais elevadas, nomeadamente 2 kHz e 4 kHz ( $R^2$  de 99%).

Na comparação entre fórmulas obtidas em claustros ‘abertos’ e ‘fechados’ foi possível quantificar as variações nos parâmetros RASTI e TR aquando do fecho com vidro das galerias do claustro. Os valores de RASTI diminuem e, como também previsto, os Tempos de Reverberação aumentam para as várias frequências, crescendo sobretudo com a absorção sonora ( $A$ ) e ainda com o aumento de área de pavimento ( $S_{pg}$ ) e altura máxima das galerias do claustro ( $H_{max}$ ), logo com o volume ( $V$ ) do espaço.

**PALAVRAS-CHAVE:** claustros, reabilitação acústica, Tempo de Reverberação, RASTI, inteligibilidade da palavra.



**ABSTRACT**

This work presents an acoustical characterization of religious cloisters which utilizations are different, or not, from the end of the construction but now the galleries, or yard, are closed with glass – ‘closed cloisters’ -. This work follows another thesis about acoustical characterization of religious cloisters, where ‘open cloisters’ were studied.

To achieve the objectives, two objective acoustical parameters were measured: reverberation time, from 125 Hz frequency to 4 kHz and RASTI. Four measuring positions were used in two perpendicular galleries in each cloister so only half cloister was tested because they were symmetric.

Six cloisters, from the 11<sup>th</sup> century to the 18<sup>th</sup> century, which represent several architectural styles, constitute the sample used and all conclusions are based on it.

The results show that the foreseen cloisters’ speech intelligibility is achieved in three of the six studied cloisters because they have average RASTI values between 0.47 and 0.50. Other cloisters, the average RASTI values vary from 0.40 to 0.42, which seems to be insufficient for the actual utilizations of those places, where speech intelligibility is important. The average reverberation time measured is situated between 2.2 and 3.4 seconds, which is high and negatively affecting the speech intelligibility.

It is possible to conclude by tested relationships among the acoustical parameters that RASTI variability is explained on 81% by the values of the reverberation time on the 250 Hz, 500 Hz and 4 kHz frequency bands. The tested relationships among acoustical and architectural parameters it is noticed that the most involved parameters regarding reverberation time and RASTI values are the galleries’ maximum height ( $H_{max}$ ), the volume ( $V$ ) and, specially, the sound absorption ( $A$ ). The galleries’ width ( $L_m$ ), the opening chapels’ area ( $Scap$ ) and the glass area ( $S_v$ ) don’t seem to have an important connection to the acoustical parameters measured.

By the tested relationships among acoustical and architectural parameters using general linear models it is possible to conclude that RASTI values are strongly justified (97%) by the volume ( $V$ ) and the galleries’ area of glass connecting to the central yard ( $S_v$ ). Better correlations are found on high frequency bands of the reverberation time, 2 kHz and 4 kHz ( $R^2 = 99\%$ ).

Comparing the ‘opened’ and ‘closed’ cloisters’ predicting formulas it is possible to quantify the achieved variation on the RASTI and TR values. A decrease on RASTI values was observed on ‘closed’ cloisters. As expected, the reverberation time values for all frequencies bands increase in the ‘closed’ cloisters relatively to the ‘open’ and grow, too, with the increasing of the sound absorption ( $A$ ), the galleries’ pavement area ( $S_{pg}$ ), the galleries’ maximum height ( $H_{max}$ ) and with the volume ( $V$ ).

**KEYWORDS:** cloisters, acoustical rehabilitation, Reverberation Time, RASTI, speech intelligibility.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS</b> .....	1
<b>1.2. ESTRUTURA DA TESE</b> .....	2
<b>2. CLAUSTRO</b> .....	3
<b>2.1. DEFINIÇÃO DE CLAUSTRO</b> .....	3
<b>2.2. MANUTENÇÃO VERSUS REABILITAÇÃO</b> .....	3
2.2.1. REABILITAÇÃO DE CLAUSTROS: COM QUE FINALIDADE? .....	5
<b>2.3. INTERVENÇÕES PARA NOVAS UTILIZAÇÕES DO ESPAÇO ‘CLAUSTRO’</b> .....	5
2.3.1. GALERIA ABERTA .....	5
2.3.1.1. Utilização: Apoio à restauração / lazer de uma Pousada .....	5
2.3.1.2. Utilização: Actividades culturais num Mosteiro .....	6
2.3.1.3. Utilização: Galeria de exposições de um Museu .....	6
2.3.2. GALERIA FECHADA COM VIDRO .....	7
2.3.2.1. Utilização: Apoio à restauração / lazer / local de passagem de uma Pousada .....	7
2.3.2.2. Utilização: Local de passagem / actividades culturais em estabelecimentos de Ensino .....	10
2.3.2.3. Utilização: Galeria de exposições de um Museu .....	11
2.3.2.4. Utilização: Zona de passagem num hospital .....	12
2.3.2.5. Utilização: Pólo cultural .....	12
2.3.2.6. Utilização: Lar de Terceira Idade .....	14
<b>3. MÉTODO</b> .....	15
<b>3.1. PARÂMETROS DE SELECÇÃO DA AMOSTRA</b> .....	15
<b>3.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA SELECIONADA</b> .....	16
3.2.1. CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA .....	16
3.2.1.1. Biblioteca Municipal do Porto (BP) .....	17
3.2.1.2. Comando Metropolitano da PSP do Porto (PSP) .....	17

3.2.1.3. Sé de Braga (SB) .....	19
3.2.1.4. Escola Superior de Enfermagem da Universidade do Minho (ESE).....	20
3.2.1.5. Venerável Ordem Terceira de São Francisco (SF).....	21
3.2.1.6. Convento de Alpendurada (CA) .....	23
3.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITECTÓNICA DA AMOSTRA .....	24
<b>3.3. METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
3.3.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS .....	25
3.3.2. MÉTODO.....	27
<b>4. ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1. VALORES OBTIDOS .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS: ANÁLISE INTRA – CLAUSTROS .....</b>	<b>34</b>
4.2.1. VARIABILIDADE EM CADA CLAUSTRO .....	34
<b>4.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS: ANÁLISE INTER – CLAUSTROS .....</b>	<b>36</b>
4.3.1. VARIABILIDADE ENTRE CLAUSTROS: ANÁLISE ESTATÍSTICA GLOBAL.....	36
4.3.2. CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS.....	37
<b>4.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS: ANÁLISE INTER – CLAUSTROS....</b>	<b>41</b>
4.4.1. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	41
4.4.2. VALORES OBTIDOS E VARIABILIDADE ENTRE CLAUSTROS .....	42
4.4.3. CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	44
4.4.3.1. Modelos simples.....	44
4.4.3.2. Modelos gerais lineares.....	51
4.4.4. CORRELAÇÃO SIMPLES ENTRE O PARÂMETRO ACÚSTICO RASTI E DISTÂNCIA À FONTE SONORA .....	52
<b>4.5. COMPARAÇÃO ENTRE FÓRMULAS OBTIDAS PARA CLAUSTROS ‘ABERTOS’ E PARA CLAUSTROS ‘FECHADOS’: VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS ACÚSTICOS RASTI E TR .....</b>	<b>53</b>
4.5.1. MODELOS SIMPLES.....	53
4.5.2. MODELOS GERAIS LINEARES .....	59
<b>5. APLICAÇÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS DE PREVISÃO DOS VALORES DE <math>\Delta</math>RASTI E <math>\Delta</math>TR ..</b>	<b>61</b>
5.1.1. EXEMPLO.....	61

<b>5.2. PROPOSTAS PARA CORRECÇÃO ACÚSTICA DAS GALERIAS REABILITADAS (FECHO DAS MESMAS COM VIDRO)</b> .....	62
5.2.1. PAINÉIS DE CORRECÇÃO ACÚSTICA (CORRECÇÃO ACÚSTICA LOCALIZADA).....	62
5.2.2. PAINÉIS DE CORRECÇÃO ACÚSTICA (CORRECÇÃO ACÚSTICA EM TODA A PAREDE OU TECTO) .....	64
5.2.3. TECTOS ACÚSTICOS .....	64
5.2.4. OUTROS.....	65
<b>6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	67
6.1. CONCLUSÕES.....	67
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	70
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	A
<b>ANEXOS</b> .....	a
<b>ANEXO A – FICHA DE REGISTO DE MEDIÇÕES</b> .....	c
<b>ANEXO B – FICHAS COM VALORES OBTIDOS NAS MEDIÇÕES ACÚSTICAS</b> .....	g
<b>ANEXO C – GRÁFICOS DOS MELHORES MODELOS DE REGRESSÃO SIMPLES ENTRE OS PARÂMETROS ACÚSTICOS TR E RASTI</b> .....	s
<b>ANEXO D – GRÁFICOS DOS MELHORES MODELOS DE REGRESSÃO SIMPLES ENTRE OS PARÂMETROS ACÚSTICOS TR E RASTI E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS</b> .....	aa
<b>ANEXO E – GRÁFICOS DAS EXPRESÕES OBTIDAS COM MODELOS SIMPLES PARA A VARIAÇÃO NOS VALORES DE RASTI E DE TR RESULTANTES DO FECHO COM VIDRO DAS GALERIAS DOS CLAUSTROS</b> .....	kk

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2-1 – Conceito de Manutenção e Reabilitação de um edifício, de acordo com o seu desempenho	4
Fig.2-2 (A e B) - Claustro do Convento da Graça, Tavira .....	6
Fig.2-3 – Claustro do Museu Alberto Sampaio, Guimarães.....	6
Fig.2-4 (A e B) – Claustro do Museu de Arqueologia, Guimarães.....	7
Fig.2-5 – Claustro da Pousada de São Francisco, Beja .....	7
Fig.2-6 (A e B) - Claustro da Pousada dos Lóios, Évora .....	8
Fig.2-7 (A e B) – Claustro da Pousada de Nossa Senhora da Assunção, Arraiolos .....	8
Fig.2-8 (A e B) - Claustro do Convento do Desagravo, Vila Pouca da Beira.....	9
Fig.2-9 (A e B) – Claustro da Pousada Castelo de Palmela, Palmela .....	9
Fig.2-10 – Claustro da FPCE da UC, Coimbra .....	10
Fig.2-11 (A e B) – Claustro do IPS antes e após a intervenção, Setúbal .....	10
Fig.2-12 – Colégio da Nossa Senhora da Esperança, Porto .....	11
Fig.2-13 – Planta do Piso 0 do Museu Nacional do Azulejo, Lisboa.....	11
Fig.2-14 – Claustro de D. João III.....	12
Fig.2-15 (A e B) – Claustro do Hospital de S. Marcos, Braga.....	12
Fig.2-16 – Claustro principal do Convento de São Bento da Vitória, no qual ensaiava a Orquestra Clássica do Porto .....	13
Fig.2-17 – Claustro do Convento do Beato, Lisboa .....	13
Fig.2-18 (A e B) - Igreja da Caridade, Viana do Castelo.....	14
Fig.3-1 – Simetria do claustro relativamente a AB .....	15
Fig.3-2 (A e B) - Claustro da Biblioteca Municipal do Porto .....	17
Fig.3-3 (A e B) – Claustro do edifício do Aljube .....	18
Fig.3-4 (A e B) - Claustro da Sé de Braga.....	19
Fig.3-5 (A e B) – Claustro da ESE da Universidade do Minho .....	20
Fig.3-6 (A e B) - Claustro estudado da Venerável Ordem Terceira de São Francisco.....	21
Fig.3-7 – Pátio quadrado com chafariz gótico, do Claustro estudado .....	22
Fig.3-8 (A e B) - <i>Claustro pequeno</i> da Venerável Ordem Terceira de São Francisco.....	22
Fig.3-9 – Claustro do Convento de Alpendurada, Alpendurada .....	23
Fig.3-10 – Fonte sonora .....	27

Fig.3-11 (A e B) – Posicionamentos do sonómetro num mesmo ponto .....	28
Fig.3-12 – Distribuição dos pontos de medição do TR no claustro (1 a 4) e fonte sonora (FS).....	28
Fig.3-13 (A e B) - Unidade emissora do RASTI .....	29
Fig.3-14 (A e B) - Unidade receptora do RASTI, com microfone omnidireccional .....	29
Fig.3-15 – Distribuição dos pontos de medição do RASTI no claustro (1 a 4) e fonte sonora (FS).....	30
Fig.4-1 – Melhor correlação simples obtida entre os parâmetros acústicos TR e RASTI .....	38
Fig.4-2 (A e B) – Melhor correlação simples obtida entre bandas do parâmetro acústico TR .....	39
Fig.4-3 – Valor de $R^2$ para a relação entre TR500 1k e RASTI obtido no presente estudo, para 6 claustros ‘fechados’ .....	40
Fig.4-4 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico RASTI e os parâmetros geométricos.....	46
Fig.4-5 – Segunda melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico RASTI e os parâmetros geométricos.....	46
Fig.4-6 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR125 e os parâmetros geométricos.....	47
Fig.4-7 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR250 e os parâmetros geométricos.....	47
Fig.4-8 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR500 e os parâmetros geométricos.....	48
Fig.4-9 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR1k e os parâmetros geométricos.....	48
Fig.4-10 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR2k e os parâmetros geométricos.....	49
Fig.4-11 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR4k e os Parâmetros geométricos .....	49
Fig.4-12 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR500 1k e os parâmetros geométricos.....	50
Fig.4-13 – Relação entre $L_m$ e TR500 obtida para os seis claustros em estudo .....	51
Fig.4-14 – Melhor correlação entre RASTI e distância à fonte sonora (d) .....	53
Fig.4-15 – Variação nos valores de RASTI resultante do fecho com vidro das galerias, em função do $V$ .....	55

Fig. 4-16 - Variação nos valores de TR125 resultante do fecho com vidro das galerias, em função da <i>A 125 250</i> .....	55
Fig.4-17 – Variação nos valores de TR250 resultante do fecho com vidro das galerias, em função da <i>A 125 250</i> .....	56
Fig.4-18 – Variação nos valores de TR500 resultante do fecho com vidro das galerias, em função da <i>A 500 1k</i> .....	56
Fig. 4-19 - Variação nos valores de TR1k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da <i>A 500 1k</i> .....	57
Fig.4-20 – Variação nos valores de TR2k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da <i>Hmax</i> .....	57
Fig.4-21 – Variação nos valores de TR4k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da <i>Spg</i> .....	58
Fig.4-22 – Variação nos valores de TR500 1k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da <i>A 500 1k</i> .....	58
Fig.5-1 – MatrixPanel da ASC .....	63
Fig.5-2 – PicturePanel da ASC.....	63
Fig.5-3 – Exemplo de aplicabilidade de painéis acústicos .....	64
Fig.5-4 (A, B e C) – Coffered ceiling system da ASC.....	65

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1 – Claustros estudados .....	16
Quadro 3-2 – Características arquitectónicas dos 6 claustros estudados.....	24
Quadro 3-3 – Características geométricas dos 5 claustros medidos neste trabalho .....	24
Quadro 3-4 – Resumo das características geométricas dos 6 claustros estudados.....	25
Quadro 3-5 – TR ideais, para as bandas de frequência entre 500 Hz e 2 kHz, de acordo com o tipo de utilização prevista para o espaço .....	26
Quadro 3-6 – Correspondência entre o parâmetro RASTI e a Inteligibilidade da palavra .....	27
Quadro 3-7 – Coeficientes de absorção sonora, $\alpha$ , para os diferentes materiais encontrados .....	31
Quadro 3-8 – Coeficientes de absorção sonora, $\alpha$ , em função da profundidade da capela .....	31
Quadro 4-1 – Valores médios obtidos, em cada claustro, para o parâmetro TR, para as bandas de frequência dos 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz.....	33
Quadro 4-2 – Valores médios obtidos para o parâmetro RASTI .....	34
Quadro 4-3 – Desvio padrão para TR e RASTI .....	34
Quadro 4-4 – Dados estatísticos referentes aos TR médios, para cada banda de frequência, para os 6 claustros em estudo .....	36
Quadro 4-5 – Dados estatísticos referentes ao RASTI médio, para os 6 claustros em estudo .....	36
Quadro 4-6 – Domínio, preferencial, de aplicação dos modelos simples de relação entre parâmetros acústicos .....	37
Quadro 4-7 – Melhores modelos de regressão simples entre parâmetros acústicos.....	38
Quadro 4-8 – Valores de $R^2$ para a relação entre TR500 1k e RASTI obtidos em estudos de igrejas, salas de audiência de tribunais, claustros ‘abertos’ e ‘fechados’ .....	40
Quadro 4-9 – Parâmetros geométricos utilizados no estudo das relações com os parâmetros acústicos .....	42
Quadro 4-10 – Parâmetros geométricos medidos nos 6 claustros em estudo.....	42
Quadro 4-11 – Valores estatísticos dos parâmetros geométricos para os seis claustros em estudo .....	43
Quadro 4-12 – Domínio, preferencial, de aplicação dos modelos simples de relação entre parâmetros acústicos e geométricos .....	44
Quadro 4-13 – Melhores modelos de regressão simples entre parâmetros acústicos e geométricos .....	45

Quadro 4-14 – Melhores modelos gerais lineares de relação entre parâmetros acústicos e geométricos .....	52
Quadro 4-15 – Melhores fórmulas de previsão dos valores de $\Delta$ RASTI e $\Delta$ TR, depois do fecho com vidro das galerias dos claustros, a partir de parâmetros geométricos e usando modelos simples .....	54
Quadro 4-16 – Melhores fórmulas de previsão dos valores de $\Delta$ RASTI e $\Delta$ TR, depois do fecho com vidro das galerias dos claustros, a partir de parâmetros geométricos e usando modelos gerais lineares .....	60
Quadro 5-1 – Parâmetros geométricos conhecidos do Claustro ‘aberto’ da Igreja de São Gonçalo ...	61
Quadro 5-2 – Valores previsíveis de $\Delta$ RASTI e $\Delta$ TR para o Claustro da Igreja de São Gonçalo, após o fecho com vidro das galerias do claustro .....	62

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 3.1. ....	30
Fórmula 4.1. e 4.2. ....	54
Fórmula 4.3. ....	59

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

Um dos fenómenos que contribui para uma certa complexidade da acústica é o facto de não concordarem directamente os fenómenos físicos e a sua acção sobre o sistema nervoso sensorial humano e a interpretação que lhes dá o sistema nervoso central e periférico. Tal conduz a distinguir uma acústica subjectiva que, na verdade, é a que interessa ao arquitecto ou ao engenheiro que procura actuar em termos de realizar condições ambientais que garantam conforto acústico. [1]

Cada vez mais é importante tratar acusticamente os edifícios, para a obtenção do referido conforto acústico, considerado actualmente como um requisito de qualidade inquestionável e, para tal, deverá cumprir o Regulamento dos Requisitos Acústicos para Edifícios – RRAE [2] –, quer em construções novas quer em reabilitação. No entanto, existindo uma vasta informação relativa ao comportamento e características acústicas de grandes auditórios, salas de espectáculo ou ainda salas de aula, o mesmo não se verifica para igrejas e ainda menos para um espaço tão específico daquelas, como é o caso dos claustros.

O estudo acústico em igrejas foi iniciado em Portugal por A. P. Carvalho (1994) [3] e outros se lhe seguiram, como A. Morgado (1996) [4], M. Lencastre (1998) [5] e C. Monteiro (2003) [6]. O presente trabalho surge neste contexto do programa de investigação em Acústica de Igrejas do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e no seguimento da tese de Mestrado em Construções de Edifícios, de Anabela Carvalho (2005) [7], cujo tema é ‘Caracterização Acústica de Claustros Religiosos Históricos’, onde foi utilizada uma amostra de vinte claustros.

No entanto e devido à crescente utilização de antigos mosteiros e conventos para outras actividades e funções, que passam muito para além das usuais visitas ao monumento, é possível encontrar actualmente claustros utilizados como museus, salas de concertos e de exposições, para algumas actividades teatrais, zona de estar e de convívio ou ainda para apoio à restauração.

Estando as acções de conservação e reabilitação na ordem do dia, pretendeu-se com este estudo caracterizar acusticamente claustros reabilitados por fecho das galerias com vidro, para os adaptar a novas funções. Com esse objectivo, procura-se relacionar a geometria interior com os parâmetros acústicos medidos (Tempo de Reverberação e RASTI) e quantificar alterações nos valores desses parâmetros acústicos relativamente aos claustros ‘abertos’ (não reabilitados), concluindo sobre a inteligibilidade da palavra em claustros sujeitos a alterações. Para tal, e dadas as limitações temporais deste trabalho, foram seleccionados sete claustros de épocas de construção distintas e com interesse patrimonial, cujas galerias tenham sido fechadas com vidro, tornando-as espaços interiores – claustros ‘fechados’.

## 1.2. ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho foi organizado por capítulos, a saber:

- No Capítulo 1, com o tema ‘Introdução’, enquadra-se a tese no contexto da Acústica de Igrejas e refere-se a sua estrutura;
- No Capítulo 2, com o tema ‘Claustro’, além da definição desse espaço, enquadra-se a reabilitação no estudo presente e apresentam-se exemplos de claustros com galeria aberta e fechada com vidro, que actualmente têm uma utilização diferente da prevista aquando da sua construção;
- No Capítulo 3, com o tema ‘Método’, referem-se quais os parâmetros de selecção exigidos e caracteriza-se, histórica, arquitectónica e geometricamente, a amostra constituída por sete claustros. É indicada a metodologia seguida e os equipamentos utilizados nas medições acústicas;
- No Capítulo 4, com o tema ‘Análise de resultados’, são apresentados os valores médios obtidos para os parâmetros Tempo de Reverberação (TR) e RASTI e faz-se a análise intra e inter claustros, recorrendo à análise estatística. São apresentadas as melhores correlações entre os parâmetros acústicos medidos (usando modelos simples) e entre estes e os geométricos (usando modelos simples e modelos gerais lineares), cujos gráficos podem ser observados em Anexo. Estudou-se, também, a relação entre os valores de RASTI com a distância à fonte sonora.  
  
Uma vez comparadas as fórmulas conseguidas para a presente amostra de seis claustros ditos ‘fechados’ (reabilitados com o fecho com vidro das galerias) com as obtidas para os dezasseis claustros ‘abertos’ estudados em trabalho anterior [7] foi possível quantificar a variação nos valores de RASTI e TR aquando do fecho com vidro das galerias dos claustros.
- No Capítulo 5, com o tema ‘Aplicações’, é dado um exemplo em que se utilizam as fórmulas de previsão conseguidas (que relacionam a variação dos valores de RASTI e TR com parâmetros geométricos do claustro) e apresentam-se propostas para correcção acústica das galerias reabilitadas (fechadas com vidro nas galerias).
- No Capítulo 6, com o tema ‘Conclusões e desenvolvimentos futuros’, são apresentadas as conclusões do trabalho e referidas algumas sugestões para possíveis trabalhos a desenvolver nesta área.

## CLAUSTRO

### 2.1. DEFINIÇÃO DE CLAUSTRO

No presente trabalho, a palavra ‘claustro’ refere-se ao local ou tipo de construção nascido na Europa Ocidental, na Idade Média, constituído por um pátio interno formado pelas paredes da igreja e/ou de edifícios residenciais, cercado por uma colunata coberta que circunda um pátio central (em geral de forma quadrada). O estilo arquitectónico varia reflectindo as ideias mais em voga da época da construção.

Na sua maioria, apresentam planta quadrada embora também esta possa ser rectangular, trapezoidal ou até circular, sendo estes dois últimos casos bastante menos comuns. Podem ter só um ou um reduzido número de pisos, apresentando vulgarmente uma galeria coberta a toda a volta.

### 2.2. MANUTENÇÃO VERSUS REABILITAÇÃO

Actualmente, a recuperação/requalificação está no assunto do dia, tanto no sector público como no privado.

“ (...) as estatísticas mostram que, em Portugal, não chega aos 10% (...) os processos de reabilitação, 1% para a conservação e restauro do património, (...). Apesar da fraca expressão dos números portugueses, actualmente a reabilitação de edifícios é um tema de grande destaque (...).” [8]

“ (...) à medida que a sociedade se vai apercebendo da importância crescente da preservação do património.” [9]

“ À medida que as necessidades de habitação e infra-estruturas do país vão sendo colmatadas, a actividade do sector da construção tende a deslocar-se, progressivamente, da construção nova para a manutenção e reabilitação das construções existentes (...).” [10]

Apesar de, por vezes, se confundirem as palavras manutenção, conservação, restauro e reabilitação de um edifício, estas possuem diferentes significados. Atente-se nas definições [11]:

Manutenção – Conjunto de operações que procuram minimizar os efeitos da deterioração na vida de um edifício e que, geralmente, são efectuadas em ciclos regulares. Desenvolvem-se sobre diversas partes e elementos da construção e ainda sobre instalações e equipamentos e têm como objectivo repor o desempenho do edifício quando novo.

Conservação – Acções destinadas a aumentar o tempo de vida e a salvaguardar os valores históricos e arquitectónicos de um edifício. Tal inclui todos os actos que prolonguem a vida do património

cultural, nomeadamente as operações de manutenção já referidas, a fim de evitar a deterioração. Não deve ser confundido com a vulgar manutenção dos edifícios.

Restauro – Conjunto de acções altamente especializadas de forma a recuperar os materiais, forma e aparência de um edifício, referentes a uma determinada época.

Reabilitação – Grande reparação, renovação e modificação de um edifício de forma a obedecer a critérios económicos ou funcionais equivalentes aos exigidos a um edifício novo, com a mesma finalidade. Pode envolver a execução de instalações e sistemas de serviços, acessos, iluminação natural, equipamento e acabamentos.

A Fig.2-1 sugere os conceitos de manutenção – M – e de reabilitação – R – de um edifício, de acordo com o seu desempenho no tempo.

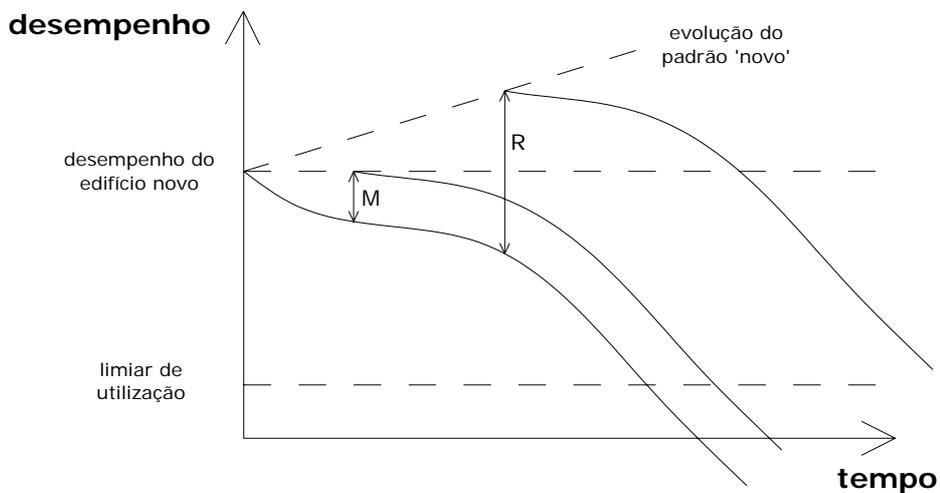


Fig.2-1 – Conceito de Manutenção e Reabilitação de um edifício, de acordo com o seu desempenho [12]

(não se aplica directamente à Acústica)

Em edifícios e construções com valor patrimonial, como é o caso dos claustros de edifícios religiosos históricos, a reabilitação deverá preservar as partes ou características que transmitem o seu valor histórico, cultural ou arquitectónico, quer se realizem, ou não, adaptações.

A reabilitação pode ser realizada, fundamentalmente, a três níveis:

- Desempenho do invólucro exterior: reabilitação de fachadas e coberturas;
- Condições de habitabilidade, conforto e segurança de utilização (abrangendo, ou não, instalações e sistemas): reabilitação térmica e energética da envolvente opaca e vãos envidraçados, reabilitação acústica, reabilitação do ponto de vista da segurança contra incêndio, reabilitação funcional;
- Comportamento estrutural: reabilitação de reforço, reabilitação sísmica.

Independentemente do tipo de actuação, existem princípios básicos que se devem cumprir, nomeadamente a reversibilidade das intervenções, tanto quanto possível, a compatibilidade entre o existente e o novo, e eficácia e a compatibilidade de soluções. Por vezes o já construído possui elevado valor patrimonial que deverá ser compreendido e, sobretudo, respeitado.

O presente trabalho e suas conclusões são baseadas e têm em vista a caracterização acústica da reabilitação de claustros que sofreram intervenções para alteração da sua utilização inicial, cujas galerias foram fechadas com vidro. As variações que se concluírem haver relativamente aos claustros ‘abertos’ e esses valores concretos obtidos poderão ser úteis no Projecto de Reabilitação Acústica, mais propriamente na escolha dos materiais adequados para a correcção a efectuar, de modo a tornar os valores do Tempo de Reverberação e do RASTI mais apropriados para a nova utilização a dar ao espaço dos claustros.

### 2.2.1. REABILITAÇÃO DE CLAUSTROS: COM QUE FINALIDADE?

Se, no passado, a utilização dos edifícios conventuais, onde se incluíam os claustros, era exclusiva para a prática da religião, hoje não se poderá afirmar o mesmo.

Já com Dom Miguel afastado de Portugal, a 28 de Maio de 1834 surge o decreto de extinção imediata das Ordens Religiosas masculinas e consequente nacionalização dos seus bens, onde muitos conventos foram encerrados e/ou adquiridos pelo Estado. Esta medida implementada pelo Ministro da Justiça, Joaquim António de Aguiar, pretendia diminuir o poder económico e social do clero. Contudo, as ordens femininas tiveram autorização para permanecer nos Conventos até à data da morte da última freira.

Mais tarde, alguns conventos foram adquiridos pelas Misericórdias, usados como seminários, hospitais ou ainda vendidos a privados, que conferiram novas utilizações a esses espaços.

Actualmente, é possível encontrar antigos conventos e mosteiros agora transformados em pousadas, museus, colégios, faculdades e onde se podem apresentar peças de teatro ou até concertos.

Com as novas utilizações, surge a necessidade de modificações no espaço nos antigos claustros, nomeadamente fechar as suas galerias com vidro, para evitar a entrada de chuva, ou até colocar cobertura no pátio central, de forma a tornar esse espaço interior.

## 2.3. INTERVENÇÕES PARA NOVAS UTILIZAÇÕES DO ESPAÇO ‘CLAUSTRO’

De seguida, apresentam-se alguns exemplos de claustros que têm uma utilização diferente da prevista inicialmente, aquando da sua construção. Apresentam-se situações onde se manteve a galeria aberta para o exterior (‘galeria aberta’) e onde se encerrou a galeria com vidro (‘galeria fechada’). Esta última situação é o objectivo deste trabalho.

### 2.3.1. GALERIA ABERTA

#### 2.3.1.1. Utilização: Apoio à restauração / lazer de uma Pousada

a) O Convento da Graça, em Tavira, é uma das Pousadas de Portugal que foi adaptada a partir de um convento do séc. XV. O Claustro, que mantém a estrutura original de planta quadrangular, serve de apoio à restauração sendo, também, local de convívio (Fig.2-2).



Fig.2-2 (A e B) – Claustro do Convento da Graça, Tavira [13]

#### 2.3.1.2. Utilização: Actividades culturais num Mosteiro

a) Nos Claustros do Mosteiro dos Jerónimos, em Lisboa, decorrem habitualmente diversas iniciativas culturais, nomeadamente a realizada em 20 de Setembro de 2007 onde foi “*recriada uma das obras que marcou indelevelmente a História da Música Ocidental (...) Esta é uma versão do Orfeo mais dramática, colorida e mais fascinante do que nunca*” [14]. De igual modo, a 2 de Março de 2007, foi apresentada a peça *Auto da Barca do Inferno* que se desenvolveu “*de forma interactiva no Claustro do Mosteiro dos Jerónimos, o qual serve de Palco onde as várias personagens representam*” [14].

#### 2.3.1.3. Utilização: Galeria de exposições de um Museu

a) O edifício do Museu Alberto Sampaio, situado no centro histórico de Guimarães, encontra-se anexo à Igreja de Nossa Senhora da Oliveira, construída no início do séc. XV. Esta conservou parte do bonito claustro de um antigo mosteiro românico, que agora pertence ao Museu. Aqui podem encontrar-se exposições apenas durante o Verão, uma vez que a galeria é aberta (Fig.2-3).



Fig.2-3 – Claustro do Museu Alberto Sampaio, Guimarães

[foto da autora]

b) O Museu de Arqueologia da Sociedade Martins Sarmento, em Guimarães, instalado num imponente edifício projectado pelo arquitecto Marques da Silva, integrou o claustro e o jardim do antigo Convento de São Domingos, do séc. XIV. Nesses espaços, assim como na escadaria do Convento, situa-se a sua Secção de Epigrafia e Escultura Antiga (Fig.2-4).

O claustro, elegante e harmonioso de arcaria gótica, sofreu a mutilação da galeria norte [15].



Fig.2-4 (A e B) - Claustro do Museu de Arqueologia, Guimarães

[fotos da autora]

### 2.3.2. GALERIA FECHADA COM VIDRO

#### 2.3.2.1. Utilização: Apoio à restauração / lazer / local de passagem de uma Pousada

a) A Pousada de São Francisco, em Beja, ocupa as instalações do antigo Convento de São Francisco, que data do séc. XIII. Integra o misticismo que envolve um convento e as necessidades de conforto e bem-estar dos nossos dias.

O claustro é um local de passagem, podendo ser utilizado como local de convívio (Fig.2-5).



Fig.2-5 – Claustro da Pousada de São Francisco, Beja [16]

b) A Pousada dos Lóios, em Évora, ocupa o antigo Mosteiro de São João Evangelista (ou dos Lóios), fundado no séc. XV. Em 1965 surge reabilitado como uma das Pousadas Históricas de Portugal. Nos claustros inferiores encontra-se o restaurante da Pousada (Fig.2-6).

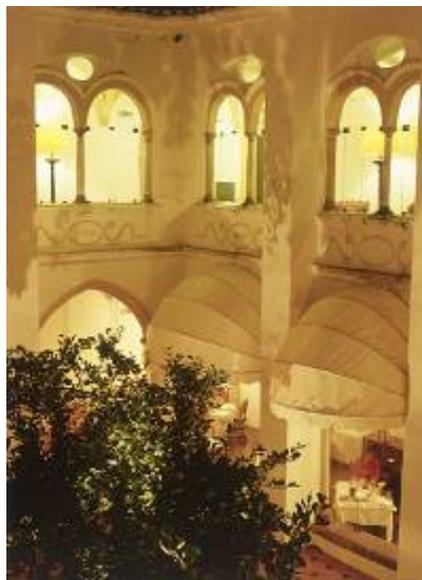


Fig.2-6 (A e B) – Claustro da Pousada dos Lóios, Évora [17]

c) A Pousada de Nossa Senhora da Assunção, em Arraiolos, situa-se num antigo convento do séc. XVI. Comprado pelo Estado em 1980, surge como Pousada de Portugal em meados da década de 90.

O edifício, no seu exterior, apresenta diversas linguagens arquitectónicas – manuelina, renascentista, barroca – e o interior encanta pelo espaço elevado, azulejos e abóbadas (Fig.2-7 B). O claustro, de dois pisos e arquitectura popular, é actualmente um local de passagem (Fig.2-7 A).



Fig.2-7 (A e B) - Claustro da Pousada de Nossa Senhora da Assunção, Arraiolos [18]

d) A Pousada de Vila Pouca da Beira, concelho de Oliveira do Hospital, localiza-se no antigo Convento do Desagravo, construído no final do séc. XVIII. Em Julho de 2000 iniciaram-se as obras de remodelação para transformação do Convento em Pousada de Portugal (Fig.2-8).



Fig.2-8 (A e B) - Claustro do Convento do Desagravo, Vila Pouca da Beira [19]

e) Na Pousada Castelo de Palmela, inaugurada em 1979, a galeria do claustro é utilizada para lazer e restauração. Nela, é possível organizar banquetes, com lugar para cerca de duzentas pessoas sentadas em mesas redondas (Fig.2-9).



Fig.2-9 (A e B) - Claustro da Pousada Castelo de Palmela, Palmela [20]

### 2.3.2.2. Utilização: Local de passagem / actividades culturais em estabelecimentos de Ensino

a) A Faculdade de Psicologia e Ciências de Educação da Universidade de Coimbra (FPCE da UC) transitou, provisoriamente, em 1985 para o Colégio de Santo Agostinho, também conhecido como Colégio Novo ou Colégio dos Órfãos. O claustro é, simplesmente, zona de passagem. (Fig.2-10).



Fig.2-10 – Claustro da FPCE da UC, Coimbra [21]

b) O antigo Colégio dos Jesuítas (séc. XVII) alberga, actualmente, os Serviços Centrais do Instituto Politécnico de Setúbal (IPS). Os claustros, a capela e o edifício foram comprados a privados pelo Estado, em 1982, para aí se instalar o IPS.

Devido à exiguidade dos espaços, o IPS avançou com obras de conservação e recuperação ao nível do piso dos claustros, nomeadamente na cave do edifício, capela, sacristia, claustros e jardins anexos. Substituíram-se os envidraçados de madeira, iluminaram-se artificialmente os espaços de forma mais concordante com a nova utilização e criaram-se zonas de exposições, aulas, reuniões, convívio e bar (Fig.2-11). Os claustros estão, agora, disponíveis para diversas iniciativas de carácter cultural e animação.

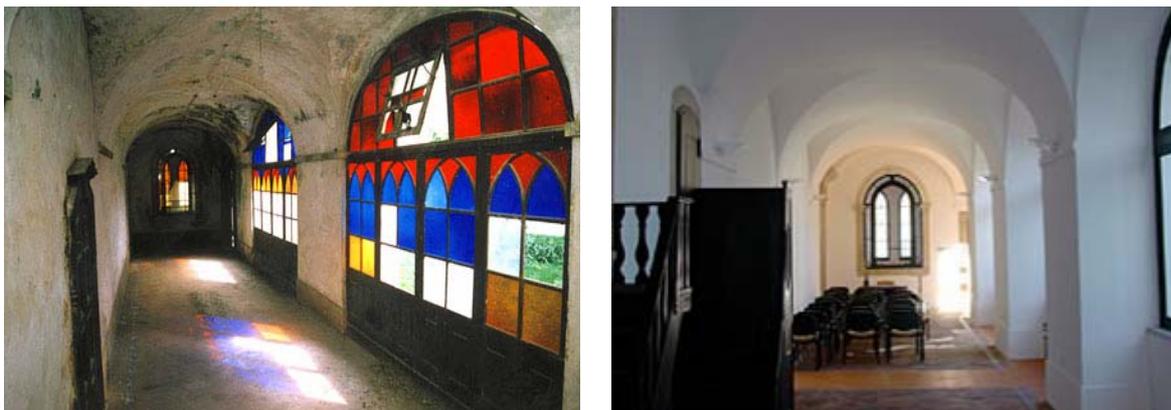


Fig.2-11 (A e B) - Claustro do IPS antes e após a intervenção, Setúbal [22]

c) A construção do Colégio da Nossa Senhora da Esperança, no Porto, iniciou-se em 1724 e começou por ser um local destinado ao ensino e recolhimento de órfãos (Fig.2-12). Com o decorrer dos anos, o estabelecimento de ensino foi-se abrindo a alunas que o escolhiam como local de ensino. Actualmente o Colégio possui vários níveis de ensino tais como Creche, Pré-escolar, Básico e Secundário. [23]



Fig.2-12 – Colégio da Nossa Senhora da Esperança, Porto [24]

### 2.3.2.3. Utilização: Galeria de exposições de um Museu

a) O Museu Nacional do Azulejo, em Lisboa, está situado no antigo Convento da Madre de Deus, fundado em 1509. O edifício possui notáveis espaços arquitectónicos e a sua colecção varre um período entre o séc. XV e início do séc. XIX.

Na Fig.2-12 pode ver-se a planta do Piso 0, cuja sala E é o claustro grande e classicista do Convento, denominado Claustro de D. João III (Fig.2-14). Existe um outro, a sala D (Fig.2-13), bastante menor e construído anteriormente, que mantém as formas elegantes do período manuelino.

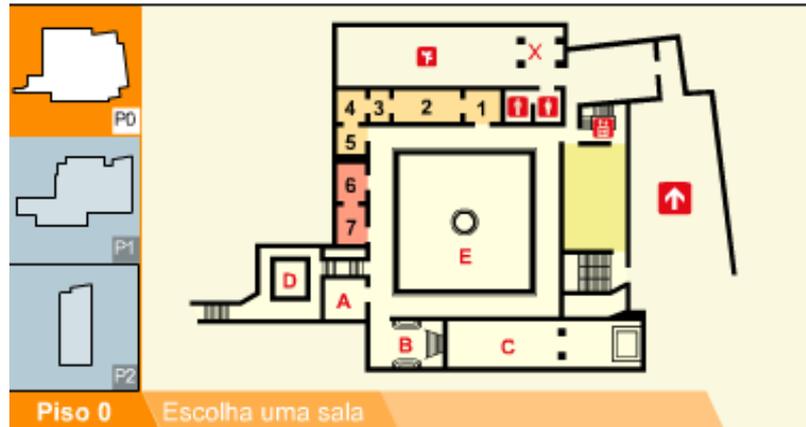


Fig.2-13 – Planta do Piso 0 do Museu Nacional do Azulejo, Lisboa [25]



Fig.2-14 – Claustro de D. João III [26]

#### 2.3.2.4. Utilização: Zona de passagem num hospital

a) O Pavilhão Norte do Hospital de São Marcos, em Braga, construído no início do séc. XVI mas já sujeito a várias remodelações e aumentos, possui um pátio central onde se desenvolve o claustro, com galeria inferior e superior (Fig.2-15). Ambas foram fechadas com vidro e são corredores de passagem.



Fig.2 -15 (A e B) - Claustro do Hospital de S. Marcos, Braga [27]

#### 2.3.2.5. Utilização: Pólo cultural

a) A Igreja e Convento de São Bento da Vitória, no Porto, é uma obra maneirista bem portuguesa e bem portuense [15]. Trata-se de um Monumento Nacional Classificado com diversas utilizações. Alberga o Arquivo Distrital, sendo um importante pólo cultural da cidade do Porto, e na sua Igreja mantém-se a prática religiosa.

Existem dois claustros, um rectangular e outro quadrangular: o primeiro, de três pisos separados por frisos, tem apenas duas alas; o segundo, iniciado em 1608 e concluído por volta de 1725, é todo em cantaria e possui dois pisos separados por cornija (Fig.2-16); Neste claustro, com pátio central fechado por cobertura de vidro, se acolheu a Orquestra Clássica do Porto até 2005, data em que a mesma se estabeleceu na Casa da Música.



Fig.2-16 – Claustro principal do Convento de São Bento da Vitória,  
no qual ensaiava a Orquestra Clássica do Porto [7]

b) O Convento do Beato foi mandado construir na segunda metade do séc. XV pelo rei D. Afonso V e ficou conhecido, até finais do séc. XVI, como Convento de São Bento de Enxobregas.

Praticamente não sofrendo danos no terramoto de 1755, o Convento quinhentista foi profanado, no ano de 1834 com a extinção das ordens religiosas e foi devastado em 1840 por um violento incêndio. Actualmente, apenas subsistem algumas estruturas desse tempo. Tendo sido utilizado como fábrica de moagem de cereais e como armazém de vinhos, nos últimos anos o espaço conventual começou a ser utilizado para a organização de eventos de índole cultural e social, nomeadamente no pátio central do claustro, de dois pisos, que actualmente se encontra fechado por uma cobertura metálica (Fig.2-17).

Embora em 2004 tenha havido novo incêndio, reabriu um ano depois, após obras de reabilitação.



Fig.2-17 – Claustro do Convento do Beato, Lisboa [28]

### 2.3.2.6. Utilização: Lar de Terceira idade

A Igreja da Caridade, em Viana do Castelo, foi mandada edificar pela nobreza local, no séc. XVI, para albergar as filhas dos nobres vianenses que não casassem (Fig.2-18). Depois de algumas obras de ampliação realizadas no início do séc. XVIII, foi entre 1897 e 1905 que se executaram as principais obras de reformulação do edifício conventual, donde resultou um grandioso conjunto arquitectónico [29]. Actualmente funciona como Lar de Terceira Idade.



Fig.2-18 (A e B) - Igreja da Caridade, Viana do Castelo

[fotos da autora]

## MÉTODO

### 3.1. PARÂMETROS DE SELECÇÃO DA AMOSTRA

Para a realização das análises necessárias a este trabalho, os claustros deverão ter algumas características específicas e uniformizadas, a saber:

- as quatro galerias unidas e fechadas superiormente;
- fechados lateralmente com vidro, havendo portanto uma separação física entre as galerias e o pátio central do claustro e sendo o acesso a este efectuado através de portas, também de vidro;
- os pavimentos e as paredes do interior das galerias revestidos;
- existirem, pelo menos, duas galerias perpendiculares sem obstáculos e sem divisórias (as medições serão feitas apenas em duas galerias perpendiculares e, como tal, pode admitir-se que estas serão iguais às duas restantes. Embora possa não ser totalmente exacto, é irrelevante para as conclusões deste estudo);
- poderá existir algum mobiliário, mas em número reduzido de peças;
- durante as medições acústicas, a zona do claustro deve estar isolada à circulação de pessoas com portas e eventuais janelas fechadas.

As medições acústicas foram realizadas apenas em  $\frac{1}{2}$  claustro, em duas galerias perpendiculares, já que se admitiu que era simétrico (Fig.3-1, sendo AB a linha de simetria).

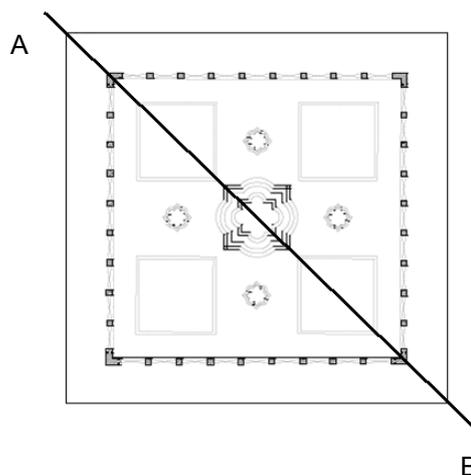


Fig.3-1 – Simetria do claustro relativamente a AB

Vários dos claustros pesquisados com galeria fechada com vidro não puderam fazer parte da amostra a testar por diversos motivos, sendo o principal deles a distância relativamente à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (limitações temporais impostas).

O claustro do Hospital de São Marcos (Fig.2-15), em Braga, não foi analisado de modo a não haver perturbação num local onde, por razão óbvia, é necessário o sossego.

A exclusão imediata tanto do claustro do Mosteiro de São Bento da Vitória (Fig.2-16) como o do Convento do Beato (Fig.2-17) foi devida à grande diferença relativamente aos seleccionados para o estudo, uma vez que apresentam um pátio central fechado e não apenas as quatro galerias fechadas com vidro.

O claustro do Colégio de Nossa Senhora da Esperança (Fig.2-12), no Porto, tendo embora um claustro fechado, não pôde fazer parte da amostra por se encontrar em obras (estão a unir as quatro galerias, condição necessária à amostra do presente trabalho).

O claustro da Igreja da Caridade, em Viana do Castelo (Fig.2-18) teve de ser eliminado da amostra por existirem escadas a unir a galeria dos claustros ao piso superior. Como este facto se verifica em duas galerias paralelas, torna-se impossível fazer medições acústicas em duas galerias perpendiculares com as condições pretendidas, dado não se poder fechar aquela abertura, por inexistência de porta.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA SELECIONADA

A amostra abrange seis claustros, de épocas construtivas diferentes, a apresentar seguidamente.

#### 3.2.1. CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA

No Quadro 3-1, referem-se os claustros da amostra estudada, sua localização e época construtiva. Seguidamente, apresenta-se uma descrição dos edifícios que incluem os claustros estudados.

Quadro 3-1 – Claustros estudados

Claustro	Código	Concelho	Época Construtiva
Biblioteca Municipal do Porto	BP	Porto	Séc. XVIII
Comando Metropolitano da PSP do Porto	PSP	Porto	Séc. XV
Sé de Braga	SB	Braga	Séc. XI
Escola Superior de Enfermagem (Universidade do Minho)	ESE	Braga	Séc. XVIII
Venerável Ordem Terceira de São Francisco	SF	Guimarães	Séc. XV
Convento de Alpendurada	CA	Marco de Canaveses	Séc. XI

### 3.2.1.1. Biblioteca Municipal do Porto (BP)

Designação: Biblioteca Pública Municipal do Porto

Categoria/Tipologia: Arquitectura civil/ Biblioteca

Localização: Porto / Porto / Santo Ildefonso

Protecção: Classificado

Imóvel de Interesse Público

Utilização inicial – Religiosa: Convento de Santo António da Cidade

Utilização actual – Cultural: Biblioteca

A Biblioteca do Porto, fundada em 1833 por D. Pedro IV e considerada municipal desde 1876, ocupou em 1842 o edifício do antigo Convento de Santo António da Cidade, edifício do séc. XVIII. Também estiveram aqui sedeadas a Escola de Belas Artes e o Museu Municipal.

Apenas resta o edifício austero do antigo Convento de Santo António da Cidade, pois a igreja foi demolida. O claustro, de dois pisos, abre-se para o pátio através de uma arcaria de volta perfeita, no 1º andar, e janelas de frontões curvos, no 2º. No centro do pátio aparece um chafariz (Fig.3-2).

Na entrada e no claustro podem ver-se azulejos oriundos de casas conventuais da região.



Fig.3-2 (A e B) - Claustro da Biblioteca Municipal do Porto

[fotos da autora]

### 3.2.1.2. Comando Metropolitano da PSP do Porto (PSP)

Designação: Comando Metropolitano da PSP do Porto/Aljube

Categoria/Tipologia: Arquitectura Religiosa/ antigo Convento

Localização: Porto / Porto / Sé

Protecção: Área de protecção da Igreja de Santa Clara

Classificado

Monumento Nacional

Utilização inicial – Religiosa: Convento de Santa Clara

Utilização actual – Policial: Comando Metropolitano da PSP do Porto

O edifício do Aljube localiza-se no Largo 1º de Dezembro, na cidade do Porto. É parte integrante do antigo Convento de Santa Clara que actualmente se encontra desanexado da igreja, coro, cartório, sacristia e outras dependências [30].

O Convento de Santa Clara foi fundado e mandado construir por D. João I, erguendo-se na encosta da Batalha, ao lado da muralha fernandina. Desde muito cedo que abrigou um grande número de religiosas, mantendo-se aberto no período liberal, durante o qual outros institutos religiosos femininos definharam.

Em meados do século XIX cai em ruína e, em 1883, alegando o estado de ruína do convento, as autoridades municipais pedem autorização do Rei para demolir uma parte do convento, com a finalidade de abrir uma rua que ligue em linha recta a Avenida da Ponte ao largo da polícia.

No mês de Abril de 1900 morre a última freira e a Fazenda Nacional toma posse do edifício e de todos os seus bens e pertenças.

Em 1999 iniciam-se obras de reabilitação, restauro e adaptação do antigo Convento de Santa Clara para a divisão da PSP, promovida pela Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais (DGEMN) e com projecto e coordenação do arquitecto Vítor Mestre.

As galerias do claustro são locais de passagem, que também dão acesso a salas (Fig.3-3).



Fig.3-3 (A e B) - Claustro do edifício do Aljube

[fotos da autora]

### 3.2.1.3 – Sé de Braga (SB)

Designação: Sé de Braga

Categoria/Tipologia: Arquitectura Religiosa / Sé, Catedral

Localização: Braga / Braga / Sé

Protecção: Classificado

Monumento Nacional

Utilização inicial – Religiosa: Sé

Utilização actual – Religiosa: Sé

A construção da Sé de Braga iniciou-se no séc. XI durante o episcopado de D. Pedro, Bispo de Braga. Desta apenas resta um absidiolo, hoje sem qualquer relação com o interior da Igreja.

Tem vindo a ser objecto de intervenção ao longo dos anos, sendo constantemente enriquecida por ordem de Bispos e do Cabido.

Um restauro, em meados do séc. XX, devolveu algum do carácter medieval ao interior da Sé, ao qual foi amputada grande parte da grandiosidade barroca dos sécs. XVII e XVIII.

As dependências exteriores à Sé, intimamente relacionadas com esta, foram executadas ao longo de séculos e mostram muito da própria história deste espaço religioso.

No séc. XIX foi concluído o actual claustro, de seca austeridade e com diversos altares na sua galeria, que veio substituir o anterior gótico, quase em ruína (Fig.3-4).

Sendo alvo de conservação no final do séc. XX, assegurado pelo IPPAR, está actualmente a desenvolver-se um projecto global para reabilitação e valorização do edifício, assim como o restauro dos patrimónios móveis e integrado.



Fig.3-4 (A e B) - Claustro da Sé de Braga

[fotos da autora]

### 3.2.1.4 – Escola Superior de Enfermagem da Universidade do Minho (ESE)

Designação: Convento dos Congregados

Categoria/Tipologia: Arquitectura Religiosa/ Conjunto

Localização: Braga / Braga / Braga (São José de São Lázaro)

Protecção: Convento, Colégio e Igreja dos Congregados

Classificado

Imóvel de Interesse Público

Utilização inicial – Religiosa: Convento dos Congregados

Utilização actual – Académica: Escola do Campus de Gualtar, da Universidade do Minho

(onde se encontram instalados a Comissão Instaladora do Laboratório Ibérico de Nanotecnologia, a Escola Superior de Enfermagem e o Departamento de Música da Universidade do Minho)

O Convento dos Congregados é um edifício barroco, projectado pela Congregação do Oratório e cujo início de construção remonta ao final do séc. XVII. No entanto, a sagração do templo ocorreu apenas em 1717. Ao longo do séc. XVIII foi ampliado e o edifício tornou-se mais grandioso.

Com a expulsão da Congregação do Oratório no fatídico ano de 1834, o edifício foi posteriormente utilizado com diversas finalidades, nomeadamente Biblioteca, Quartel-General, Repartições Públicas, etc.

Em Setembro de 2007 instalaram-se no edifício a comissão organizadora do Laboratório Ibérico de Nanotecnologia, a Escola de Enfermagem e o Departamento de Música da Universidade do Minho. O claustro é, actualmente, local de passagem (Fig.3-5).



Fig.3-5 (A e B) – Claustro da ESE da Universidade do Minho

[fotos da autora]

### 3.2.1.5 – Venerável Ordem Terceira de São Francisco (SF)

Designação: Venerável Ordem Terceira de São Francisco

Categoria/Tipologia: Arquitectura Religiosa/ antigo Convento

Localização: Braga / Guimarães / Guimarães (São Sebastião)

Protecção: Igreja de São Francisco

Classificado

Imóvel de Interesse Público

Utilização inicial – Religiosa: Convento de São Francisco

Utilização actual – Social: Lar de Terceira Idade

A construção do actual Convento de São Francisco foi autorizada em 1400 por D. João I, mas demorou cerca de um século a ser totalmente finalizada e veio substituir o anterior, demolido no reinado de D. Dinis, por se encontrar demasiado próximo das muralhas.

O edifício gótico ainda possui, exteriormente, características de beleza medieval, como por exemplo o portal principal, muito pouco decorado. Já o interior foi transfigurado, tornando-se barroco e de nave única, em substituição das três naves iniciais.

O convento sofreu algumas alterações, sendo que a primeira grande obra ocorreu em finais do séc. XVI com a construção do clássico claustro de dois andares bastante harmonioso e equilibrado (claustro estudado no presente trabalho). Actualmente, este é utilizado como zona de estar, com alguns bancos, sofás e uma mesa, onde os idosos podem conviver (Fig.3-6) e observar o bonito pátio central (Fig.3-7). Existe também um outro claustro, que funciona basicamente como local de passagem (Fig.3-8).

No século XX, as obras de restauro efectuadas pela DGEMN privilegiaram a consolidação das estruturas, não alterando significativamente o aspecto geral do edifício [31].



Fig.3-6 (A e B) - Claustro estudado da Venerável Ordem Terceira de São Francisco

[fotos da autora]



Fig.3-7 – Pátio quadrado com chafariz gótico, do Claustro estudado

[foto da autora]



Fig.3-8 (A e B) – *Claustro pequeno* da Venerável Ordem Terceira de São Francisco

[fotos da autora]

Embora também se tenham realizado medições acústicas no *Claustro pequeno* da Ordem de São Francisco (Fig.3-8), observou-se, posteriormente, que a largura das galerias deste eram bastante inferiores à dos restantes claustros da amostra. No entanto, a principal razão de exclusão deste claustro da amostra final foi a existência de absorção localizada na proximidade da fonte sonora (sofás e pessoas que, não se encontrando nas galerias perpendiculares medidas, estavam situados na galeria contígua, absorvendo algum do ruído emitido pela fonte sonora, pelo que os resultados obtidos não podem ser considerados fiáveis).

### 3.2.1.6 – Convento de Alpendurada (CA)

Designação: Convento de Alpendurada

Categoria/Tipologia: Arquitectura Religiosa /Igreja

Localização: Porto / Marco de Canaveses / Alpendurada

Protecção: Igreja: em Vias de Classificação como Imóvel de Interesse Público

Convento: sem protecção

Utilização inicial – Religiosa: Convento de Alpendurada

Utilização actual – Hoteleira: Hotel Convento de Alpendurada

O Mosteiro beneditino de Alpendurada foi fundado em meados do séc. XI, ainda antes da formação da nacionalidade portuguesa. Desde a sua fundação até ao ano de 1834, passando por um período de empobrecimento no séc. XVI, foi habitado por monges de São Bento e, já no séc. XIX, habitado pela Companhia de Jesus.

O Convento, muito extenso, tem dois andares com grandes corredores, largas salas e numerosos e amplos quartos. A Igreja fica do seu lado nascente e, actualmente, apenas esta é pública, uma vez que tudo o resto é propriedade privada.

O Convento foi convertido num requintado hotel, onde se podem realizar diversos eventos, designadamente programas de passagem de ano, casamentos, etc. O restaurante encontra-se em salas anexas às galerias do claustro (Fig.3-9).



Fig.3-9 – Claustro do Convento de Alpendurada, Alpendurada [32]

## 3.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITECTÓNICA DA AMOSTRA

Apresentam-se, nos Quadros 3-2 a 3-4, algumas características arquitectónicas e geométricas dos seis claustros estudados (cinco medidos neste trabalho e um anteriormente medido [7]):

Quadro 3-2 – Características arquitectónicas dos 6 claustros estudados

Código do claustro	Pavimento	Paredes	Abóbadas/ Tecto	Zona Central	Ao centro	Nº de pisos acima do claustro
BP	Pedra	Pedra / Azulejo	Pedra	Jardim	Chafariz	2
PSP	Pedra	Pedra	Gesso cartonado	Pátio	Alguns blocos de pedra	4
SB	Pedra	Pedra /Reboco	Pedra /Reboco	Jardim	Chafariz	0
ESE	Pedra	Azulejo (até 1,5 m) /Reboco	Madeira	Jardim	Chafariz	1*
SF	Pedra	Pedra	Pedra /Reboco	Jardim	Chafariz	1
CA	Pedra	Azulejo/Pedra	Madeira	Jardim	Chafariz	1

\* A fachada possui mais um piso, ou seja, 2.

Quadro 3-3 – Características geométricas dos 5 claustros medidos neste trabalho

Código do claustro	Forma geométrica	Comprimento (m) Galeria 1 Galeria 2	Vidros de fecho (m)			Largura galerias (m)		Alt. máx (m)	Alt. mín (m)
			Largura	Alt. máx	Alt. mín	Sem pilar	Com pilar		
BP	Quadrada	29,1 29,1	2,0	4,5	3,4	3,2	3,9	5,3	3,4
PSP	Quadrada	18,8 18,8	Vidro contínuo			3,3	-	3,5	3,5
SB	Quadrada	20,6 20,6	2,5	5,4	4,4	3,5	3,8	6,3	4,4
ESE	Quadrada	24,0 24,0	2,8	4,6	3,3	3,3	3,7	4,9	4,9
SF	Quadrada	27,2 27,2	1,6	3,1	3,1	Gal.1 e 2 3,6 / 4,0	Gal.1 e 2 - / -	4,3	4,3

Quadro 3-4 – Resumo das características geométricas dos 6 claustros estudados

Código do claustro	Forma geométrica	Comprimento (m) Galeria 1 Galeria 2	Largura média Galerias (m)	Altura Galerias (m) máx. mín.	Área Total Claustro (m <sup>2</sup> )	Área Vidros fecho* (m <sup>2</sup> )	Área Pavimento* (m <sup>2</sup> )	Volume * (m <sup>3</sup> )
BP	Quadrada	29,1 29,1	3,2	5,3 3,4	847	122	185	915
PSP	Quadrada	18,8 18,8	3,3	3,5 3,5	353	59	103	366
SB	Quadrada	20,6 20,6	3,5	6,3 4,4	423	75	124	950
ESE	Quadrada	24,0 24,0	3,3	5,0 4,9	574	120	146	659
SF	Quadrada	27,2 27,2	3,8	4,3 4,3	737	95	177	1327
CA	Rectangular	28,1 25,4	3,5	4,3 4,3	714	111	163	700

\* refere-se às duas galerias perpendiculares onde se fez a medição;

### 3.3. METODOLOGIA

#### 3.3.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS

Com o intuito de caracterizar acusticamente as galerias dos claustros, mediram-se os dois parâmetros seguintes:

- Tempo de reverberação;
- RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*.

Os parâmetros objectivos estudados são obtidos por equipamentos através de relações energéticas ou temporais do sinal recolhido.

Tempo de reverberação (TR) é o intervalo temporal, em segundos, que um som demora a extinguir-se num espaço, após múltiplas reflexões. Teoricamente é, por definição, o tempo que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB desde a cessação da emissão da fonte sonora. No entanto, é usual calcular com base em decaimentos de 20 dB ou 30 dB (TR20 ou TR30) e extrapolar para os 60 dB (TR60), isto devido ao ruído de fundo algo elevado que obrigaria a fonte sonora a emitir som muito intenso, que se deve evitar.

O TR varia, em geral e aproximadamente, na ordem inversa da Inteligibilidade da palavra e está intimamente ligado à geometria e à absorção sonora do espaço em questão, como se verá adiante,

dependendo, também, da frequência do som. Os valores ideais para o TR dependem da utilização a dar ao espaço em questão.

No caso concreto das galerias de um claustro e para bandas de frequência entre os 500 Hz e os 2 kHz, TR deverá situar-se entre 0,7 a 1,0 s, se forem parte de um museu, pois não é conveniente que o espaço seja reverberante, o mesmo se passando para espaços destinados a conferências e leitura, onde TR deverá ser rondar os 1,0 – 1,2 s. Para a realização de pequenas peças de teatro, TR deverá ser um pouco superior aos valores referidos anteriormente, no entanto idealmente não deverá ultrapassar os 1,6 s. Para actuações musicais, e dependendo do estilo musical, TR deverá rondar o 1,0 s para música popular, entre 1,4 e 2,2 s para música sinfónica, chegando ao valor ideal de 3,0 – 3,5 s, para música de órgão ou coros gregorianos (ver Quadro 3-5).

Quadro 3-5 – TR ideais, para as bandas de frequência entre 500 Hz e 2 kHz,  
de acordo com o tipo de utilização prevista para o espaço [33]

Tipo de utilização do espaço	TR ideais (s) - (entre 500 Hz a 2 kHz)
Museu	[0,7 – 1,0]
Conferências e leitura	[1,0 – 1,2]
Pequenas peças de teatro	[1,2 – 1,6]
Actuações musicais	
Música popular	[1,0 – 1,4]
Música sinfónica	[1,4 – 2,2]
Órgão / Coros gregorianos	[3,0 – 3,5]

Para a medição do TR, excita-se o recinto com um ruído rosa (ou outro adequado), emitido pela fonte sonora. Devem medir-se vários pontos no recinto, cada um dos quais mais do que uma vez, para garantir fiabilidade.

O sonómetro, que é colocado em cada um dos pontos escolhidos previamente, regista o nível de pressão sonora e calcula em seguida o tempo de decaimento correspondente a 20 dB ou 30 dB, fazendo-se a extrapolação para o valor de 60 dB.

RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) é o processo rápido e prático para medir o STI (*Speech Transmission Index*), que avalia indirectamente a Inteligibilidade da palavra. Devem medir-se vários pontos, cada um dos quais mais do que uma vez, para garantir fiabilidade (cf. norma CEI 268-16 (CEI, 1988)).

Para a medição é necessário um aparelho emissor e outro receptor (Fig.3-13 e 3-14). O primeiro emite um som do tipo rosa, modulado de forma a simular a voz humana (nos 500 Hz e 1 kHz), que é captado num microfone omnidireccional ligado ao receptor. O resultado é apresentado sob a forma de um valor numérico entre 0 e 1. Pode ver-se no Quadro 3-6 a correspondência entre os valores obtidos para o RASTI e a correspondente Inteligibilidade da palavra, caracterizada subjectivamente (de *má* a *excelente*).

Quadro 3-6 – Correspondência entre o parâmetro RASTI e a Inteligibilidade da palavra

RASTI	Inteligibilidade da palavra
[0 - 0,30[	Má
[0,30 - 0,45[	Medíocre
[0,45 - 0,60[	Suficiente
[0,60 - 0,75[	Bom
[0,75 - 1,00]	Excelente

A Inteligibilidade da palavra pretendida depende da utilização a dar aos espaços, pelo que, em certos casos, o valor de RASTI não é tão importante como o Tempo de Reverberação. Por exemplo, num restaurante e por motivos de privacidade, não é desejável um valor de RASTI elevado, ao contrário do que sucede numa sala de conferências, em que é muito importante a boa percepção da palavra.

### 3.3.2. MÉTODO

As medições acústicas nos claustros ocorreram entre 8 de Novembro e 15 de Dezembro de 2007. Para tal, eram fechadas todas as portas de forma a isolar as galerias a medir dos restantes espaços. A circulação de pessoas foi impedida aquando das medições. Para medir o TR utilizou-se uma fonte sonora (da marca Brüel & Kjær mod. 4224) (Fig.3-10), como emissora de ruído, e um sonómetro (da marca Brüel & Kjær mod. 2260 Investigator, com módulo estatístico, Brüel & Kjær mod. BZ7204) (Fig.3-11) como receptor. Cada medição foi feita com uma altura do microfone (de 13 mm da marca Brüel & Kjær mod. 4189, calibrado previamente com um calibrador de microfone Brüel & Kjær mod. 4231) de aproximadamente 1,30 m, colocado num tripé portátil Brüel & Kjær mod. UA0049.



Fig.3-10 – Fonte sonora



Fig.3-11 (A e B) – Posicionamentos do sonómetro num mesmo ponto

A fonte sonora emitiu um ruído com características aproximadas de ruído rosa, durante 8 segundos. Após essa emissão, o sonómetro registou o nível de pressão sonora, no ponto a medir, e calculou o seu decaimento correspondente a 30 dB (TR30), nas bandas de frequência entre os 63 Hz e os 8 kHz, por bandas de 1/1 oitava. Para o presente trabalho apenas foram usadas as bandas de 125 Hz a 4 kHz.

A fonte sonora foi colocada a 45° relativamente ao desenvolvimento da galeria, apontando para o pátio central. As medições efectuaram-se em quatro posições (Fig.3-12), cada uma das quais medida duas vezes, com o sonómetro posicionado de maneira a formar um ângulo de 15° com o eixo da galeria (Fig.3-11).

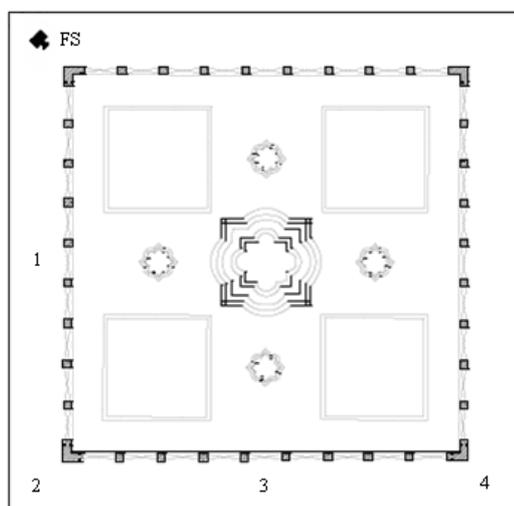


Fig.3-12 – Distribuição dos pontos de medição do TR no claustro (1 a 4) e fonte sonora (FS)

Os valores de TR obtidos nas medições correspondem à extrapolação do valor obtido para um decaimento de 60 dB. Deste modo, o valor final corresponde, para cada ponto, à média aritmética dos três valores obtidos de TR30.

Para medir o RASTI, utilizou-se um equipamento da marca Brüel & Kjær mod. 3361, constituído por uma fonte sonora emissora mod. 4225 – unidade fixa – e um receptor mod. 4419 – unidade móvel – (Figs.3-13 e 3-14).



Fig.3-13 (A e B) – Unidade emissora do RASTI



Fig.3-14 (A e B) – Unidade receptora do RASTI, com microfone omnidireccional

A fonte sonora emitiu um ruído modulado em duas bandas de oitava, 500 Hz e 2 kHz pela unidade móvel, que executou uma medição simples (*single*) de 8 segundos. Os níveis de pressão sonora de referência ‘Ref.’ podem ser de 59 dB e 50 dB nas bandas de 500 Hz e 1 kHz, respectivamente, mas devido à dimensão dos espaços usou-se o modo ‘Ref.+10 dB’, que indica 69 dB e 60 dB nas referidas frequências.

Colocou-se a fonte sonora (FS) num tripé, direccionando o ruído para o eixo longitudinal da galeria do claustro, com uma altura semelhante à da cabeça de um orador. Mediram-se quatro pontos, cada um dos quais três vezes, calculando-se de seguida a média aritmética para cada um (Fig.3-15). Cada medição foi feita com uma altura do microfone (de 13 mm da marca Brüel & Kjær mod. 4189) de aproximadamente 1,30m.

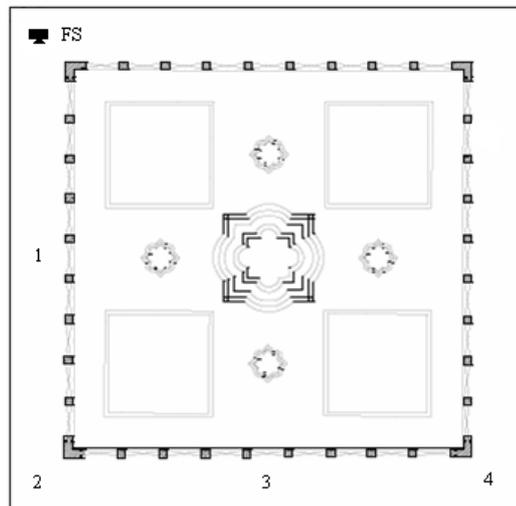


Fig.3-15 – Distribuição dos pontos de medição do RASTI no claustro (1 a 4) e fonte sonora (FS)

Os valores do parâmetro TR foram automaticamente guardados no sonómetro, aquando das medições enquanto os do RASTI foram registados manualmente. Posteriormente, os dados foram tratados no *Microsoft Excel*. Para obtenção de modelos gerais lineares foi usado o programa estatístico *SYSTAT*, adoptando o método *Stepwise*.

No local, mediram-se todos os parâmetros geométricos necessários, assim como se registaram os materiais que constituem os espaços em estudo, a fim de calcular a absorção sonora das duas galerias perpendiculares onde foram efectuadas as medições.

No Anexo B podem consultar-se os resultados obtidos nas medições acústicas realizadas em cada claustro.

Para o cálculo da absorção sonora nas duas galerias perpendiculares foi usada a Fórmula 3.1.:

$$A = \sum (\alpha_i \times S_i) + m \times V \quad (3.1.)$$

Em que,

$A$  – absorção sonora equivalente ( $m^2$ );

$\alpha_i$  - coeficiente de absorção sonora do material;

$S_i$  - superfície real do material ( $m^2$ );

$m$  – taxa de atenuação sonora do ar ( $m^{-1}$ );

$V$  – volume do espaço em análise ( $m^3$ ).

A cada material da envolvente corresponde um  $\alpha$ , coeficiente de absorção sonora médio. Nos cálculos, foram usados três valores de  $\alpha$ , correspondentes às médias para as bandas de frequência de 125 e 250 Hz, 500 Hz e 1 kHz e 2 kHz e 4 kHz. Os coeficientes de absorção sonora considerados para cada material, neste estudo, apresentam-se no Quadro 3-7.

Quadro 3-7 – Coeficientes de absorção sonora,  $\alpha$ ,  
para os diferentes materiais encontrados [33]

Material	$\alpha$		
	125 - 250 Hz	500 – 1k Hz	2k – 4k Hz
pedra	0,02	0,02	0,02
reboco			
azulejo			
vidro	0,13	0,12	0,14
madeira	0,15	0,12	0,07
Gesso cartonado	0,25	0,16	0,14

Em alguns claustros existem capelas anexas, cuja entrada se faz pelas galerias daqueles. Para estes espaços, foram considerados os coeficientes de absorção sonora do Quadro 3-8.

Quadro 3-8 – Coeficientes de absorção sonora,  $\alpha$ ,  
em função da profundidade da capela [33]

Profundidade da capela	$\alpha$		
	125 – 250 Hz	500 – 1k Hz	2k – 4k Hz
< 2 × largura da entrada	0,2	0,3	0,4
< 3 × largura da entrada	0,5	0,6	0,7
≥ 2 × largura da entrada			
≥ 2 × largura da entrada + retábulo em talha			
≥ 3 × largura da entrada	0,9	1,0	1,0

Para pequenas aberturas com profundidade até 1 m, foram considerados os valores de  $\alpha$  correspondentes aos materiais em questão. As aberturas com mais de 1 m foram tratadas como capelas.

Para a taxa de atenuação sonora do ar ( $m$ ) foi considerado o valor de zero para a média das frequências de 125 250 Hz, 0,0015 para a média das frequências de 500 1k Hz e 0,016 para a média das frequências de 2 e 4 kHz. [33]. Foi admitida uma humidade relativa do ar de 60 %, aproximadamente.



## 4

## ANÁLISE DE RESULTADOS

## 4.1. VALORES OBTIDOS

Seguidamente vão apresentar-se e caracterizar-se os valores obtidos para os parâmetros acústicos medidos TR e RASTI comparando-os entre si, quer dentro de cada claustro (análise intra-claustros), quer entre os sete claustros (análise inter-claustros). Vai usar-se a análise estatística para determinar o relacionamento entre os vários parâmetros.

Nos Quadros 4-1 e 4-2, são indicados os valores médios obtidos nas medições em cada um dos claustros para os parâmetros Tempo de Reverberação e RASTI.

Tempo de Reverberação – são apresentados os valores médios das medições em cada ponto, para um tempo de decaimento de 30 dB (TR30), para as bandas de frequência (1/1 oitava) de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz. A fonte sonora foi posicionada de acordo com a figura 3-12 e utilizaram-se os quatro pontos aí referidos, sendo feitas duas medições por ponto.

Quadro 4-1 – Valores médios obtidos, em cada claustro, para o parâmetro TR, para as bandas de frequência dos 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz (assinalam-se os valores mais (+) e menos (-) elevados)

Código do Claustro	Tempo de Reverberação (s)					
	TR125	TR250	TR500	TR1k	TR2k	TR4k
BP	4,36 (+)	5,34 (+)	5,11 (+)	4,72 (+)	3,49 (+)	2,56
PSP	2,72	2,30	2,57	2,86	2,44	1,83
SB	4,09	4,54	4,63	4,38	3,38	2,57 (+)
ESE	2,64	1,86	2,15	2,72	2,67	2,22
SF	3,26	3,30	3,36	3,22	2,73	2,29
CA	1,74 (-)	1,66 (-)	2,07 (-)	2,34 (-)	2,19 (-)	1,64 (-)

RASTI – são apresentados os valores médios das medições em cada ponto com a fonte sonora posicionada de acordo com a Figura 3-15. Utilizaram-se os quatro pontos aí referidos, tendo sido feitas três medições em cada ponto.

Quadro 4-2 – Valores médios obtidos para o parâmetro RASTI

(assinalam-se os valores mais (+) e menos (-) elevados)

Código do Claustro	RASTI
BP	0,41
PSP	0,50 (+)
SB	0,40 (-)
ESE	0,47
SF	0,42
CA	0,47

## 4.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS: ANÁLISE INTRA-CLAUSTROS

### 4.2.1. VARIABILIDADE EM CADA CLAUSTRO

Foi analisado o desvio padrão como indicador de dispersão dos valores dentro do mesmo claustro, para o Tempo de Reverberação e para o RASTI (Quadro 4-3). Quanto menor o desvio padrão, mais homogêneo é o campo sonoro.

Quadro 4-3 – Desvio padrão para TR e RASTI (assinalam-se os valores mais (+) e menos (-) elevados)

Código do Claustro	Desvio padrão						
	Tempo de Reverberação (s)						RASTI
	TR125	T250	T500	TR1k	TR2k	TR4k	
BP	0,31	0,37 (+)	0,19	0,22	0,26	0,23	0,08 (-)
PSP	0,21	0,15	0,07 (-)	0,06 (-)	0,05 (-)	0,07 (-)	0,08 (-)
SB	0,21	0,06 (-)	0,08	0,10	0,06	0,09	0,11 (+)
ESE	0,36	0,23	0,12	0,08	0,05	0,11	0,09
SF	0,17 (-)	0,13	0,21	0,37 (+)	0,38 (+)	0,43 (+)	0,09
CA	0,48 (+)	0,18	0,28 (+)	0,31	0,31	0,17	0,09

#### - TR 125

Neste parâmetro, o valor do desvio padrão mais alto verifica-se no claustro do Convento de Alpendurada e o valor mais baixo verifica-se no claustro do Convento de São Francisco.

#### - TR250

Neste parâmetro, o valor do desvio padrão mais alto verifica-se no claustro da Biblioteca Municipal do Porto e o valor mais baixo verifica-se no claustro da Sé de Braga.

- TR500

Neste parâmetro, o valor do desvio padrão mais alto verifica-se no claustro do Convento de Alpendurada e o valor mais baixo verifica-se no claustro do Comando da PSP do Porto.

- TR1000

Neste parâmetro, o valor do desvio padrão mais elevado verifica-se no claustro do Convento de São Francisco e o valor mais baixo verifica-se no claustro do Comando da PSP do Porto.

- TR2000

Neste parâmetro, o valor do desvio padrão mais elevado verifica-se no claustro do Convento de São Francisco e o valor mais baixo verifica-se no claustro do Comando da PSP do Porto.

- TR4000

Neste parâmetro, o valor do desvio padrão mais elevado verifica-se no claustro do Convento de São Francisco e o valor mais baixo verifica-se no claustro do Comando da PSP do Porto.

A prevalência do maior desvio padrão, sobretudo nas altas frequências, verifica-se no claustro do Convento de São Francisco provavelmente porque alguns pontos de medição estavam próximos de aberturas de capelas grandes, que produzem um efeito de espaço acoplado, aumentando a reverberação, daí a maior variação dos TR. As frequências mais baixas decrescem mais lentamente que as mais altas com a distância à fonte, daí haver maior variação nas altas frequências logo maior desvio padrão.

Os valores mais baixos de desvio padrão verificam-se no claustro do Comando da PSP do Porto, que é dos claustros medidos, o mais pequeno, possuindo tratamento acústico (tecto falso). Só o facto de ser um claustro pequeno, contribui para uma maior homogeneidade do campo sonoro, pois as distâncias entre os pontos medidos são menores que as verificadas noutros claustros.

- RASTI

Neste parâmetro, o valor do desvio padrão mais elevado verifica-se no claustro da Sé de Braga e o valor mais baixo verifica-se nos claustros da Biblioteca Municipal do Porto e do Comando da PSP do Porto. Todos os claustros estudados apresentam, para este parâmetro, um desvio padrão entre 0,08 e 0,11.

A existência de capelas no claustro da Sé de Braga, com desvio padrão mais elevado, parece ser a razão para este facto, uma vez que esses espaços acoplados provocam um aumento de reverberação nos pontos medidos na sua proximidade, havendo um decréscimo significativo no valor do nível sonoro nos pontos mais afastados da fonte sonora, o que diminui a homogeneidade do parâmetro RASTI nos vários pontos medidos, aumentando o seu desvio padrão (este claustro é o que apresenta valor mais baixo para o parâmetro RASTI). Os claustros do Comando da PSP do Porto e da Biblioteca Municipal do Porto apresentam um menor desvio padrão para o RASTI. No primeiro caso, o tecto falso permite um aumento da inteligibilidade da palavra e torna o campo sonoro mais homogéneo, diminuindo as variações no valor do RASTI, de ponto para ponto, também contribuindo para tal a ausência de capelas nestes dois claustros, facilitando a propagação do som.

### 4.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS: ANÁLISE INTER-CLAUSTROS

A análise inter-claustros permite caracterizar e diferenciar os valores médios medidos em cada claustro e caracterizar a sua variabilidade em relação ao posicionamento de uma amostra total.

#### 4.3.1. VARIABILIDADE ENTRE CLAUSTROS: ANÁLISE ESTATÍSTICA GLOBAL

Nas medições efectuadas em cada claustro foram registados os resultados dos parâmetros acústicos em estudo. Apresentam-se, em seguida, alguns parâmetros estatísticos referentes aos TR e RASTI médios, para os seis claustros estudados (Quadros 4-4 e 4-5).

Quadro 4-4 – Dados estatísticos referentes aos TR médios, para cada banda de frequência, para os 6 claustros em estudo

	Tempo de Reverberação (s)					
	TR125	TR250	TR500	TR1k	TR2k	TR4k
Valor mínimo	1,74	1,66	2,07	2,34	2,19	1,64
Mediana	2,99	2,80	2,96	3,04	2,70	2,25
Média	3,14	3,17	3,32	3,37	2,82	2,18
Valor máximo	4,36	5,34	5,11	4,72	3,49	2,57
Erro padrão	0,98	1,51	1,30	0,96	0,52	0,38

Quadro 4-5 – Dados estatísticos referentes ao RASTI médio, para os 6 claustros em estudo

	RASTI
Valor mínimo	0,40
Mediana	0,44
Média	0,44
Valor máximo	0,50
Erro padrão	0,04

Da análise efectuada conclui-se que a Inteligibilidade da palavra é razoavelmente conseguida em três dos seis claustros medidos, que possuem valores de RASTI de 0,47 e 0,50, o que corresponde a uma inteligibilidade suficiente. No entanto, nos restantes três claustros – Sé de Braga, Biblioteca Municipal do Porto e Claustro do Convento de São Francisco, os valores obtidos para o RASTI são de 0,40, 0,41 e 0,42 respectivamente, o que denota uma inteligibilidade medíocre. Poderá ser explicado pela dimensão dos claustros da Biblioteca do Porto e do Claustro do Convento de São Francisco, que sendo dos claustros medidos os de maiores dimensões, acarretam uma maior variação e diminuição do valor do RASTI com a distância à fonte e, no caso da Sé de Braga, a altura elevada das galerias assim como a existência de capelas, poderá igualmente influenciar a elevada variação do RASTI (o claustro da Sé

de Braga é um dos que apresentam maior volume, o que vai originar maior reverberação e conseqüente redução do valor de RASTI).

As médias dos TR para as frequências dos 500 Hz aos 2 kHz estudadas situam-se entre 2,8 e 3,4 segundos, o que parece ser um valor algo exagerado para a generalidade das novas utilizações a dar às galerias dos claustros, sobretudo quando a inteligibilidade da palavra é fundamental, o que acontece na maior parte dos casos. Assim, convirá diminuir o valor de TR, o que conseqüentemente irá aumentar o valor de RASTI. No entanto, se a utilização a dar ao espaço fosse essencialmente para cânticos, estes valores de TR seriam muito favoráveis.

#### 4.3.2. CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS

Neste ponto foram analisadas diversas correlações, baseadas em modelos simples, entre os valores médios dos parâmetros acústicos medidos, nos seis claustros em estudo.

No Quadro 4-7, apresentam-se as melhores correlações obtidas entre os parâmetros TR e RASTI, usando os valores médios para cada claustro. O  $R^2$  pode ser entendido como a variabilidade dos parâmetros que é explicada pela expressão matemática em causa.

Foram utilizados modelos simples, nomeadamente funções lineares ( $y = ax + b$ ), funções polinomiais do segundo grau ( $y = ax^2 + bx + c$ ), funções exponenciais ( $y = ae^{bx}$ ), funções potência ( $y = ax^b$ ) e funções logarítmicas ( $y = a \ln x + b$ ).

Uma vez que em trabalhos anteriores ([3], [4], [6] e [7]) se encontraram melhores correlações para as bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz, também aqui se inclui o parâmetro TR 500 1k que é a média aritmética desses dois valores, consideradas as bandas de frequência mais representativas.

No Anexo C podem observar-se os gráficos de todos os modelos de regressão simples entre os parâmetros acústicos TR e RASTI, presentes no Quadro 4-7. Estas fórmulas são, fundamentalmente, válidas no domínio dos valores de TR e RASTI dos claustros em estudo, que se apresenta em seguida no Quadro 4-6.

Quadro 4-6 – Domínio, preferencial, de aplicação dos modelos simples de relação entre parâmetros acústicos

Parâmetros acústicos		
Tempo de Reverberação (s)	TR125	[1,74 – 4,36]
	TR250	[1,66 – 5,34]
	TR500	[2,07 – 5,11]
	TR1k	[2,34 – 4,72]
	TR2k	[2,19 – 3,49]
	TR4k	[1,64 – 2,57]
RASTI		[0,40 – 0,50]

Quadro 4-7 – Melhores modelos de regressão simples entre parâmetros acústicos

Modelo	R <sup>2</sup>
$RASTI = -0,0116(TR125)^2 + 0,0378(TR125) + 0,4484$	0,71
$RASTI = 0,0051(TR250)^2 - 0,0588(TR250) + 0,5695$	0,77
$RASTI = 0,0067(TR500)^2 - 0,0757(TR500) + 0,6113$	0,77
$RASTI = 0,6191(TR1k)^{-0,2845}$	0,71
$RASTI = -0,0671(TR2k) + 0,6327$	0,70
$RASTI = 0,6863(TR2k)^{-0,4303}$	0,70
$RASTI = -0,1397(TR4k)^2 + 0,5001(TR4k) + 0,0348$	0,81
$RASTI = 0,0087(TR500\ 1k)^2 - 0,0935(TR500\ 1k) + 0,6504$	0,75
$RASTI = 0,5889(TR500\ 1k)^{-0,2468}$	0,75
$TR125 = 2,9152 \ln(TR500\ 1k) - 0,2503$	0,96
$TR125 = -0,237(TR500\ 1k)^2 + 2,5374(TR500\ 1k) - 2,4496$	0,96
$TR250 = 1,333(TR500\ 1k) - 1,2909$	0,99
$TR250 = -0,049(TR500\ 1k)^2 + 1,6833(TR500\ 1k) - 1,863$	0,99
$TR2k = 0,442(TR500\ 1k) + 1,3388$	0,92
$TR2k = 0,0132(TR500\ 1k)^2 + 0,3472(TR500\ 1k) + 1,4936$	0,92
$TR4k = -0,0972(TR500\ 1k)^2 + 0,9865(TR500\ 1k) + 0,0748$	0,77

Seguidamente, apresentam-se os dois gráficos (Figs.4-1 e 4-2) onde se obtiveram as melhores correlações simples.

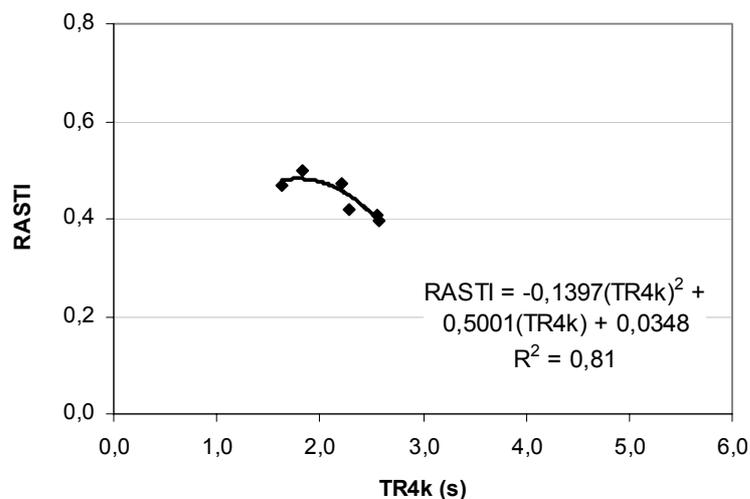


Fig.4-1 – Melhor correlação simples obtida entre os parâmetros acústicos TR e RASTI (R<sup>2</sup> = 0,81)

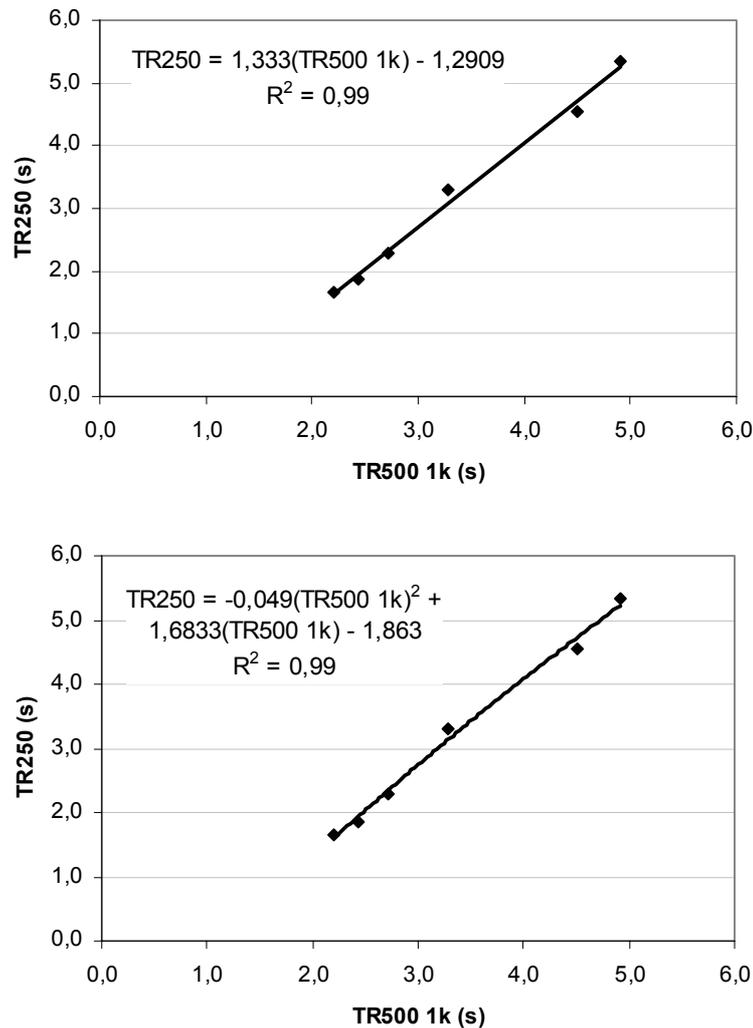


Fig.4-2 (A e B) – Melhor correlação simples obtida entre bandas do parâmetro acústico TR ( $R^2 = 0,99$ )

Da análise efectuada e para a amostra medida, observou-se que as correlações mais baixas entre os valores de RASTI e TR se verificam para as frequências de 125 Hz, 1 kHz e 2 kHz (com  $R^2$  de 0,70 e 0,71) e a mais razoável para a frequência de 4 kHz (com  $R^2$  de 0,81). Para a média das frequências de 500 Hz e 1 kHz (TR500 1k) conseguiu-se um valor de  $R^2$  de 0,75. Restringindo-se o RASTI aos 500 Hz e 2 kHz era de prever que este último apresentasse uma melhor correlação, no mínimo com um valor de  $R^2$  igual ao obtido para a frequência dos 500 Hz ( $R^2 = 0,77$ ). Ainda assim, pode considerar-se que a variabilidade dos valores médios de RASTI podem ser explicados em grande parte pelos resultados de TR, nomeadamente em 81% pelo valor de TR4k. Curiosamente, esta é a melhor correlação obtida entre os valores de RASTI e os vários valores de TR quando, na realidade, esta devia ser conseguida para as frequências de 500 Hz e/ou 2 kHz pela razão explicada anteriormente. No entanto, a reduzida dimensão da amostra não permite tirar conclusões realmente decisivas.

Com a média dos valores de TR500 e TR1k (TR500 1k) é possível obter com elevada fiabilidade – 92% a 99% – os valores de TR para as frequências de 125, 250 e 2k Hz. A correlação mais baixa foi obtida para os 4 kHz, com  $R^2$  igual a 77%, o que ainda assim garante um grau de confiança aceitável.

Dos trabalhos em igrejas, em salas de audiências de tribunais e em claustros ‘abertos’ anteriormente referidos, foi possível obter relações entre TR500 1k e RASTI, que são apresentadas no Quadro 4-8, juntamente com o valor obtido no presente estudo.

Quadro 4-8 – Valores de  $R^2$  para a relação entre TR500 1k e RASTI obtidos em estudos de igrejas, salas de audiência de tribunais, claustros ‘abertos’ e ‘fechados’

Parâmetros	TR500 1k vs. RASTI
$R^2$ – estudos em igrejas [3]	0,74
$R^2$ – estudos em salas de audiência de tribunais [6]	0,95
$R^2$ – estudo em claustros abertos [7]	0,91
$R^2$ – estudo em 6 claustros fechados	0,75

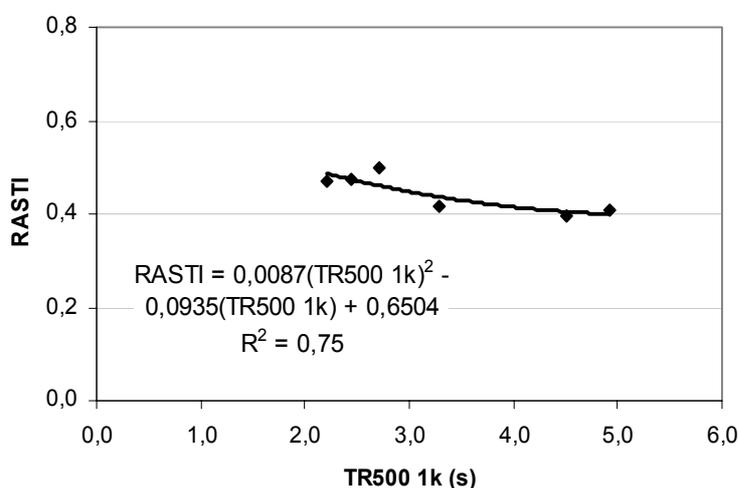


Fig.4-3 – Valor de  $R^2$  para a relação entre TR500 1k e RASTI obtido no presente estudo, para 6 claustros ‘fechados’

O valor agora conseguido (Fig.4-3) aproxima-se dos valores de estudos anteriores, estando mais próximo do estudo em igrejas comparativamente ao estudo em claustros ‘abertos’. Estes constituíam uma amostra bastante homogênea, tal como as salas de audiências de tribunais, o que se manifestou num  $R^2$  superior a 90%. O estudo em igrejas, contemplou mais edifícios (41), com características arquitectónicas diferentes, daí o valor de  $R^2$  de 74%, mais baixo relativamente aos anteriores.

O valor agora encontrado de 75% é referente a uma amostra algo reduzida de seis claustros, com algumas diferenças arquitectónicas, nomeadamente a existência de um claustro com tecto falso e dois claustros com aberturas para capelas bastante superiores às dos restantes, sendo uma delas quase o dobro da outra, pelo que esta amostra poderia ser aumentada, para melhor validar e dar mais crédito os resultados.

#### 4.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS: ANÁLISE INTER-CLAUSTROS

Neste ponto, comparam-se os parâmetros acústicos avaliados com os parâmetros geométricos medidos dos seis claustros em estudo. Será, então, possível interpretar a dependência, ou não, entre estes valores.

##### 4.4.1. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Os parâmetros geométricos utilizados na análise das possíveis correlações foram os seguintes (ver também Quadro 4-9):

- Comprimento médio das galerias ( $Cm$ ) – obtido através da média do comprimento da galeria 1 com o comprimento da galeria 2;
- Largura média das galerias ( $Lm$ ) – obtida através da média das larguras interiores da galeria 1 e da galeria 2 (sem contabilizar os pilares);
- Altura máxima das galerias ( $Hmax$ ) – altura máxima das galerias do claustro;
- Área de pavimento das galerias ( $Spg$ ) – área de pavimento das duas galerias perpendiculares nas quais foram realizadas as medições acústicas (área total  $\approx 2 \times Spg$ );
- Área de vidro ( $Sv$ ) – área de vidro (vertical) com que as arcadas para o pátio central foram fechadas, nas duas galerias perpendiculares nas quais foram realizadas as medições acústicas;
- Área de abertura de capelas ( $Scap$ ) – área da abertura de capelas para o espaço claustros, nas duas galerias perpendiculares nas quais foram realizadas as medições acústicas. Foram contabilizadas as capelas e as aberturas no perímetro com mais de 1 m de profundidade.
- Absorção sonora ( $A$ ) – obtida através do cálculo matemático a partir dos possíveis coeficientes de absorção sonora para a média das frequências 125 250 Hz, 500 1k Hz e 2k 4k Hz de todas as superfícies envolventes que constituem as duas galerias perpendiculares (incluindo o efeito do volume de ar e desprezando a absorção localizada devida a algum mobiliário existente), nas quais foram realizadas as medições [  $A = \sum (\alpha_i \times S_i) + m \times V$  ].
- Volume ( $V$ ) – volume das duas galerias perpendiculares nas quais foram realizadas as medições acústicas (excluindo o volume das capelas aí existentes).

Embora a absorção sonora equivalente ( $A$ ) não seja um parâmetro geométrico, é incluída neste grupo.

Quadro 4-9 – Parâmetros geométricos utilizados no estudo  
das relações com os parâmetros acústicos

Parâmetros arquitectónicos	Símbolos
Comprimento médio das galerias (m)	$C_m$
Largura média das galerias (m)	$L_m$
Altura máxima das galerias (m)	$H_{max}$
Área de pavimento das galerias (m <sup>2</sup> ) (= soma das duas galerias perpendiculares)	$S_{pg}$
Área de vidro (m <sup>2</sup> ) (= soma das duas galerias perpendiculares)	$S_v$
Área de abertura de capelas (m <sup>2</sup> ) (= soma das duas galerias perpendiculares)	$S_{cap}$
Absorção sonora (m <sup>2</sup> ) (= soma das duas galerias perpendiculares)	$A$ ( $A$ 125 250 ; $A$ 500 1k ; $A$ 2k 4k)
Volume (m <sup>3</sup> ) (= soma das duas galerias perpendiculares)	$V$

#### 4.4.2. VALORES OBTIDOS E VARIABILIDADE ENTRE CLAUSTROS

Apresentam-se, no Quadro 4-10, os parâmetros geométricos medidos, assim como a absorção sonora equivalente das duas galerias perpendiculares, nas quais se efectuaram as medições acústicas. No Quadro 4-11, encontram-se alguns parâmetros estatísticos referentes à geometria dos seis claustros em estudo.

Quadro 4-10 – Parâmetros geométricos medidos nos 6 claustros em estudo  
(assinalam-se os valores mais (+) e menos (-) elevados)

Código do Claustro	$C_m$ (m)	$L_m$ (m)	$H_{max}$ (m)	$S_{pg}^*$ (m <sup>2</sup> )	$S_v^*$ (m <sup>2</sup> )	$S_{cap}^*$ (m <sup>2</sup> )	$A^*$ (m <sup>2</sup> )			$V^*$ (m <sup>3</sup> )
							125 250	500 1k	2k 4k	
BP	29,1 (+)	3,2 (-)	5,3	185 (+)	122 (+)	0 (-)	35	34	49	915 (+)
PSP	18,8 (-)	3,3	3,5 (-)	103 (-)	59 (-)	0 (-)	40	30 (-)	35 (-)	366 (-)
SB	20,6	3,5	6,3 (+)	124	75	26	29 (-)	32	47	778
ESE	24,0	3,3	4,9	146	120	0 (-)	50	45	49	659
SF	27,2	3,8 (+)	4,3	177	95	47 (+)	38	42	59	761
CA	26,8	3,5	4,3	163	111	0 (-)	63 (+)	60 (+)	67 (+)	700

\* refere-se às duas galerias perpendiculares onde se fez a medição;

Quadro 4-11 – Valores estatísticos dos parâmetros geométricos para os seis claustros em estudo

	<i>Cm</i> (m)	<i>Lm</i> (m)	<i>Hmax</i> (m)	<i>Spg*</i> (m <sup>2</sup> )	<i>Sv*</i> (m <sup>2</sup> )	<i>Scap*</i> (m <sup>2</sup> )	<i>A*</i> (m <sup>2</sup> )			<i>V*</i> (m <sup>3</sup> )
							125 250	500 1k	2k 4k	
Valor mínimo	18,8	3,2	3,5	103	59	0	29	30	35	366
Mediana	25,4	3,4	4,6	154	103	0	39	38	49	731
Média	24,4	3,4	4,8	150	97	12	42	40	51	697
Valor máximo	29,1	3,8	6,3	185	122	47	63	60	67	915
Erro padrão	4,0	0,2	0,9	32	26	20	12	11	11	184

\* refere-se às duas galerias perpendiculares onde se fez a medição;

Atente-se nas diferenças, nomeadamente o comprimento do claustro da Biblioteca Municipal do Porto, que é superior a uma vez e meia o do Claustro do Comando da PSP do Porto e a área de pavimento das galerias deste é, praticamente, metade da daquele, o mesmo acontecendo com a área de vidro. Também ao nível do volume, há uma grande diferença entre os claustros (tanto que o erro padrão é de 184 m<sup>3</sup>).

#### 4.4.3. CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS E PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

##### 4.4.3.1. Modelos simples

Neste ponto foram analisadas diversas correlações entre os valores médios dos parâmetros acústicos medidos e os parâmetros geométricos dos seis claustros em estudo.

De seguida, no Quadro 4-13, apresentam-se as melhores correlações simples obtidas entre os parâmetros acústicos e os geométricos. Foram utilizados modelos simples, nomeadamente funções lineares ( $y = ax + b$ ), funções polinomiais do segundo grau ( $y = ax^2 + bx + c$ ), funções exponenciais ( $y = ae^{bx}$ ), funções potenciais ( $y = ax^b$ ) e funções logarítmicas ( $y = a \ln x + b$ ).

Tal como anteriormente referido, também aqui foi incluída a análise do parâmetro TR500 1k que é a média entre os valores de TR500 e TR1k, consideradas as bandas de frequência mais representativas.

No Anexo D, podem observar-se os gráficos de todos os modelos de regressão simples entre os parâmetros acústicos TR e RASTI e parâmetros geométricos, presentes no Quadro 4-13. Estas fórmulas são, fundamentalmente, válidas no domínio dos valores dos parâmetros geométricos medidos nos claustros em estudo, que se apresentam no Quadro 4-12.

Quadro 4-12 – Domínio, preferencial, de aplicação dos modelos simples de relação entre parâmetros acústicos e geométricos

<i>Parâmetros geométricos</i>		
<i>Cm (m)</i>		[18,8-29,1]
<i>Lm (m)</i>		[3,2-3,8]
<i>Hmax (m)</i>		[3,5-6,3]
<i>Spg* (m<sup>2</sup>)</i>		[103-185]
<i>Sv* (m<sup>2</sup>)</i>		[59-122]
<i>Scap* (m<sup>2</sup>)</i>		[0-47]
<i>A* (m<sup>2</sup>)</i>	<i>A 125 250</i>	[29-63]
	<i>A 500 1k</i>	[30-60]
	<i>A 2k 4k</i>	[35-67]
<i>V* (m<sup>3</sup>)</i>		[366-915]

\* refere-se às duas galerias perpendiculares onde se fez a medição;

Quadro 4-13 – Melhores modelos de regressão simples entre parâmetros acústicos e geométricos

Modelo	R <sup>2</sup>
$RASTI = -2E-07 V^2 + 6E-06 V + 0,52$	0,72
$RASTI = 0,0039 Hmax^2 - 0,0722 Hmax + 0,6962$	0,61
$TR125 = 9,0584e^{-0,0261 (A\ 125\ 250)}$	0,88
$TR125 = 0,685 Hmax - 0,1198$	0,43
$TR250 = 977,45 (A\ 125\ 250)^{-1,569}$	0,80
$TR250 = 0,0055 V - 0,6424$	0,44
$TR250 = 0,1411 Hmax^2 - 0,3463 Hmax + 1,5205$	0,43
$TR500 = 326,23 (A\ 125\ 250)^{-1,2525}$	0,78
$TR500 = 0,1815 Hmax^2 - 0,8492 Hmax + 3,1158$	0,47
$TR500 = 7,9679e^{-0,0233 (A\ 500\ 1k)}$	0,43
$TR500 = 0,0047 V + 0,0721$	0,43
$TR1k = 91,741 (A\ 125\ 500)^{-0,898}$	0,78
$TR1k = 0,1427 Hmax^2 - 0,6722 Hmax + 3,2387$	0,53
$TR1k = 6,7183e^{-0,0178 (A\ 500\ 1k)}$	0,50
$TR2k = 7E-06 V^2 - 0,0068 V + 3,9906$	0,65
$TR2k = 0,4339 Hmax + 0,7548$	0,63
$TR4k = -0,0298 Hmax^2 + 0,6078 Hmax - 0,0089$	0,62
$TR4k = 3E-06 V^2 - 0,0022 V + 2,2417$	0,51
$TR500\ 1k = 170,17 (A\ 125\ 250)^{-1,0703}$	0,79
$TR500\ 1k = 0,1621 Hmax^2 - 0,7607 Hmax + 3,1773$	0,50
$TR500\ 1k = 7,3089e^{-0,0205 (A\ 500\ 1k)}$	0,46
$TR500\ 1k = 0,004 V + 0,5782$	0,42

V e A referem-se a ½ claustro (2 galerias perpendiculares)

Seguidamente, apresentam-se os nove gráficos (Figs.4-4 a 4-12) onde se obtiveram as melhores correlações simples entre os parâmetros acústicos e os parâmetros geométricos medidos.

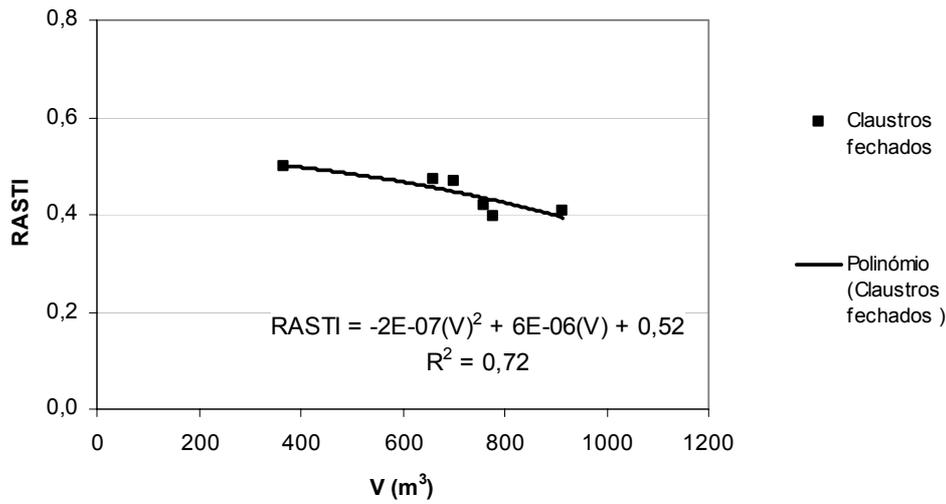


Fig.4-4 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico RASTI e os parâmetros geométricos (V para 2 galerias perpendiculares)

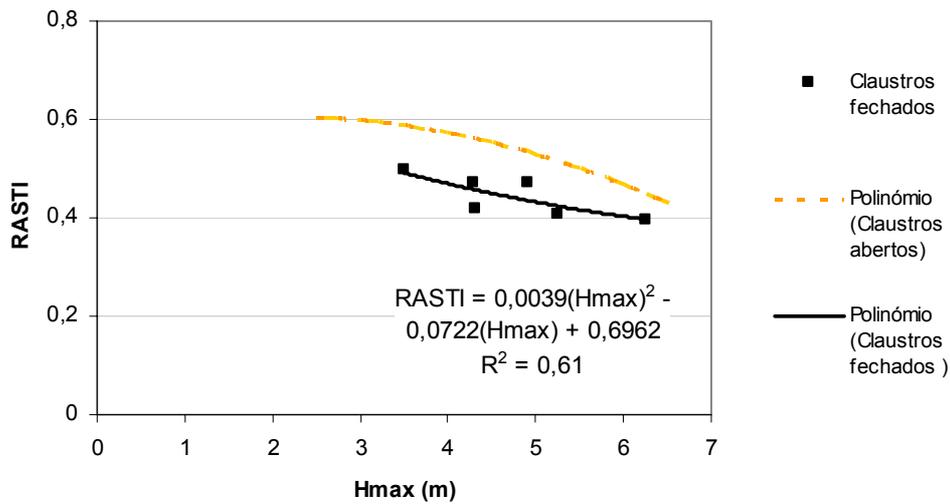


Fig.4-5 – Segunda melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico RASTI e os parâmetros geométricos (comparar com correlação obtida para claustros abertos, para o mesmo parâmetro geométrico [7])

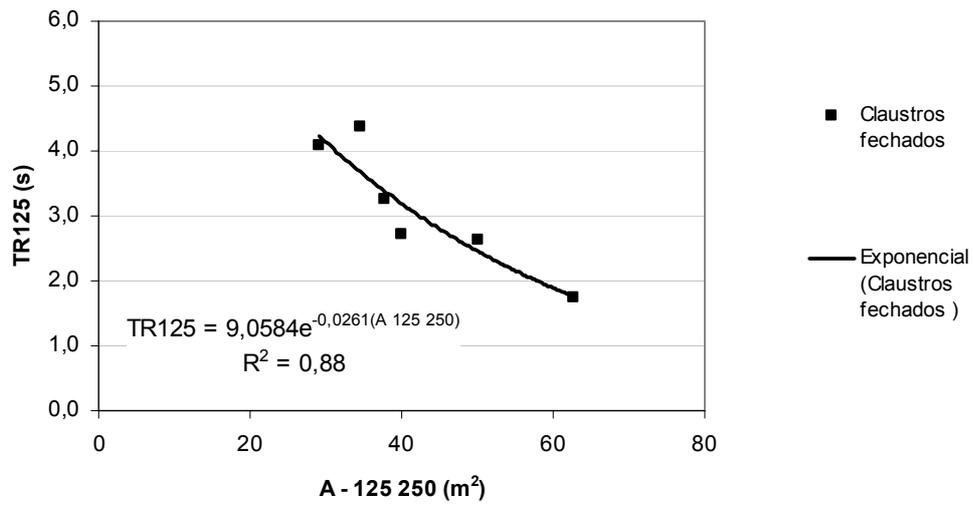


Fig.4-6 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR125 e os parâmetros geométricos (A para 2 galerias perpendiculares)

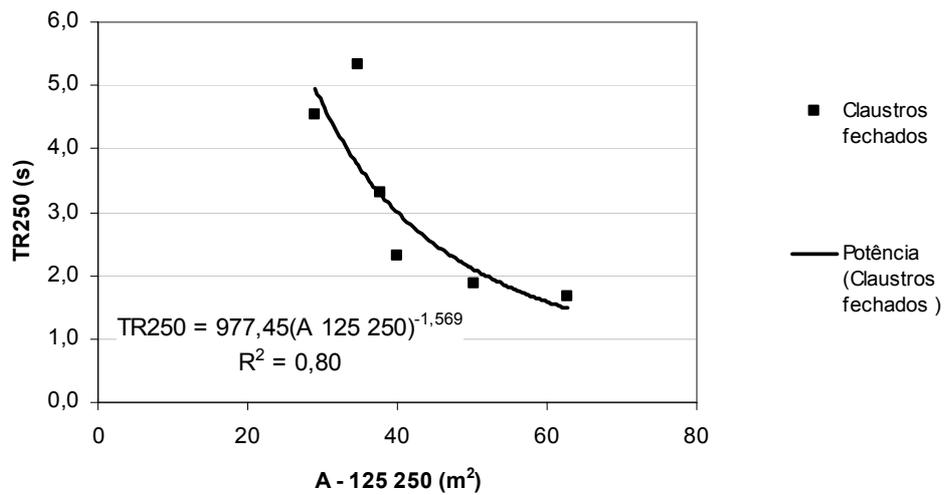


Fig.4-7 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR250 e os parâmetros geométricos (A para 2 galerias perpendiculares)

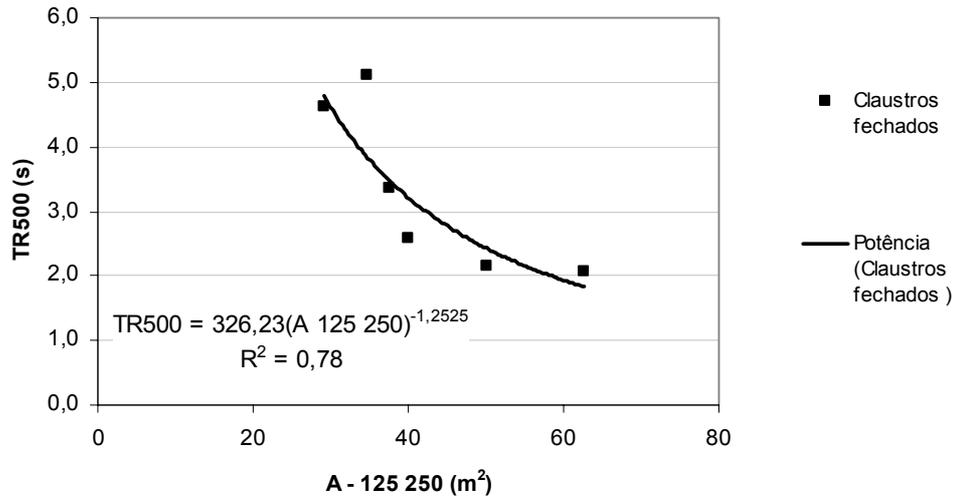


Fig.4-8 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR500 e os parâmetros geométricos (A para 2 galerias perpendiculares)

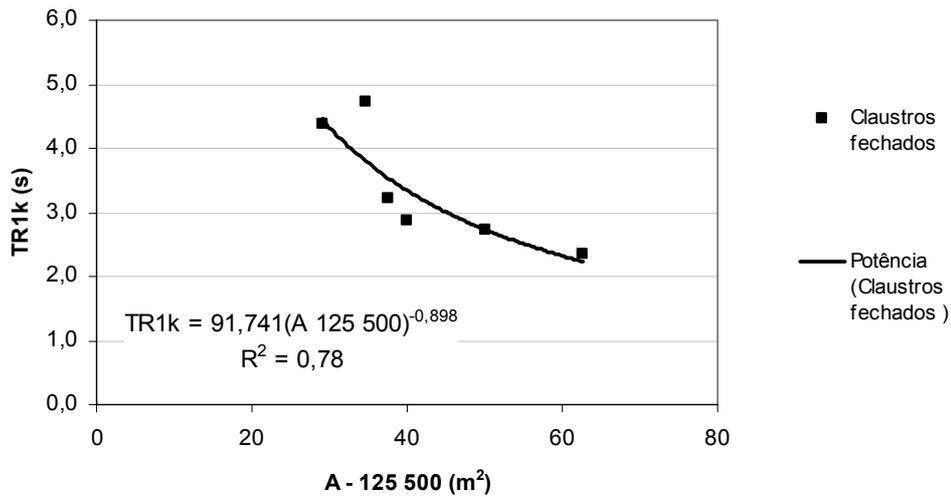


Fig.4-9 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR1k e os parâmetros geométricos (A para 2 galerias perpendiculares)

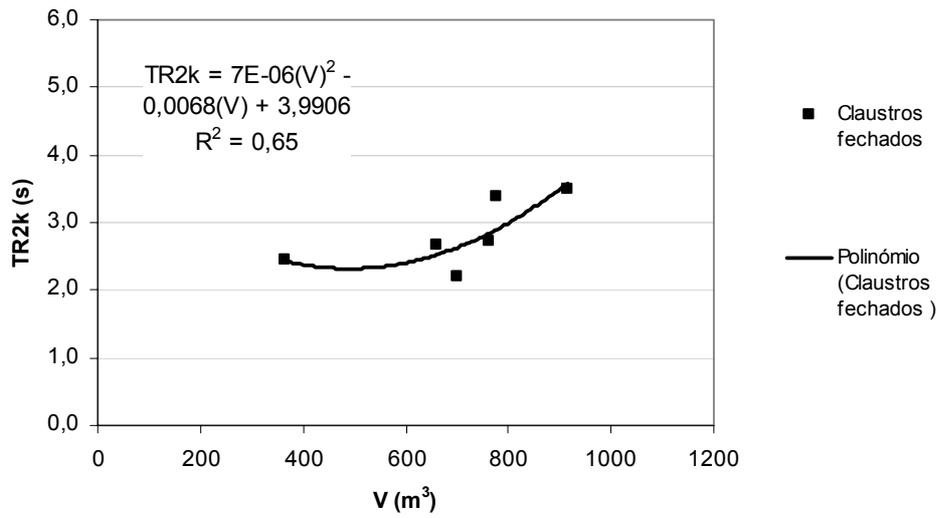


Fig.4-10 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR2k e os parâmetros geométricos (A para 2 galerias perpendiculares)

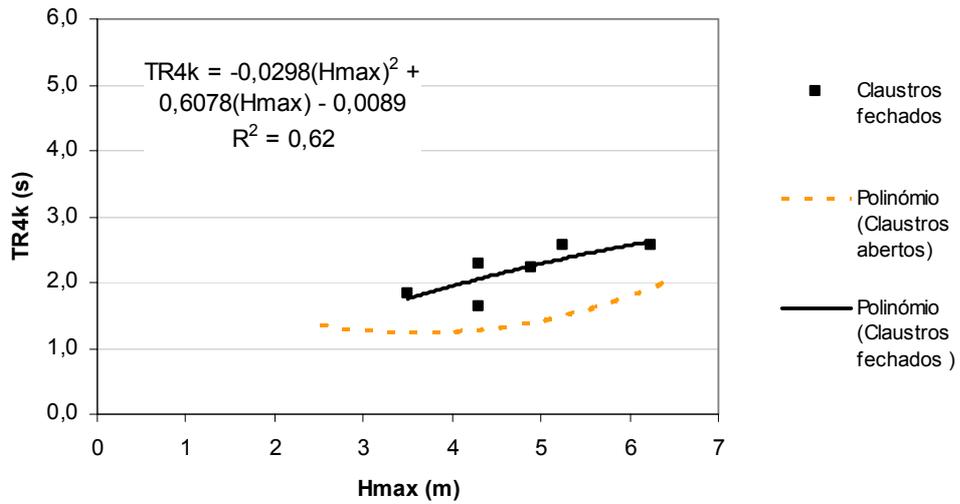


Fig.4-11 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR4k e os parâmetros geométricos (comparar com correlação obtida para claustros abertos, para o mesmo parâmetro geométrico [7])

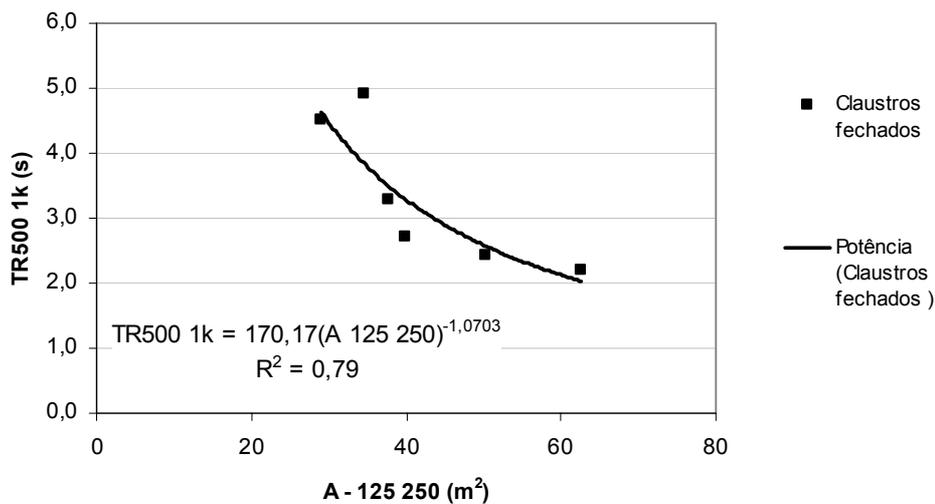


Fig.4-12 – Melhor correlação simples obtida entre o parâmetro acústico TR500 1k e os parâmetros geométricos ( $A$  para 2 galerias perpendiculares)

Da análise efectuada para a amostra medida, considerando modelos simples e os valores de  $R^2$  obtidos, observou-se que:

- 72% da variabilidade dos valores obtidos para o parâmetro acústico RASTI é justificada pelo volume ( $V$ ) ou 61% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ );
- 88% da variabilidade dos valores de TR125 é justificada pela absorção sonora ( $A$  125 250) ou 43% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ );
- 80% da variabilidade dos valores de TR250 é justificada pela absorção sonora ( $A$  125 250), 44% pelo volume ( $V$ ) ou 43% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ );
- 78% da variabilidade dos valores de TR500 é justificada pela absorção sonora ( $A$  125 250), 47% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ) ou 43% pela absorção sonora ( $A$  500 1k) e pelo volume ( $V$ );
- 78% da variabilidade dos valores de TR1k é justificada pela absorção sonora ( $A$  125 250), 53% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ) ou 50% pela absorção sonora ( $A$  500 1k);
- 65% da variabilidade dos valores de TR2k é justificada pelo volume ( $V$ ) ou 63% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ );
- 62% da variabilidade dos valores de TR4k é justificada pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ) ou 51% pelo volume ( $V$ );
- 79% da variabilidade dos valores de TR500 1k é justificada pela absorção sonora ( $A$  125 250), 50% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ), 46% pela absorção sonora ( $A$  500 1k) ou 42% pelo volume ( $V$ ).

A variabilidade dos parâmetros RASTI e TR (para as bandas de frequência entre 125 Hz e 4 kHz) é apenas explicada até 14% pelo comprimento das galerias ( $Cm$ ), o que parece demonstrar a pouca dependência deste parâmetro sobre os acústicos medidos. Também a área de vidro ( $Sv$ ) e, sobretudo, a área de abertura para capelas ( $Scap$ ), não aparentam ser muito significativas para a variabilidade daqueles parâmetros.

A largura das galerias ( $Lm$ ) parece ser o único parâmetro geométrico que não apresenta evidências numéricas de ter qualquer relação com os parâmetros acústicos medidos, pois para os valores de RASTI e de todas as frequências medidas de TR obteve-se um gráfico semelhante ao da Fig.4-13. Logo para larguras de galeria semelhantes, os valores de TR e RASTI são bastante diferentes e independentes daqueles.

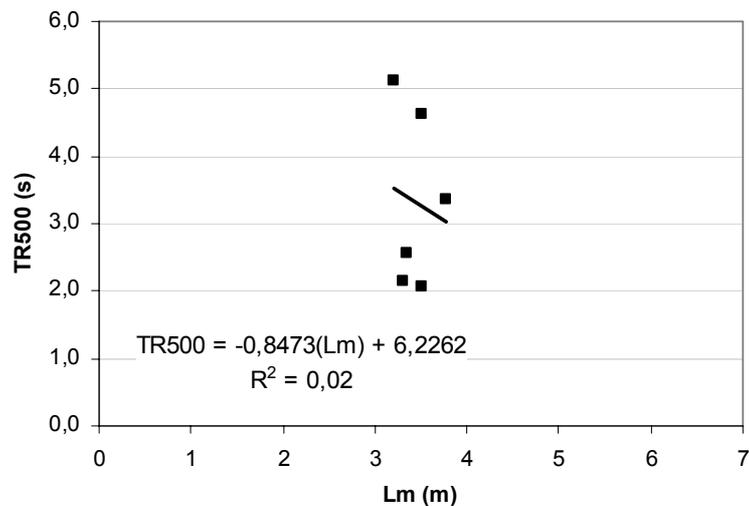


Fig.4-13 – Relação entre  $Lm$  e TR500 obtida para os seis claustros em estudo

#### 4.4.3.2. Modelos gerais lineares

Para complementar as expressões simples obtidas anteriormente, e procurando ainda melhores correlações, neste ponto foram estudadas relações gerais lineares entre os valores médios dos parâmetros acústicos medidos e os parâmetros geométricos dos seis claustros em estudo. O RASTI e as bandas de TR estudadas foram admitidos como parâmetros independentes e os parâmetros geométricos admitidos como dependentes.

No Quadro 4-14, apresentam-se as melhores correlações gerais lineares conseguidas. Estas fórmulas são, fundamentalmente, válidas no domínio dos valores dos parâmetros geométricos medidos nos claustros em estudo, que se apresentaram no Quadro 4-12.

Quadro 4-14 – Melhores modelos gerais lineares de relação  
entre parâmetros acústicos e geométricos

Modelo	R <sup>2</sup>
RASTI = 0,000993 Sv – 0,000279 V + 0,54272	0,97
TR125 = 0,0162 Sv – 0,0874 (A 125 250) + 5,281	0,96
TR250 = 0,00425 V – 0,0859 (A 125 250) + 3,862	0,91
TR500 = 0,00654 Hmax + 0,00534 V – 0,08253 (A 500 1k) + 2,9687	0,93
TR1k = 0,1088 Hmax + 0,00338 V – 0,06130 (A 500 1k) + 2,9824	0,96
TR2k = 0,05845 Hmax + 0,00283 V + 0,3054 Lm – 0,04100 (A 2k 4k) + 1,601	0,99
TR4k = 0,04124 Spg + 0,2217 Hmax – 0,2658 Cm – 0,02236 (A 2k 4k) + 2,586	0,99
TR500 1k = 0,0556 Hmax + 0,00433 V – 0,07166 (A 500 1k) + 2,9699	0,95

Sv, V, Spg e A referem-se a ½ claustro (2 galerias perpendiculares)

Como se observa no Quadro 4-14, a variabilidade dos valores do parâmetro RASTI é fortemente justificada (97%) pelo volume (V) e pela área de vidro (Sv).

Todas as correlações são muito fortes (R<sup>2</sup> superior a 90%) e as melhores observam-se para as bandas de frequência mais elevadas dos TR, nomeadamente 2 kHz e 4 kHz (as bandas mais significativas para a inteligibilidade da palavra), com R<sup>2</sup> igual a 99%. A variabilidade dos seus valores é justificada pelos parâmetros geométricos: altura máxima das galerias (Hmax), volume (V), largura média das galerias (Lm), área de pavimento (Spg), comprimento médio das galerias (Cm) e absorção sonora (A 2k 4k).

A largura das galerias (Lm) que nos modelos simples aparentava não ter relação com os parâmetros acústicos medidos, aqui relacionada com outros parâmetros arquitectónicos na frequência de TR2k devolve um valor de R<sup>2</sup> muitíssimo elevado (R<sup>2</sup> = 0,99).

As expressões obtidas neste ponto e para os mesmos parâmetros acústicos são, naturalmente, mais fiáveis que as expressões simples anteriormente conseguidas, uma vez que apresentam valores de R<sup>2</sup> muito superiores àqueles.

#### 4.4.4. CORRELAÇÃO SIMPLES ENTRE O PARÂMETRO ACÚSTICO RASTI E DISTÂNCIA À FONTE SONORA

Neste ponto foi analisada a correlação entre os valores médios do RASTI (média das três medições em cada ponto) e a distância à fonte sonora (FS), para os seis claustros em estudo. Consideram-se, apenas, os dois pontos (1 e 2 da Fig.3-15) situados na mesma galeria da fonte sonora. Na Fig.4-14, apresenta-se a melhor correlação obtida.

Foram utilizados modelos simples, nomeadamente funções lineares ( $y = ax + b$ ), funções polinomiais do segundo grau ( $y = ax^2 + bx + c$ ), funções exponenciais ( $y = ae^{bx}$ ), funções potência ( $y = ax^b$ ) e funções logarítmicas ( $y = a \ln x + b$ ).

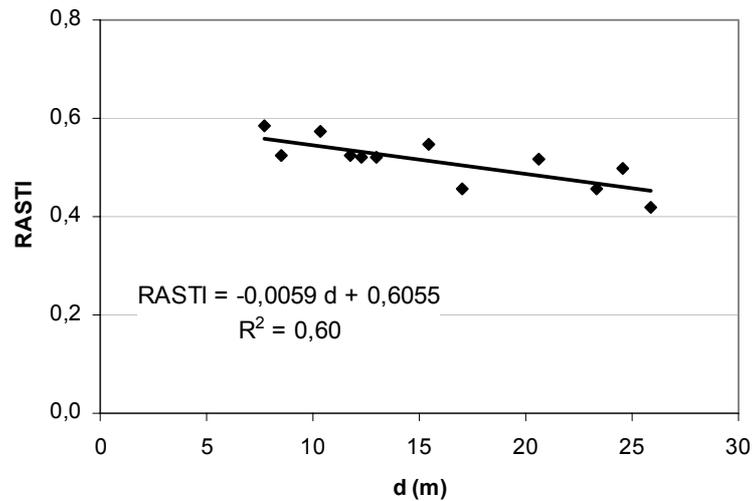


Fig.4-14 – Melhor correlação entre RASTI e distância à fonte sonora (d)

Como se observa na Fig.4-14, pela fórmula de ajuste obtida e correspondente  $R^2$ , a distância à fonte sonora dos pontos de medição justifica em 60% a variabilidade dos valores de RASTI, o que é significativo pois, como era de esperar, os valores de RASTI diminuem com a distância à fonte sonora.

A Inteligibilidade da palavra é aceitável para valores de RASTI iguais ou superiores a 0,50 logo, analisando novamente a Fig.4-14, pode dizer-se que, para distâncias inferiores a 17 m da fonte sonora, não seria necessária correção acústica do local. No entanto, esta conclusão não poderá ser considerada decisiva pois o parâmetro  $R^2$  igual a 0,60 não é suficientemente elevado para dar crédito absoluto a tal afirmação.

#### 4.5. COMPARAÇÃO ENTRE FÓRMULAS OBTIDAS PARA CLAUSTROS ‘ABERTOS’ E PARA CLAUSTROS ‘FECHADOS’: VARIÇÃO NOS PARÂMETROS ACÚSTICOS RASTI E TR

##### 4.5.1. MODELOS SIMPLES

Depois de se analisarem as correlações obtidas para os claustros ‘abertos’ [7] e, no presente trabalho, para os claustros ‘fechados’, foi possível concluir acerca das variações nos valores de RASTI e das várias frequências de TR que o fecho das galerias com vidro destes espaços implicam (apenas é considerado o fecho com vidro da galeria, não se considerando qualquer alteração no mobiliário que iria implicar uma alteração na absorção sonora (A) do espaço).

Os parâmetros  $\Delta$ RASTI e  $\Delta$ TR foram obtidos subtraindo aos valores reais medidos nos claustros fechados deste trabalho os resultados obtidos pelas melhores fórmulas de previsão conseguidas no trabalho sobre claustros ‘abertos’ [7]. Usando modelos gerais lineares ou modelos simples, vai aplicar-se a fórmula com maior  $R^2$  possível, tendo em conta os parâmetros geométricos nela exigidos, que podem não ter sido medidos no presente trabalho. Estas fórmulas devolvem o valor que previsivelmente se obteria se o claustro fosse medido anteriormente à operação de fecho das galerias do claustro com vidro, ou seja, um valor aproximado que os mesmos teriam se ainda fossem ‘abertos’ (não reabilitados). Atente-se nas fórmulas usadas (Fórmulas 4.1. e 4.2.):

$$\Delta RASTI = (\text{valor real } RASTI_{\text{claustros fechados}}) - (\text{valor obtido pela fórmula de previsão } RASTI_{\text{claustros abertos}})$$

$$\Delta TR = (\text{valor real } TR_{\text{claustros fechados}}) - (\text{valor obtido pela fórmula de previsão } TR_{\text{claustros abertos}})$$

(4.1. e 4.2.)

Com os valores de  $\Delta RASTI$  e  $\Delta TR$  assim obtidos, elaboraram-se gráficos em que se relacionaram aqueles valores com os vários parâmetros geométricos medidos nas galerias dos claustros. Seguidamente, nas Figs.4-15 a 4-22 apresentam-se os gráficos que conduziram à melhor fórmula de correlação simples entre os valores de  $\Delta RASTI$  e  $\Delta TR$  e os parâmetros geométricos.

No Quadro 4-15 apresentam-se essas fórmulas de previsão dos valores  $\Delta RASTI$  e  $\Delta TR$ , ou seja, a variação apresentada nos valores de  $RASTI$  e  $TR$  aquando do fecho das galerias com vidro de um claustro.

No Anexo E, podem observar-se os gráficos com as melhores fórmulas de previsão, baseadas em modelos simples. Estas fórmulas são, fundamentalmente, válidas no domínio dos valores dos parâmetros geométricos medidos nos claustros em estudo, que se apresentaram no Quadro 4-12.

Quadro 4-15 – Melhores fórmulas de previsão dos valores de  $\Delta RASTI$  e  $\Delta TR$ , depois do fecho com vidro das galerias dos claustros, a partir de parâmetros geométricos e usando modelos simples

Modelo	R <sup>2</sup>
$\Delta RASTI = -9E-05 V - 0,0242$	0,48
$\Delta RASTI = 0,0013 (A \ 125 \ 250) - 0,1407$	0,43
$\Delta TR_{125} = -0,06 (A \ 125 \ 250) + 3,3767$	0,89
$\Delta TR_{250} = -4,5954 \ln(A \ 125 \ 250) + 18,078$	0,67
$\Delta TR_{250} = 0,1369 Hmax^2 - 0,29 Hmax - 0,8074$	0,43
$\Delta TR_{500} = -0,0696 (A \ 500 \ 1k) + 4,2508$	0,53
$\Delta TR_{1k} = 15,491e^{-0,0685 (A \ 500 \ 1k)}$	0,70
$\Delta TR_{1k} = 0,7398 Hmax - 2,2166$	0,50
$\Delta TR_{2k} = 0,4429 Hmax - 1,0345$	0,60
$\Delta TR_{4k} = 0,0001 Spg^2 - 0,0336 Spg + 2,721$	0,41
$\Delta TR_{4k} = 3E-06 V^2 - 0,0029 V + 1,2643$	0,40
$\Delta TR_{500 \ 1k} = 33,344e^{-0,0918 (A \ 500 \ 1k)}$	0,72
$\Delta TR_{500 \ 1k} = 0,1587 Hmax^2 - 0,7142 Hmax + 0,9823$	0,49

Todos os parâmetros são referentes à galeria já reabilitada (fechada com vidro)

$V$ ,  $Spg$  e  $A$  referem-se a ½ claustro (2 galerias perpendiculares)

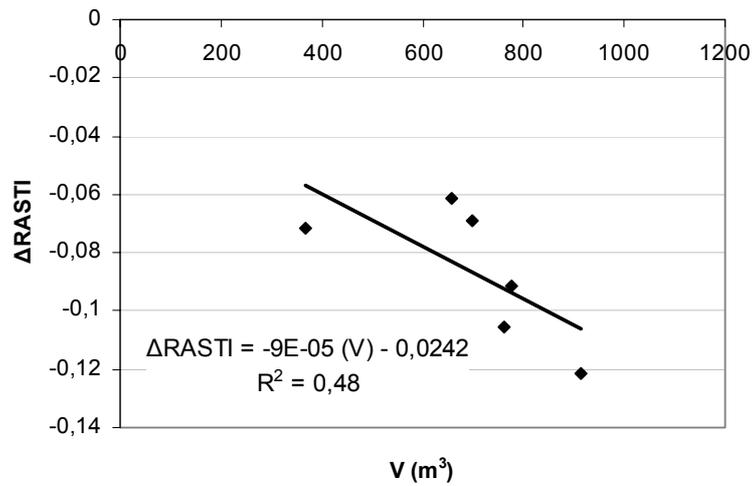


Fig.4-15 – Variação nos valores de RASTI resultante do fecho com vidro das galerias, em função do V (2 galerias perpendiculares)

De acordo com a Fig.4-15, é mais notória a redução dos valores de RASTI, relativamente aos claustros ‘abertos’, para maiores volumes (V) sendo que para volumes menores essa diminuição é menos significativa (por exemplo, para um volume de 600 m³ há uma redução de cerca de 0,08 no valor médio de RASTI e para um volume de 900 m³ a redução é superior a 0,1).

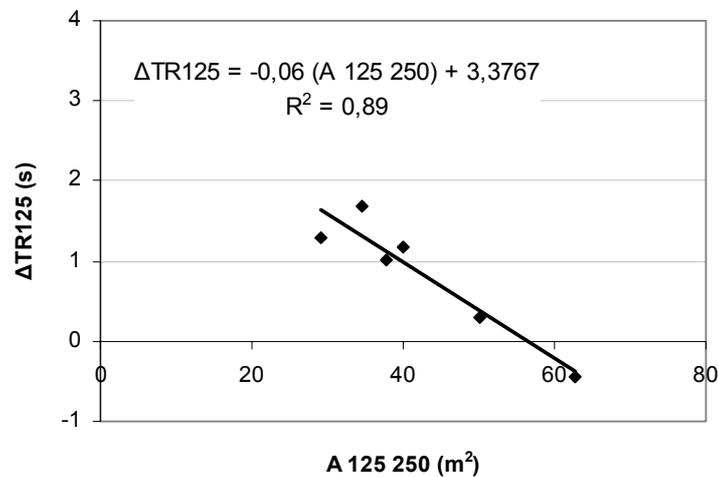


Fig.4-16 – Variação nos valores de TR125 resultante do fecho com vidro das galerias, em função da A 125 250 (2 galerias perpendiculares e valor de A para claustro ‘fechado’)

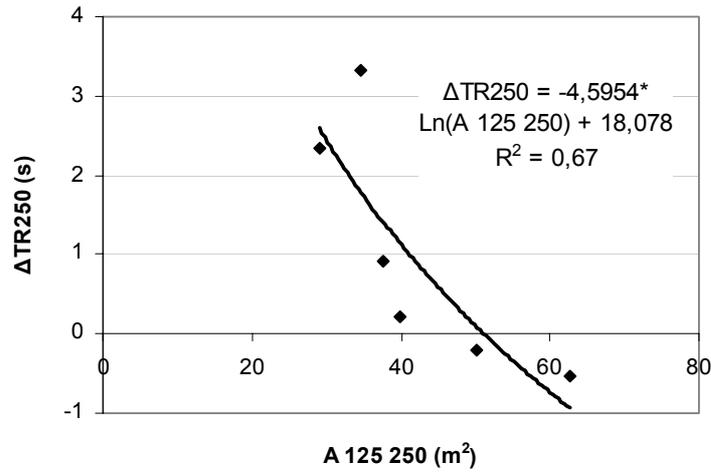


Fig.4-17 – Variação nos valores de TR250 resultante do fecho com vidro das galerias, em função da  $A_{125\ 250}$  (2 galerias perpendiculares e valor de  $A$  para claustro 'fechado')

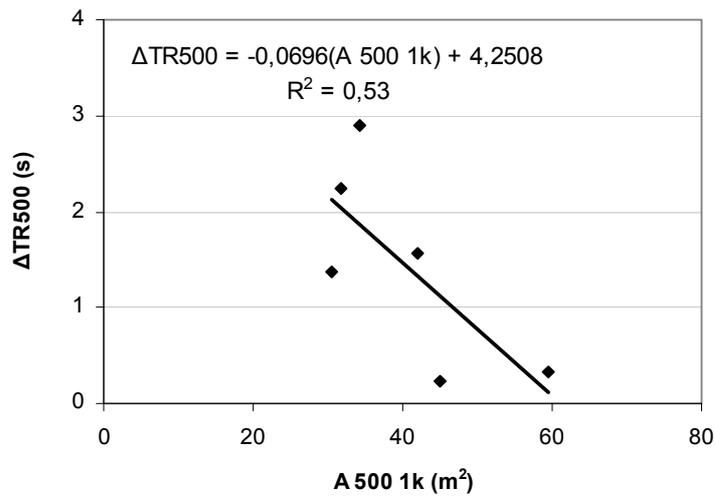


Fig.4-18 – Variação nos valores de TR500 resultante do fecho com vidro das galerias, em função da  $A_{500\ 1k}$  (2 galerias perpendiculares e valor de  $A$  para claustro 'fechado')

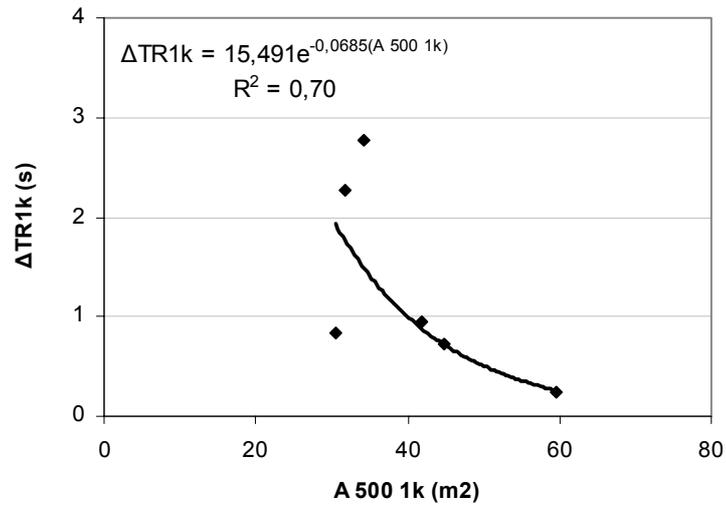


Fig.4-19 – Variação nos valores de TR1k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da  $A 500 1k$  (2 galerias perpendiculares e valor de  $A$  para claustro ‘fechado’)

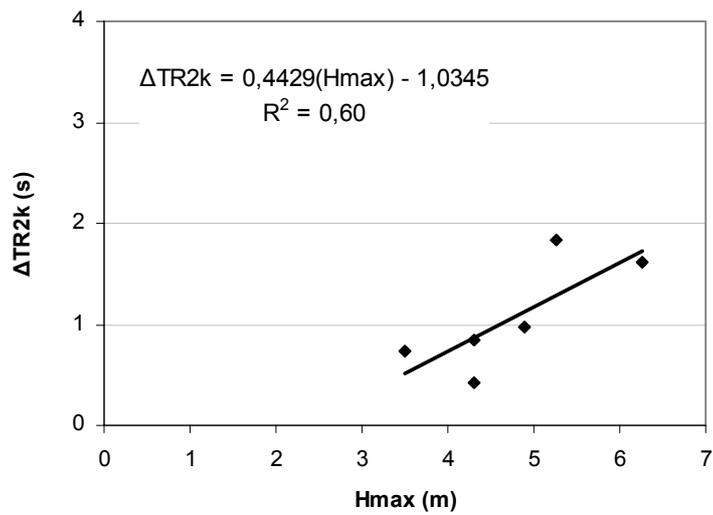


Fig.4-20 – Variação nos valores de TR2k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da  $Hmax$  (2 galerias perpendiculares)

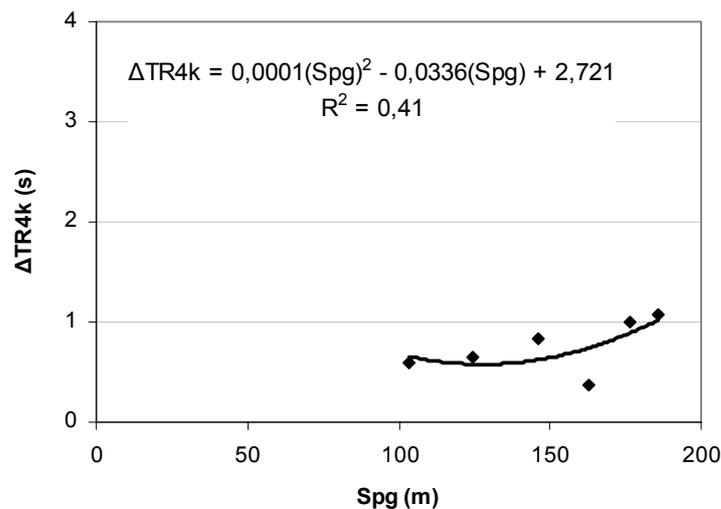


Fig.4-21 – Variação nos valores de TR4k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da *Spg* (2 galerias perpendiculares)

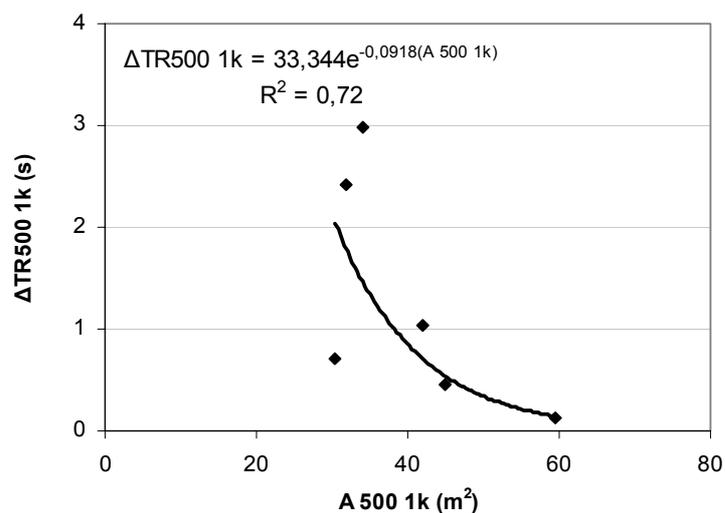


Fig.4-22 – Variação nos valores de TR500 1k resultante do fecho com vidro das galerias, em função da *A 500 1k* (2 galerias perpendiculares e valor de *A* para claustro ‘fechado’)

Numa observação cuidada, pode reparar-se que há claustros em que os  $\Delta TR$  são negativos, o que significa que os valores reais agora medidos nesses claustros (com a galeria já fechada com vidro) são inferiores aos valores previsíveis para TR se as suas galerias estivessem abertas (usando as fórmulas de previsão do trabalho sobre Caracterização Acústica de Claustros Históricos [7]). Tal facto parece incongruente e a explicação pode estar relacionada com os erros inerentes às fórmulas obtidas em trabalhos experimentais, que não são exactas. Há muitos factores a influenciar este estudo e a existência de valores  $\Delta TR$  negativos não pode ser considerada relevante, pois nos gráficos em que tal acontece, a função talvez devesse tender para zero. Assim, nesses dois casos (mesmo com  $R^2$  de 67% e 89%) há a probabilidade de surgirem alguns valores um pouco díspares da realidade.

As melhores correlações são obtidas para as bandas de frequência de 125 Hz ( $R^2 = 89\%$ ), de 250 Hz ( $R^2 = 67\%$ ) e 1 kHz ( $R^2 = 70\%$ ). A correlação para a banda de frequência TR500 1k,  $R^2$  de 72%, é bastante aceitável.

A diminuição dos valores de TR para as várias frequências, pelo ‘fecho’ dos claustros, é tanto mais significativa quanto maior a absorção sonora do espaço ( $A$ ) (Figs.4-16 a 4-19 e 4-22).

O aumento da área de pavimento ( $S_{pg}$ ) e da altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ) resulta num aumento do TR. Estes aumentos têm como consequência um aumento de volume do espaço ( $V$ ), que serão sempre inferiores a este último, o que faz crescer cada vez mais a reverberação como se observa pela fórmula de Sabine (Fórmula 4.3.), em que o TR é proporcional ao volume do espaço.

$$TR = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (4.3.) \quad [31]$$

Em que,

- TR – tempo de reverberação (s);
- $V$  – volume do compartimento ( $m^3$ );
- $\alpha$  – coeficiente de absorção sonora do material (sem unidades);
- $S$  – superfície real do material ( $m^2$ );
- $A$  – absorções sonoras localizadas ( $m^2$ );
- $m$  - absorção sonora do ar ( $m^{-1}$ ) em função da humidade relativa.

No presente trabalho, como já referido anteriormente, a parcela correspondente às absorções localizadas  $\sum_{j=1}^M A_j$  foi desprezada, uma vez que em geral estes valores são muito reduzidos.

#### 4.5.2. MODELOS GERAIS LINEARES

Para complementar os modelos simples obtidos anteriormente e procurando ainda melhores correlações, neste ponto foram estudados modelos gerais lineares entre os valores de  $\Delta RASTI$  e  $\Delta TR$  e os parâmetros geométricos medidos nos claustros estudados neste trabalho. Os  $\Delta RASTI$  e  $\Delta TR$ , calculados como referido no ponto anterior (Modelos simples), foram admitidos como parâmetros independentes e os parâmetros geométricos como dependentes.

No Quadro 4-16, apresentam-se as melhores correlações gerais lineares conseguidas. Estas fórmulas são, fundamentalmente, válidas no domínio dos valores dos parâmetros geométricos medidos nos claustros em estudo, que se apresentaram no Quadro 4-12.

Quadro 4-16 – Melhores fórmulas de previsão dos valores de  $\Delta$ RASTI e  $\Delta$ TR, depois do fecho com vidro das galerias dos claustros, a partir de parâmetros geométricos e usando modelos gerais lineares

Modelo	R <sup>2</sup>
$\Delta$ RASTI = 0,02076 <i>Hmax</i> – 0,00015 <i>V</i> + 0,00150 ( <i>A</i> 125 250) – 0,1480	0,97
$\Delta$ TR125 = – 0,1757 <i>Hmax</i> – 0,8152 <i>Lm</i> – 0,06617 ( <i>A</i> 125 250) + 7,2851	0,96
$\Delta$ TR250 = 0,00434 <i>V</i> -1,9211 <i>Lm</i> – 0,08603 ( <i>A</i> 125 250) + 8,252	0,94
$\Delta$ TR500 = – 0,1168 <i>Spg</i> +1,023 <i>Cm</i> – 0,1090 ( <i>A</i> 125 250) – 1,414	0,95
$\Delta$ TR1k = 0,5271 <i>Hmax</i> + 0,1155 <i>Cm</i> – 0,06916 ( <i>A</i> 500 1k) -1,2243	0,94
$\Delta$ TR2k = 0,08206 <i>Hmax</i> + 0,00280 <i>V</i> – 0,04144 ( <i>A</i> 2k 4k) + 0,8434	0,99
$\Delta$ TR4k = 0,03692 <i>Spg</i> – 0,2124 <i>Cm</i> – 0,02313 ( <i>A</i> 2k 4k) + 1,5857	0,97
$\Delta$ TR500 1k = 0,0736 <i>Hmax</i> + 0,00425 <i>V</i> – 0,07382 ( <i>A</i> 500 1k) + 0,9682	0,93

Todos os parâmetros são referentes à galeria já reabilitada (fechada com vidro)  
*V*, *Spg* e *A* referem-se a ½ claustro (2 galerias perpendiculares)

A fórmula de previsão da variação do valor de RASTI, com o fecho com vidro das galerias dos claustros, é bastante precisa, uma vez que apresenta um R<sup>2</sup> de 97%. Todas as correlações são muito expressivas, com R<sup>2</sup> superior a 90%, o que garante um grau de fiabilidade muito aceitável. Pela observação das fórmulas obtidas no Quadro 4-16, os parâmetros geométricos altura máxima das galerias (*Hmax*), comprimento das galerias (*Cm*), largura das galerias (*Lm*), absorção sonora (*A*), e volume (*V*) parecem ser os que mais influenciam as variações dos valores de RASTI e TR aquando a reabilitação dos claustros, com o fecho das suas galerias com vidro.

Não foram consideradas relevantes as bandas de frequência distintas das do parâmetro acústico a prever.

## 5

## APLICAÇÕES

5.1. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS DE PREVISÃO DOS VALORES DE  $\Delta$ RASTI E  $\Delta$ TR

Seguidamente apresenta-se um exemplo onde se utilizam as fórmulas obtidas anteriormente para previsão dos novos valores de RASTI e TR.

## 5.1.1. EXEMPLO

- Seleccionar um claustro ‘aberto’ de entre os dezasseis estudados no trabalho sobre Caracterização Acústica de Claustros Religiosos Históricos [7] e prever quais os valores de RASTI e TR que o mesmo teria se as suas galerias fossem fechadas com vidro (reabilitadas), sem qualquer outra alteração, nomeadamente de mobiliário. Para isso, vão usar-se as melhores fórmulas de previsão de  $\Delta$ RASTI e  $\Delta$ TR conseguidas neste trabalho. Usar, sempre que possível, os modelos gerais lineares (Quadro 4-16), no entanto e no caso de tal não ser possível (não se conhecerem os parâmetros geométricos que a fórmula encerra) utilizar os modelos simples (Quadro 4-15), embora o seu  $R^2$  seja inferior.

O claustro seleccionado para este exemplo foi o Claustro da Igreja de São Gonçalo, em Amarante, uma vez que os seus parâmetros geométricos (Quadro 5-1) se encontram dentro do domínio fundamental de aplicação das fórmulas, já referido no Quadro 4-12.

Quadro 5-1 – Parâmetros geométricos conhecidos do Claustro ‘aberto’ da Igreja de São Gonçalo

Claustro da Igreja de São Gonçalo	$C_m$	$L_m$	$H_{max}$	$S_{pg}^*$	$A_{500\ 1k}^*$
	24,2	3,1	5,0	131	98

\* refere-se a duas galerias perpendiculares

Neste caso concreto, não se conhecendo as absorções sonoras  $A_{125\ 250}$ ,  $A_{500\ 1k}$  e  $A_{2k\ 4k}$  do claustro fechado, achou-se preferível utilizar fórmulas simples de previsão (Quadro 4-15) que não contabilizassem estes parâmetros, mesmo sabendo que  $R^2$  é bastante inferior ao das fórmulas mais precisas. Pensa-se que arbitrar valores poderia conduzir a mais erros comparativamente a recorrer a fórmulas com  $R^2$  mais baixo. No entanto, para o cálculo do valor de  $\Delta$ TR500 e havendo uma só fórmula simples de previsão, que exige o valor de TR500 para o claustro ‘fechado’, foi considerado

que este valor é igual a metade do medido no claustro ‘aberto’, ou seja, foi admitido um valor de TR500 igual a 49 m<sup>2</sup> (98 m<sup>2</sup> / 2 = 49 m<sup>2</sup>).

Os valores ΔTR125 e ΔTR250 não foram calculados uma vez que, em termos práticos, não são relevantes.

Quadro 5-2 – Valores previsíveis de ΔRASTI e ΔTR para o Claustro da Igreja de São Gonçalo, após o fecho com vidro das galerias do claustro

Parâmetro acústico	Fórmula utilizada	Valor obtido com a fórmula de previsão	Valor Claustro ‘aberto’	Valor previsível Claustro ‘fechado’
ΔRASTI	$\Delta RASTI = -9E-05 V - 0,0242$	-0,08	0,55	0,5
ΔTR500	$\Delta TR500 = -0,0696 (A 500 1k) + 4,2508$	0,83	1,81	2,6
ΔTR1k	$\Delta TR1k = 0,7398 Hmax - 2,2166$	1,48	1,98	3,5
ΔTR2k	$\Delta TR2k = 0,4429 Hmax - 1,0345$	1,18	1,89	3,1
ΔTR4k	$\Delta TR4k = 3E-06 V^2 - 0,0029 V + 1,2643$	0,65	1,65	2,3
ΔTR500 1k	$\Delta TR500 1k = 0,1587 Hmax^2 - 0,7142 Hmax + 0,9823$	1,38	1,41	2,8

Observando o Quadro 5-2 e como previsto, o valor de RASTI será inferior ao do claustro ‘aberto’ (pois a absorção sonora foi diminuída) e os valores de TR para todas as frequências irão aumentar. Ou seja, fechar o claustro vai piorar a acústica do local. Dependendo do tipo de utilização a dar ao espaço, há que procurar a melhor solução para corrigi-lo acusticamente.

## 5.2. PROPOSTAS PARA CORRECÇÃO ACÚSTICA DAS GALERIAS REABILITADAS (FECHO DAS MESMAS COM VIDRO)

Após uma acção de reabilitação de um claustro e qualquer que seja a nova utilização, muito provavelmente a acústica do espaço terá de ser corrigida, procurando baixar os valores de TR. Existem várias soluções disponíveis no mercado que deverão conjugar os benefícios acústicos com a estética desejados para o local. Apresenta-se, em seguida, uma descrição breve de algumas alternativas.

### 5.2.1. PAINÉIS DE CORRECÇÃO ACÚSTICA (CORRECÇÃO ACÚSTICA LOCALIZADA)

São painéis de área muito reduzida que proporcionam uma correcção acústica local (Fig.5-1). Será a solução ideal quando o local de conversação se encontrar perto de uma parede onde este possa ser aplicado. No caso dos claustros e pertencendo estes a edificios históricos, terá de haver um cuidado na selecção do local para a sua colocação.



Fig.5-1 – MatrixPanel da ASC [34]

Aliada à solução anterior, podem sugerir-se painéis decorativos tipo quadro (Fig.5-2), que reúne as vantagens da absorção acústica da proposta anterior com a parte estética, ou seja, um painel acústico dissimulado num quadro a ser personalizado consoante o gosto de cada um. O espaço torna-se visualmente interessante e a sua acústica é melhorada: “*Where ever the artwork goes up, the noise goes down*” [34].

Esta solução parece bastante interessante para um claustro reabilitado a funcionar como restaurante ou como sala de convívio, onde se poderá colocar um quadro “acústico” na proximidade de mesas ou sofás, tornando o espaço acolhedor e interessante.



Fig.5-2 – PicturePanel da ASC [35]

### 5.2.2. PAINÉIS DE CORRECÇÃO ACÚSTICA (CORRECÇÃO ACÚSTICA EM TODA A PAREDE OU TECTO)

Tratam-se de soluções em madeira para espaços exigentes acústica e esteticamente (Fig.5-3). Podem ter várias dimensões, perfurações e acabamentos, sendo fáceis de aplicar e remover. O seu desempenho acústico depende de vários factores, nomeadamente: dimensão, espessura, tipo e número de perfurações, distância do painel à parede ou ao tecto, utilização ou não de material absorvente no seu tardo, etc.

No caso concreto dos claustros, teria de fazer-se uma análise da aplicabilidade deste sistema, uma vez que se tratam de espaços incluídos em edifícios históricos, que não se podem alterar facilmente.



Fig.5-3 – Exemplo de aplicabilidade de painéis acústicos [36]

### 5.2.3. TECTOS ACÚSTICOS

Esta solução é válida para todos os espaços onde se pretende controlar o ruído tornando-os mais confortáveis acusticamente, permitindo a boa conversação ou música, uma vez que baixa o ruído de fundo, diminui as reflexões no espaço e reduz o Tempo de Reverberação.

No exemplo visível na Fig.5-4, quer os painéis quer as juntas são esteticamente agradáveis para uma boa apresentação do espaço e, sendo bastante flexíveis, adaptam-se facilmente a vários tipos de suporte.



Fig.5-4 (A, B e C) – Coffered ceiling system da ASC [37]

#### 5.2.4. OUTROS

Para além destes sistemas poderiam usar-se outros mais simples, nomeadamente cortinados, alcatifas, sofás, etc, que melhoram acusticamente um espaço pois absorvem o som. Teria de analisar-se a aplicabilidade destas soluções nos claustros reabilitados, pois poderia não ser possível a colocação de alcatifa, por exemplo, devendo manter-se o pavimento original. A aplicação de sofás ou cortinados, dependendo de características dos mesmos, pode ser uma solução a ponderar. No entanto, estes sistemas absorvem essencialmente nas altas frequências pelo que o seu uso exagerado pode provocar uma distorção no som emitido, alterando as suas características iniciais (o mesmo pode, eventualmente, acontecer nalguns dos exemplos anteriores).



## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÕES

O objectivo deste trabalho foi a identificação de algumas características acústicas dos claustros ditos ‘fechados’ analisando, para isso, dois parâmetros objectivos acústicos: Tempo de Reverberação (para as frequências entre 125 Hz e 4 kHz) e RASTI. A amostra escolhida contemplou seis claustros, de épocas arquitectónicas diferentes, sujeitos a alterações e onde as galerias foram fechadas com vidro, tornando esse espaço interior. Pretendeu-se quantificar a variação nos valores de TR e RASTI devido a tal operação, de forma a conseguir obter algumas fórmulas de previsão, que devolvam essa variação, bastando para isso conhecer alguns parâmetros geométricos do claustro cuja galeria se pretende fechar com vidro. Estas previsões poderão ser muito úteis aquando de acções de reabilitação em claustros, ficando-se a conhecer as variações nos valores de TR e RASTI do fecho das galerias com vidro para, a partir daí, se poder tratar acusticamente o local da forma mais apropriada para as utilizações previstas, (nomeadamente museus, locais de apoio à restauração e convívio, etc.) aproximando o TR dos valores ideais para cada caso (Quadro 3-5).

Em Portugal, apesar de cada vez mais comum a nova utilização do espaço dos claustros para outros fins relativamente ao inicial de culto e conventual, é ainda pouco comum o fecho das galerias com vidro e, menos ainda, o fecho do pátio central, de forma a torná-lo espaço interior, como é o caso do claustro do Convento do Beato e o claustro do Convento de São Bento da Vitória. A reabilitação acústica de tais espaços é ainda menos frequente. De entre a amostra estudada de seis claustros e dos exemplos dados anteriormente no ponto 2.3.2., a reabilitação acústica apenas se manifestou no claustro do Comando da PSP do Porto, onde foi aplicado um tecto falso (embora também com carácter estético mas melhorando as condições acústicas interiores), no claustro do Convento de São Bento da Vitória, que apresenta painéis acústicos nas suas paredes (era necessário um cuidado ao nível da acústica arquitectónica, uma vez que aí actuava a Orquestra Clássica do Porto) e no claustro do Convento do Beato, cujo pavimento é recoberto por alcatifa que, podendo não ter sido apenas colocada com esse intuito, tem uma função de correcção acústica. Nos restantes claustros analisados e exemplos apresentados, apenas se fecharam as galerias com vidro, sem recorrer a qualquer tratamento acústico.

Da análise efectuada verificou-se que a Inteligibilidade da palavra é razoavelmente conseguida em três dos seis claustros medidos, uma vez que estes apresentam um valor médio de RASTI superior a 0,45 que é o patamar para aquela ser considerada suficiente. Nos restantes três claustros dever-se-á recorrer a correcção acústica para melhorar o valor deste parâmetro.

As médias para os valores de TR, nas frequências estudadas, situam-se entre 2,2 e 3,4 segundos. Para as bandas de frequência mais importantes (500 Hz a 2 kHz), as médias dos TR situam-se entre 2,8 e 3,4 segundos, o que parece ser elevado para as novas utilizações destes espaços, em que se privilegia a Inteligibilidade da palavra, como é o caso do lar de idosos no claustro do Convento de São Francisco, o local de passagem ou zona de estar e convívio na Biblioteca Municipal do Porto, onde se podem observar azulejos históricos ao longo das galerias, etc. Assim, seria adequado diminuir estes valores recorrendo a correcção acústica, que deverá fazer baixar, sobretudo, as bandas de frequência que apresentam maiores TR. Este tratamento terá uma repercussão também favorável para os valores de RASTI (para o tratamento acústico, podem seguir-se algumas sugestões do ponto 5.2.).

Relativamente às correlações simples obtidas entre parâmetros acústicos (RASTI como parâmetro dependente e os TR como independentes), as mais conseguidas ( $R^2$  mais elevado) verificam-se para as frequências de 250 Hz, 500 Hz e 4 kHz (cerca de 80%). A melhor relação foi obtida para TR4k, que explica 81% da variabilidade dos valores médios de RASTI. Com o valor de TR500 1k é possível obter os valores de TR médio para as outras frequências, com grande fiabilidade (cerca de 95%), à excepção do TR 4k em que apenas se obteve um  $R^2$  de 77%.

De trabalhos anteriores em igrejas, salas de audiência de tribunais e claustros ‘abertos’, obtiveram-se relações significativas ( $R^2$ ) entre os valores de TR500 1k e RASTI: 74% em igrejas, 95% em salas de audiência de tribunais e 91% em claustros ‘abertos’. No presente trabalho obteve-se uma relação de 75% entre aqueles parâmetros, o que aproxima esta amostra dos valores dos estudos anteriores. Ainda assim, o valor agora encontrado é referente a uma amostra algo reduzida de seis claustros, com algumas diferenças arquitectónicas, nomeadamente a existência de um claustro com tecto falso e dois claustros com aberturas para capelas bastante superiores às dos restantes, sendo uma delas quase o dobro da outra (no Claustro do Convento de São Francisco, a área de abertura para capelas é de 47 m<sup>2</sup> enquanto no claustro da Sé de Braga esse valor é de 26 m<sup>2</sup>. Nos restantes claustros não existem capelas logo esse valor é de 0 m<sup>2</sup>), pelo que a amostra deverá ser aumentada.

De correlações simples entre parâmetros acústicos e parâmetros geométricos observou-se que a variabilidade dos valores de RASTI é explicada em 72% pelo volume ( $V$ ) ou 61% pela altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ). Estas fórmulas são, fundamentalmente, válidas no domínio dos parâmetros arquitectónicos da amostra em estudo (Quadro 4-12).

Relativamente aos valores de TR, a sua variabilidade depende, sobretudo dos parâmetros geométricos: altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ), volume das galerias ( $V$ ) e, principalmente, da área de absorção sonora ( $A$ ). Esta influencia a variabilidade dos valores de TR em todas as bandas de frequência, mas sobretudo nas mais baixas (88% no TR125, 80% no TR250, 78 % no TR500 e 79% no TR500 1k).

Nestas correlações baseadas em modelos simples, o comprimento das galerias ( $C_m$ ), tal como a área de vidro ( $S_v$ ) e área de abertura de capelas ( $Scap$ ), não aparentam ser significativos para a variabilidade dos valores de RASTI e TR. O parâmetro geométrico largura média das galerias ( $L_m$ ) também parece não ter relação significativa com os parâmetros acústicos medidos.

De correlações baseadas em modelos gerais lineares entre parâmetros acústicos e parâmetros geométricos observou-se que a variabilidade dos valores de RASTI é fortemente justificada (97%) pelo volume ( $V$ ) e pela área de vidro ( $S_v$ ). Todas as correlações são bastante fortes ( $R^2$  superiores a 90%), mas as melhores observam-se para as bandas de frequência mais elevadas de TR (2 kHz e 4 kHz) com  $R^2$  de 99%. Os parâmetros que mais interferem na variabilidade dos parâmetros acústicos são a altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ), o volume ( $V$ ) e, sobretudo, as absorções sonoras ( $A_{125\ 250}$ ,  $A_{500\ 1k}$  e  $A_{2k\ 4k}$ ).

Naturalmente os modelos gerais lineares conduzem a correlações mais fiáveis que as baseadas em modelos simples, pois são baseadas em mais de um parâmetro.

Como era de esperar, os valores de RASTI diminuem com a distância à fonte sonora, o que justifica em 60% a sua variação. Sendo a inteligibilidade da palavra aceitável para valores de RASTI superiores a 0,50 prevê-se que, para distâncias inferiores a 17 m da fonte sonora (ou seja, comprimentos de galerias de 17 m) seja menos importante a correcção acústica do espaço. Esta afirmação tem a validade que o  $R^2$  de 60% obtido permite.

Depois de analisadas as fórmulas obtidas no trabalho sobre claustros ‘abertos’ [7] e comparando-as com as obtidas neste estudo, foi possível concluir acerca das variações nos valores de RASTI e de TR que este tipo de reabilitação de claustros implica (com o acto de fechar as galerias com vidro).

Nos modelos simples estudados, a absorção sonora ( $A$ ) e a altura das galerias ( $H_{max}$ ) parecem ser os parâmetros geométricos que mais influenciam a variação dos TR. Observa-se que o aumento dos valores de TR (com a reabilitação) é tanto mais significativo quanto maior a altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ), que provoca um aumento no volume (e o TR depende directamente do volume, de acordo com a Fórmula 4.3.) e, naturalmente, quanto maior a absorção sonora, menor será o TR desse espaço (TR tendendo para zero, com o aumento da absorção sonora).

Com modelos gerais lineares obteve-se uma fórmula de previsão bastante precisa para a variação nos valores de RASTI, provocada pelo fecho das galerias com vidro ( $R^2$  igual a 97%). A fórmula depende da altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ), do volume ( $V$ ) e da absorção sonora ( $A_{125\ 250}$ ).

Todas as correlações para a variação dos TR são bastante significativas ( $R^2$  superior a 90%) sendo a melhor, com  $R^2$  igual a 99%, obtida para  $\Delta TR_{2k}$ . Os parâmetros geométricos altura máxima das galerias ( $H_{max}$ ), volume ( $V$ ) e absorção sonora ( $A$ ) parecem ser os que mais influenciam as variações dos valores de TR quando a reabilitação dos claustros, com o fecho das suas galerias com vidro.

Com base no exemplo apresentado (notar sempre que as fórmulas utilizadas não foram as mais favoráveis mas as possíveis) é de prever que, fechando com vidro as galerias de um claustro, o valor de RASTI diminua cerca de 0,1, o valor de TR 500 1k aumente cerca de 1,4 segundos e nas altas frequências, TR 2 kHz e TR 4 kHz, aumente em média cerca de 1 segundo.

## 6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De forma a retirar conclusões mais significativas é necessária uma amostra com maior dimensão.

Assim sugere-se que, em trabalhos futuros, se aumente o número de claustros fechados com vidro, quer na galeria, quer no pátio central, aumentando também a quantidade de claustros com tratamento acústico.

No presente trabalho, não foi incluído na amostra o claustro do Convento do Beato por ser bastante diferente dos restantes, uma vez que todo o seu pátio central é fechado superiormente. Como esta característica aparecia isolada numa amostra reduzida, tal iria destabilizar os resultados obtidos. Sugere-se, então, que se incluam na amostra claustros com diferentes tipos de reabilitação, nomeadamente fechados no pátio central. Nesse caso, poder-se-á inclusive dividir os claustros em dois grupos: claustros ‘fechados’ com vidro nas galerias e claustros ‘fechados’ no pátio central e analisar as diferenças entre eles. O claustro do Convento de São Bento da Vitória deverá ser incluído na amostra mas será necessário realizar novas medições agora já sem a presença das peças de mobiliário da Orquestra Clássica do Porto, que o ocupou até 2005.

No presente trabalho apenas foram medidos dois parâmetros acústicos objectivos, nomeadamente o Tempo de Reverberação e o RASTI, que são os parâmetros mais significativos, de acordo com trabalhos já realizados e referidos anteriormente. Sugere-se, em desenvolvimentos futuros, a análise de outros parâmetros, como por exemplo a Clareza ( $C_{80}$ ), o Tempo de Decaimento Curto (EDT) e ainda parâmetros acústicos subjectivos, como a Clareza do discurso musical (no caso de claustros reabilitados para receber música), Intimidade, Equilíbrio tímbrico, etc. Será, também, útil a análise com modelos estatísticos mais complexos que os agora estudados.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Silva, P. Martins da. *Acústica de Edifícios*. LNEC, Lisboa, 1998.
- [2] Decreto – Lei nº129/2002 de 11 de Maio.
- [3] Carvalho, A. P. Oliveira de. *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. Dissertação de Doutoramento, Universidade da Florida, 1994.
- [4] Morgado, António E. J. *Estudo acústico de igrejas portuguesas através de parâmetros subjectivos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- [5] Lencastre, M. *Inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análises de carácter objectivo e subjectivo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [6] Monteiro, Carlos A. *Caracterização Acústica de Salas de Audiência de Tribunais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [7] Carvalho, Anabela P. B. *Caracterização Acústica de Claustros Religiosos Históricos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [8] Barria, Iolanda. *Especial Reabilitação – Reabilitação e Manutenção do Parque Imobiliário e Patrimonial*. Engenharia e Vida nº 31, Janeiro/2007, pág. 65, Loja da Imagem, Lisboa.
- [9] Appleton, João. *Estruturas Antigas: do diagnóstico à obra – Em defesa da causa “Património”*. Engenharia e Vida nº 17, Outubro/2005, pág. 54, Loja da Imagem, Lisboa.
- [10] <http://www.aveirodomus.pt/workshop/3%20Reabilitacao/4%20Vitor%20Coias.pdf>. Dezembro/ 2007.
- [11] Córias, Vítor. *Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos*. Argumentum/Gecorpa, Lisboa, Maio 2007.
- [12] Rodrigues, Rui Calejo. Apontamentos da disciplina ‘Manutenção e Reabilitação de Edifícios’, 5º Ano, Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [13] <http://www.pousadas.pt/historicalhotels/PT/pousadas/Portugal/Algarve/ConventodaGraca/gallery/> Setembro/ 2007.
- [14] <http://claustrodomosteiro.blogspot.com/>. Outubro/ 2007.
- [15] Gil, Júlio; Calvet, Nuno. *As mais belas Igrejas de Portugal*. Volume 1. Editorial Verbo, Lisboa/São Paulo, 1988.
- [16] <http://www.pousadas.pt/historicalhotels/PT/pousadas/Portugal/Alentejo/SFrancisco/gallery/>. Setembro / 2007.
- [17] <http://www.pousadas.pt/historicalhotels/PT/pousadas/Portugal/Alentejo/Loios/gallery/>. Setembro/ 2007.
- [18] <http://www.pousadas.pt/historicalhotels/PT/pousadas/Portugal/Alentejo/NossaSenhoradaAssuncao/gallery/>. Setembro/ 2007.
- [19] <http://www.pousadas.pt/historicalhotels/PT/pousadas/Portugal/Beiras/ConventodoDesagravo/gallery/>. Setembro/ 2007.

- [20] <http://www.pousadas.pt/historicalhotels/PT/pousadas/Portugal/LisboaValedoTejo/CastelodePalmela/gallery/>. Outubro/ 2007.
- [21] <http://images.google.pt/imgres?imgurl=https://woc.uc.pt/fpce/genericpagefiles/foto1.jpg&imgrefurl=https://woc.uc.pt/fpce/genericpages/showgenericpage.do%3Bjsessionid%3D5D003D03189B88C5135EED9C16DED3E2%3Fidgenericpage%3D1&h=180&w=240&sz=33&hl=pt-PT&start=2&um=1&tbnid=fAA1jCQXBCxotM:&tbnh=83&tbnw=110&prev=/images%3Fq%3Dfaculdade%2Bde%2Bpsicologia%2Be%2Bciencias%2Bda%2Beduca%25C3%25A7%25C3%25A3o%2Boimbra%2B%26ndsp%3D18%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:pt-PT:official%26sa%3DN>. Outubro/ 2007.
- [22] <http://www.ips.pt/claustros/imagens.html>. Setembro/ 2007.
- [23] [http://www.scmp.pt/pagegen.asp?SYS\\_PAGE\\_ID=873850](http://www.scmp.pt/pagegen.asp?SYS_PAGE_ID=873850)
- [24] <http://www.scmp.pt/backoffice/contents/dynamicContents/wmcm/dcPastasGaleria/GalleryImage.aspx?id=824>. Outubro/ 2007.
- [25] [http://www.mnazulejo-ipmuseus.pt/code/modules/visita/presentation/visita\\_exposicao.php?site\\_session=e469b8bd9d48c2192eaea66feae414b4](http://www.mnazulejo-ipmuseus.pt/code/modules/visita/presentation/visita_exposicao.php?site_session=e469b8bd9d48c2192eaea66feae414b4). Outubro/ 2007.
- [26] <http://www.mnazulejo-ipmuseus.pt/images/230506180516012709Claustro.JPG>. Outubro/ 2007.
- [27] [http://www.hsbraga.min-saude.pt/site\\_/html/template1.asp?nivelID0=1000&nivelID1=1000&nivelID2=1018&nivelID3=0&css=1018&menuactivo=1018](http://www.hsbraga.min-saude.pt/site_/html/template1.asp?nivelID0=1000&nivelID1=1000&nivelID2=1018&nivelID3=0&css=1018&menuactivo=1018). Outubro/ 2007.
- [28] [http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://www.equador-viagens.pt/imagens/museu\\_Beato.gif&imgrefurl=http://www.equador-viagens.pt/pt/pt\\_c1\\_d3.htm&h=500&w=640&sz=127&hl=pt-PT&start=1&um=1&tbnid=AULPBJOO\\_kiigM:&tbnh=107&tbnw=137&prev=/images%3Fq%3Dconvento%2Bdo%2Bbeato%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:pt-PT:official%26sa%3DN](http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://www.equador-viagens.pt/imagens/museu_Beato.gif&imgrefurl=http://www.equador-viagens.pt/pt/pt_c1_d3.htm&h=500&w=640&sz=127&hl=pt-PT&start=1&um=1&tbnid=AULPBJOO_kiigM:&tbnh=107&tbnw=137&prev=/images%3Fq%3Dconvento%2Bdo%2Bbeato%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:pt-PT:official%26sa%3DN). Setembro/ 2007.
- [29] [http://www.cm-viana-castelo.pt/index2.php?option=com\\_content&do\\_pdf=1&id=221](http://www.cm-viana-castelo.pt/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=221). Novembro/ 2007
- [30] Fernandes, Maria E., Mestre, Vítor, Távora, Fernando. *Reabilitação do edifício do Aljube, antigo Convento de Santa Clara do Porto*. Folheto, DGEMN, Lisboa, 1999
- [31] [http://www.ippar.pt/pls/dippar/pat\\_pesq\\_detalhe?code\\_pass=74957](http://www.ippar.pt/pls/dippar/pat_pesq_detalhe?code_pass=74957). Outubro/ 2007.
- [32] <http://hoteisporto.com/hotel/lista/Hoteis-de-4-estrelas/Convento-de-Alpendurada.html>. Setembro/ 2007.
- [33] Carvalho, A. P. Oliveira de. Apontamentos da disciplina ‘Acústica Ambiental e de Edifícios’, 5º Ano, Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007
- [34] <http://www.asc-home-theater.com/matrix.htm>. Janeiro/ 2008.
- [35] <http://www.asc-home-theater.com/picture-panel.htm>. Janeiro/ 2008.
- [36] [http://www.construlink.com/LogosCatalogos/ico\\_ICOACOUSTIC.pdf](http://www.construlink.com/LogosCatalogos/ico_ICOACOUSTIC.pdf). Janeiro/ 2008.
- [37] <http://www.acousticsscience.com/lisa/coffer.htm>. Janeiro/ 2008.

# **Anexos**



# **Anexo A**

## **FICHA DE REGISTO DE MEDIÇÕES**

## FICHA DE MEDIÇÕES – TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RASTI

Data: \_\_/\_\_/2007      Hora: \_\_\_\_\_

Claustro – Local: \_\_\_\_\_

### Avaliação do Tempo de Reverberação (bandas de 1/1 oitava de 125 a 4k Hz)

Pontos de medição	Frequência (Hz)	TR (s)		
		1ª vez	2ª vez	média
1	125			
	250			
	500			
	1k			
	2k			
	4k			
2	125			
	250			
	500			
	1k			
	2k			
	4k			
3	125			
	250			
	500			
	1k			
	2k			
	4k			
4	125			
	250			
	500			
	1k			
	2k			
	4k			

Frequência	TR (s)
Hz	média
125	
250	
500	
1k	
2k	
4k	

**RASTI**

VERIFICAR *lead* iluminados:

Na unidade fixa (fonte sonora)

Ref. +10dB

Na unidade móvel

8s + *single* + *Speech Transm. Índex+500Hz+2kHz*

Pontos de medição	RASTI				Distância (m) à Fonte sonora
	1ª vez	2ª vez	3ª vez	média	
1					
2					
3					
4					

**Observações:**



# **Anexo B**

## **FICHAS COM VALORES OBTIDOS NAS MEDIÇÕES ACÚSTICAS**

## FICHA DE MEDIÇÕES – TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RASTI

Data: 8/11/2007

Hora: 17:30; Data: 6/12/2007

Hora: 16:45

Claustro – Local: Claustro da Venerável Ordem de São Francisco, Guimarães

### Avaliação do Tempo de Reverberação (bandas de 1/1 oitava de 125 a 4k Hz)

Pontos de medição	Frequência (Hz)	TR (s)		
		1ª vez	2ª vez	média
1	125	3,07	3,10	3,09
	250	3,11	3,22	3,17
	500	3,20	3,13	3,17
	1k	2,96	2,96	2,96
	2k	2,46	2,43	2,45
	4k	2,05	1,93	1,99
2	125	3,39	3,42	3,41
	250	3,26	3,45	3,36
	500	3,37	3,27	3,32
	1k	3,12	3,28	3,20
	2k	2,72	2,76	2,74
	4k	2,21	2,23	2,22
3	125	3,46	3,13	3,30
	250	3,22	3,32	3,27
	500	3,47	3,48	3,48
	1k	3,32	3,32	3,32
	2k	2,8	2,8	2,80
	4k	2,35	2,35	2,35
4	125	3,46	3,01	3,24
	250	3,47	3,37	3,42
	500	3,42	3,52	3,47
	1k	3,38	3,43	3,41
	2k	2,95	2,93	2,94
	4k	2,54	2,62	2,58

Frequência	TR (s)
Hz	média
125	3,26
250	3,30
500	3,36
1k	3,22
2k	2,73
4k	2,29

**RASTI**

VERIFICAR *lead* iluminados:

Na unidade fixa (fonte sonora)

Ref. +10dB

Na unidade móvel

8s + *single* + *Speech Transm. Índex+500Hz+2kHz*

Pontos de medição	RASTI				Distância (m) à Fonte sonora
	1ª vez	2ª vez	3ª vez	média	
1	0,52	0,53	0,52	0,52	11,8
2	0,46	0,45	0,46	0,46	23,4
3	0,37	0,37	0,35	0,36	35,2
4	0,34	0,33	0,32	0,33	46,8

**Observações:**

**FICHA DE MEDIÇÕES – TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RASTI**

Data: 9/11/2007

Hora: 12:30; Data: 7/12/2007

Hora: 12:30

Claustro – Local: Claustro da Sé de Braga, Braga

**Avaliação do Tempo de Reverberação** (bandas de 1/1 oitava de 125 a 4k Hz)

Pontos de medição	Frequência (Hz)	TR (s)		
		1ª vez	2ª vez	média
1	125	4,48	3,94	4,21
	250	4,46	4,56	4,51
	500	4,62	4,65	4,64
	1k	4,38	4,21	4,30
	2k	3,44	3,28	3,36
	4k	2,51	2,42	2,47
2	125	4,08	3,73	3,91
	250	4,51	4,54	4,53
	500	4,59	4,61	4,60
	1k	4,26	4,48	4,37
	2k	3,4	3,35	3,38
	4k	2,56	2,50	2,53
3	125	4,07	4,16	4,12
	250	4,55	4,48	4,52
	500	4,67	4,72	4,70
	1k	4,42	4,50	4,46
	2k	3,31	3,45	3,38
	4k	2,64	2,69	2,67
4	125	4,17	4,11	4,14
	250	4,54	4,66	4,60
	500	4,72	4,47	4,60
	1k	4,44	4,35	4,40
	2k	3,42	3,35	3,39
	4k	2,66	2,57	2,62

Frequência	TR (s)
Hz	média
125	4,09
250	4,61
500	4,63
1k	4,38
2k	3,38
4k	2,57

**RASTI**

VERIFICAR *lead* iluminados:

Na unidade fixa (fonte sonora)

Ref. +10dB

Na unidade móvel

8s + *single* + *Speech Transm. Índex+500Hz+2kHz*

Pontos de medição	RASTI				Distância (m) à Fonte sonora
	1ª vez	2ª vez	3ª vez	média	
1	0,52	0,52	0,53	0,52	8,5
2	0,46	0,45	0,46	0,46	17,1
3	0,33	0,32	0,31	0,32	25,6
4	0,29	0,29	0,27	0,28	34,1

**Observações:**

## FICHA DE MEDIÇÕES – TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RASTI

Data: 9/11/2007

Hora: 17:00; Data: 7/12/2007

Hora: 16:00

Claustro – Local: Claustro da Escola Superior de Educação, Braga

### Avaliação do Tempo de Reverberação (bandas de 1/1 oitava de 125 a 4k Hz)

Pontos de medição	Frequência (Hz)	TR (s)		
		1ª vez	2ª vez	média
1	125	2,55	2,20	2,38
	250	1,74	1,64	1,69
	500	1,99	2,05	2,02
	1k	2,64	2,67	2,66
	2k	2,62	2,62	2,62
	4k	2,05	2,14	2,10
2	125	2,33	2,58	2,46
	250	1,56	1,77	1,67
	500	1,99	2,21	2,10
	1k	2,67	2,62	2,65
	2k	2,65	2,62	2,64
	4k	2,17	2,17	2,17
3	125	2,61	3,38	3,00
	250	2,00	2,29	2,15
	500	2,26	2,27	2,27
	1k	2,79	2,82	2,81
	2k	2,68	2,75	2,72
	4k	2,22	2,32	2,27
4	125	2,67	2,83	2,75
	250	1,89	1,98	1,94
	500	2,23	2,23	2,23
	1k	2,73	2,79	2,76
	2k	2,65	2,74	2,70
	4k	2,28	2,39	2,34

Frequência	TR (s)
Hz	média
125	2,64
250	1,86
500	2,15
1k	2,72
2k	2,67
4k	2,22

**RASTI**

VERIFICAR *lead* iluminados:

Na unidade fixa (fonte sonora)

Ref. +10dB

Na unidade móvel

8s + *single* + *Speech Transm. Índex+500Hz+2kHz*

Pontos de medição	RASTI				Distância (m) à Fonte sonora
	1ª vez	2ª vez	3ª vez	média	
1	0,57	0,57	0,58	0,57	10,3
2	0,52	0,51	0,52	0,52	20,7
3	0,44	0,43	0,43	0,43	31,0
4	0,37	0,37	0,36	0,37	41,3

**Observações:**

## FICHA DE MEDIÇÕES – TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RASTI

Data: 14/12/2007

Hora: 10:00

Claustro – Local: Claustro da Biblioteca Municipal do Porto, Porto

### Avaliação do Tempo de Reverberação (bandas de 1/1 oitava de 125 a 4k Hz)

Pontos de medição	Frequência (Hz)	TR (s)		
		1ª vez	2ª vez	média
1	125	3,81	4,24	4,03
	250	5,15	5,18	5,17
	500	4,96	4,78	4,87
	1k	4,59	4,38	4,49
	2k	3,20	3,20	3,20
	4k	2,27	2,26	2,27
2	125	4,41	4,51	4,46
	250	4,80	5,05	4,93
	500	5,04	5,08	5,06
	1k	4,56	4,71	4,64
	2k	3,41	3,35	3,38
	4k	2,53	2,48	2,51
3	125	4,47	4,55	4,51
	250	5,71	5,90	5,81
	500	5,23	5,18	5,21
	1k	5,09	4,77	4,93
	2k	3,86	3,48	3,67
	4k	2,59	2,72	2,66
4	125	4,83	4,08	4,46
	250	5,35	5,58	5,47
	500	5,35	5,27	5,31
	1k	4,75	4,88	4,82
	2k	3,82	3,63	3,73
	4k	2,92	2,73	2,83

Frequência	TR (s)
Hz	média
125	4,36
250	5,34
500	5,11
1k	4,72
2k	3,49
4k	2,56

**RASTI**

VERIFICAR *lead* iluminados:

Na unidade fixa (fonte sonora)

Ref. +10dB

Na unidade móvel

8s + *single* + *Speech Transm. Índex+500Hz+2kHz*

Pontos de medição	RASTI				Distância (m) à Fonte sonora
	1ª vez	2ª vez	3ª vez	média	
1	0,52	0,53	0,51	0,52	13,0
2	0,43	0,41	0,42	0,42	25,9
3	0,37	0,38	0,37	0,37	38,9
4	0,31	0,32	0,33	0,32	51,8

**Observações:**

## FICHA DE MEDIÇÕES – TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RASTI

Data: 15/12/2007

Hora: 10:00

Claustro – Local: Claustro do Comando Metropolitano da PSP, Porto

### Avaliação do Tempo de Reverberação (bandas de 1/1 oitava de 125 a 4k Hz)

Pontos de medição	Frequência (Hz)	TR (s)		
		1ª vez	2ª vez	média
1	125	2,61	2,82	2,72
	250	2,33	2,11	2,22
	500	2,44	2,56	2,50
	1k	2,88	2,88	2,88
	2k	2,43	2,40	2,42
	4k	1,75	1,72	1,74
2	125	2,66	2,49	2,58
	250	2,21	2,11	2,16
	500	2,62	2,63	2,63
	1k	2,78	2,83	2,81
	2k	2,38	2,39	2,39
	4k	1,84	1,82	1,83
3	125	2,90	2,98	2,94
	250	2,39	2,30	2,35
	500	2,61	2,49	2,55
	1k	2,96	2,84	2,90
	2k	2,47	2,41	2,44
	4k	1,89	1,89	1,89
4	125	2,87	2,40	2,64
	250	2,56	2,38	2,47
	500	2,55	2,65	2,60
	1k	2,82	2,92	2,87
	2k	2,53	2,47	2,50
	4k	1,90	1,84	1,87

Frequência	TR (s)
Hz	média
125	2,72
250	2,30
500	2,57
1k	2,86
2k	2,44
4k	1,83

**RASTI**

VERIFICAR *lead* iluminados:

Na unidade fixa (fonte sonora)

Ref. +10dB

Na unidade móvel

8s + *single* + *Speech Transm. Índex+500Hz+2kHz*

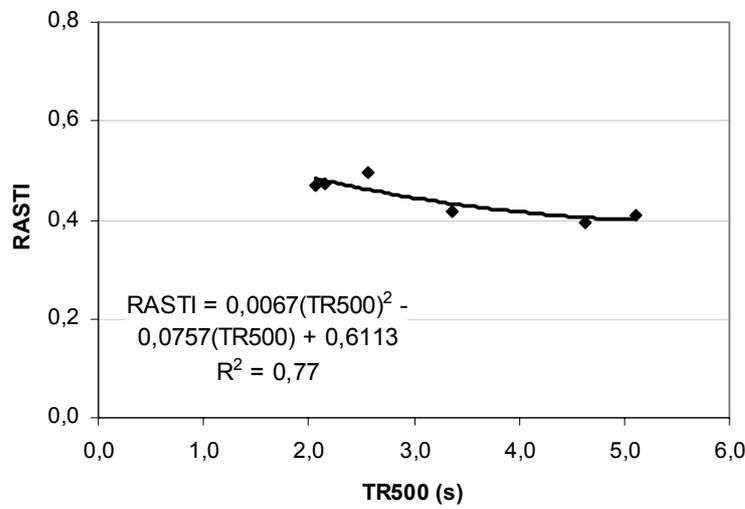
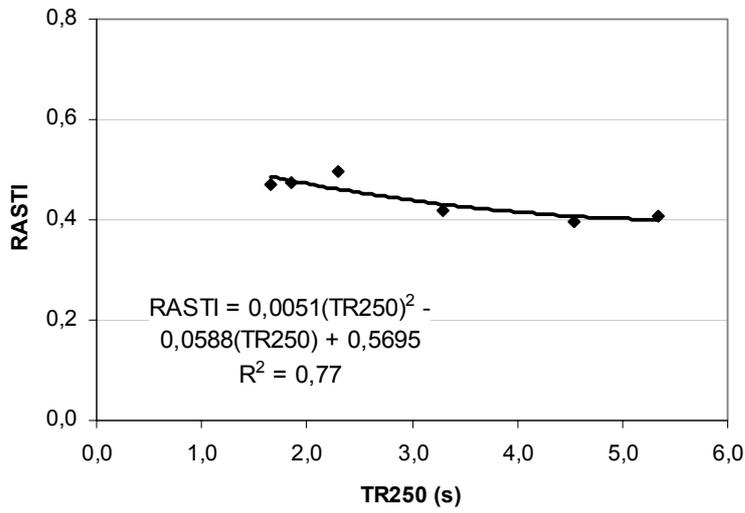
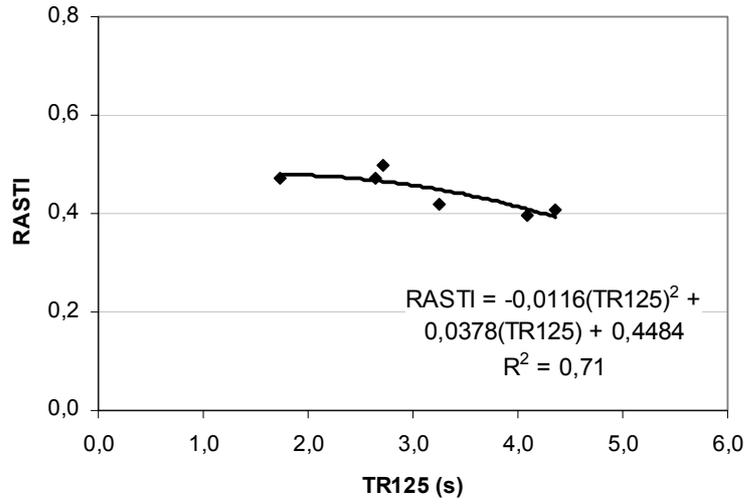
Pontos de medição	RASTI				Distância (m) à Fonte sonora
	1ª vez	2ª vez	3ª vez	média	
1	0,58	0,59	0,59	0,59	7,7
2	0,55	0,55	0,54	0,55	15,5
3	0,46	0,45	0,45	0,45	23,3
4	0,41	0,40	0,40	0,40	31,0

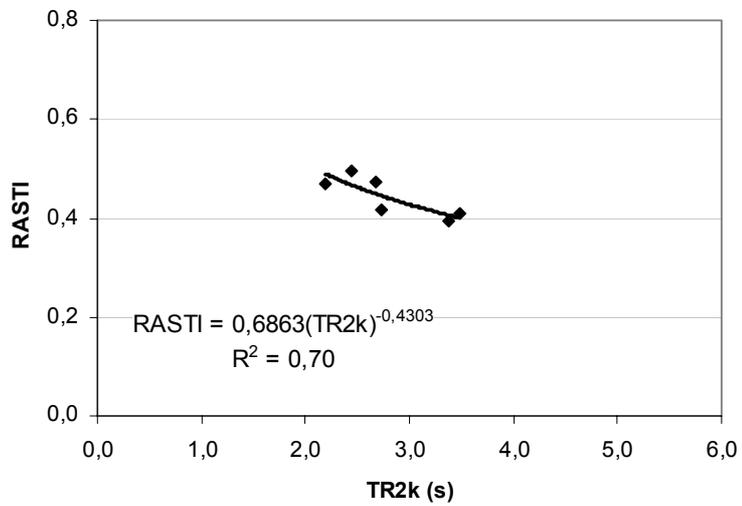
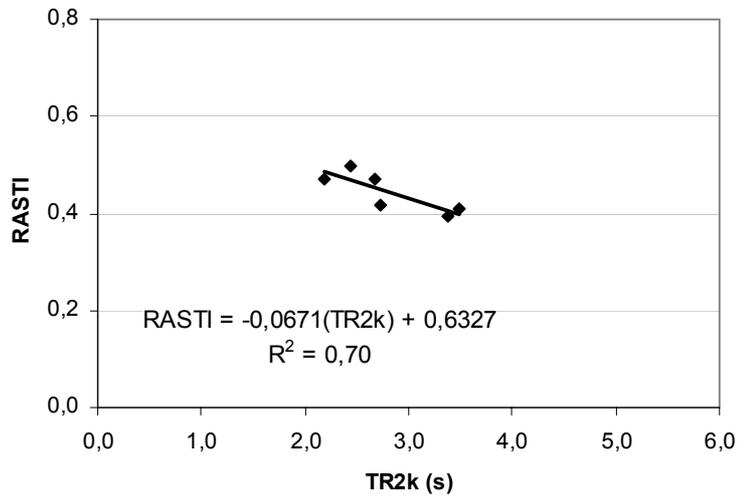
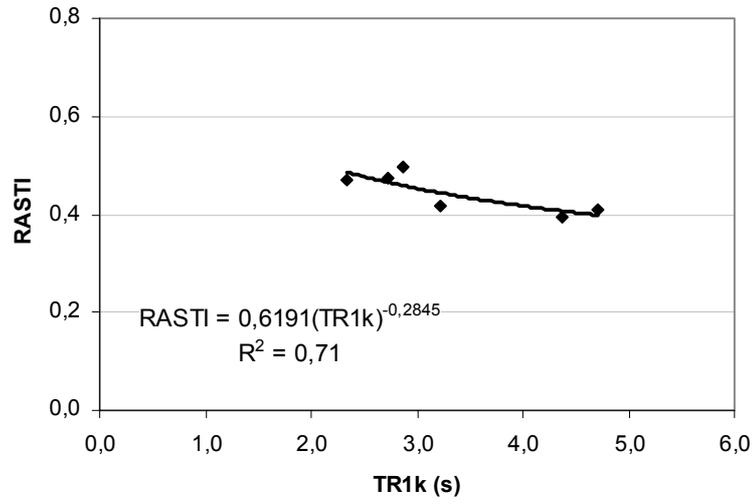
**Observações:**

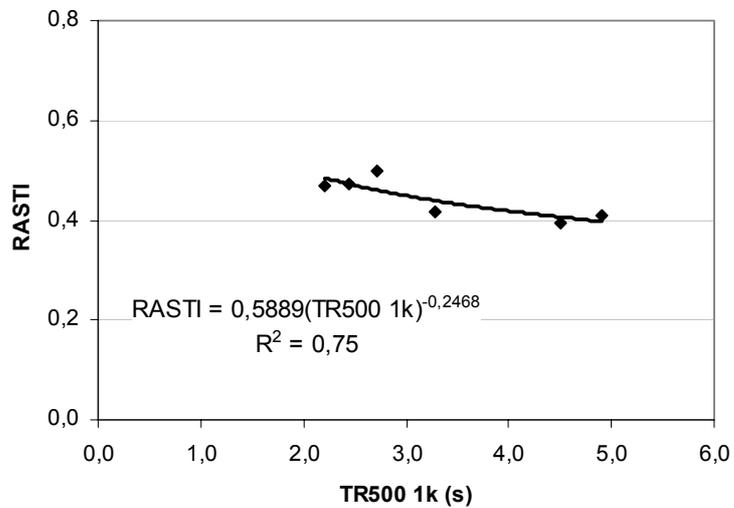
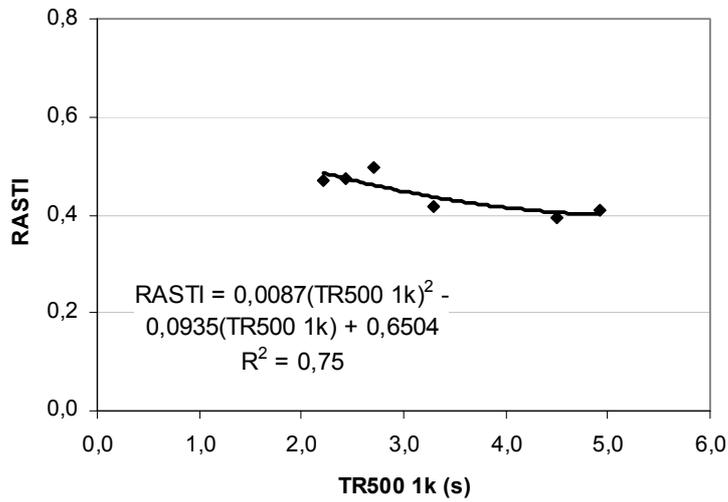
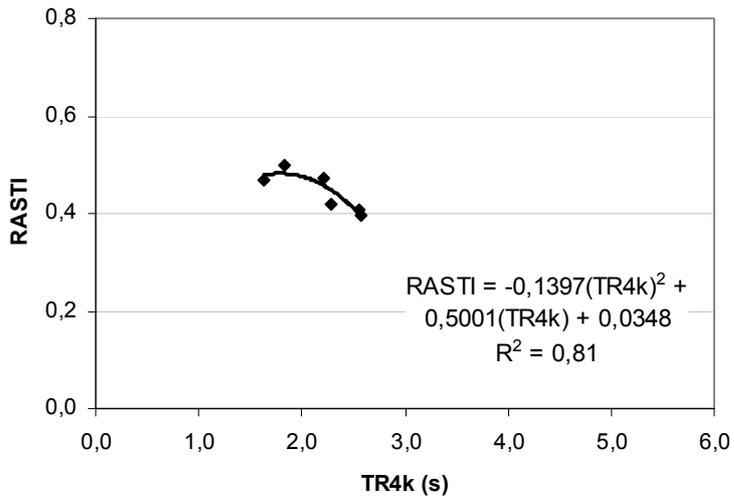


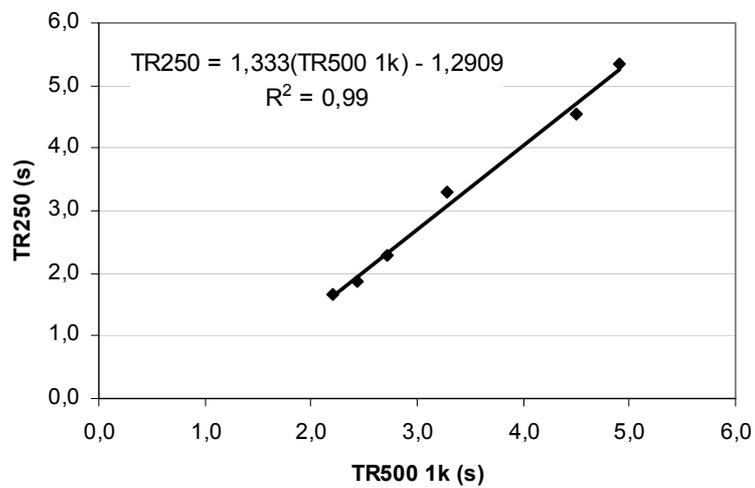
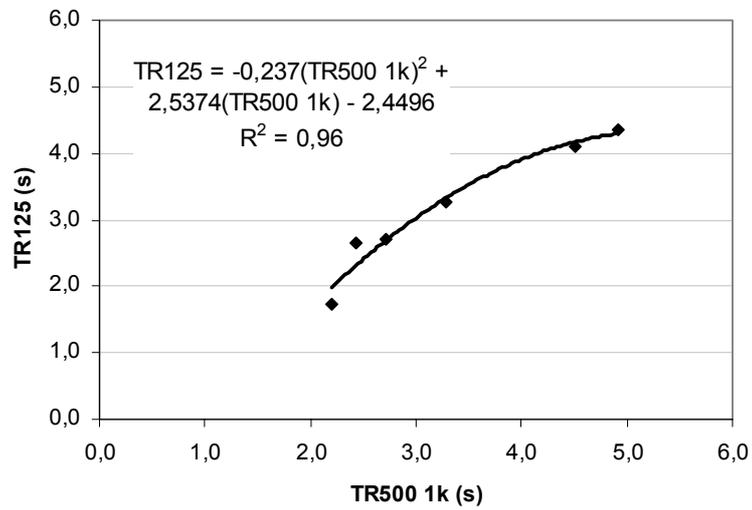
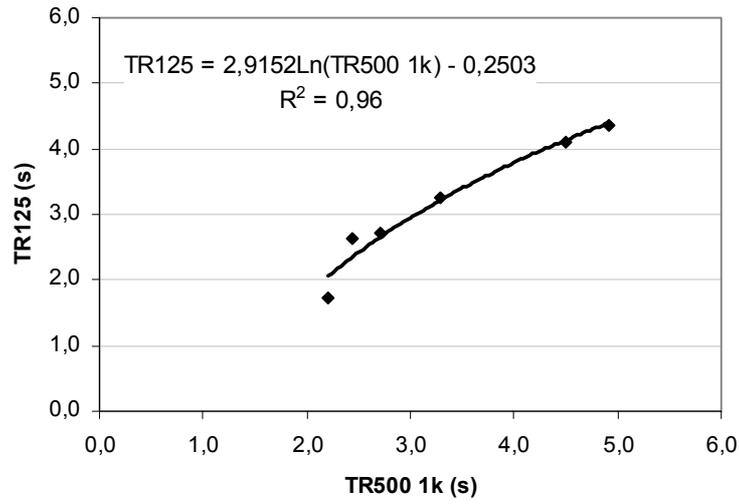
# Anexo C

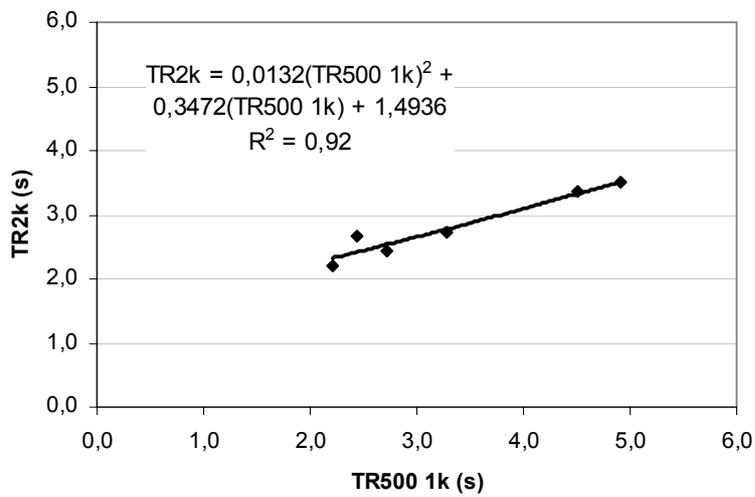
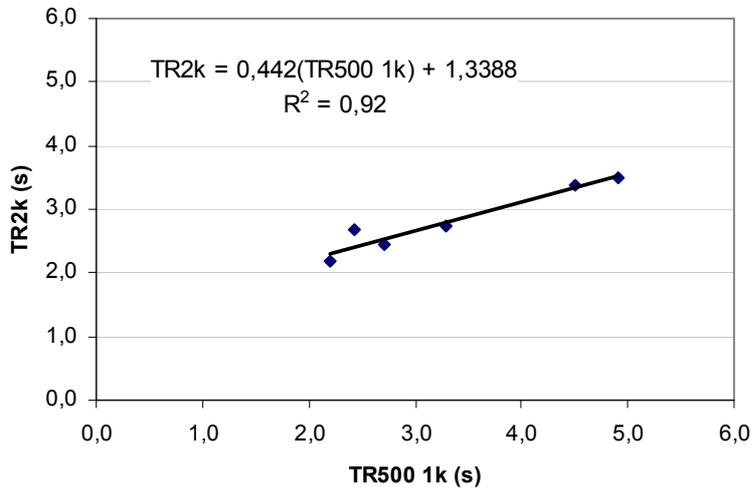
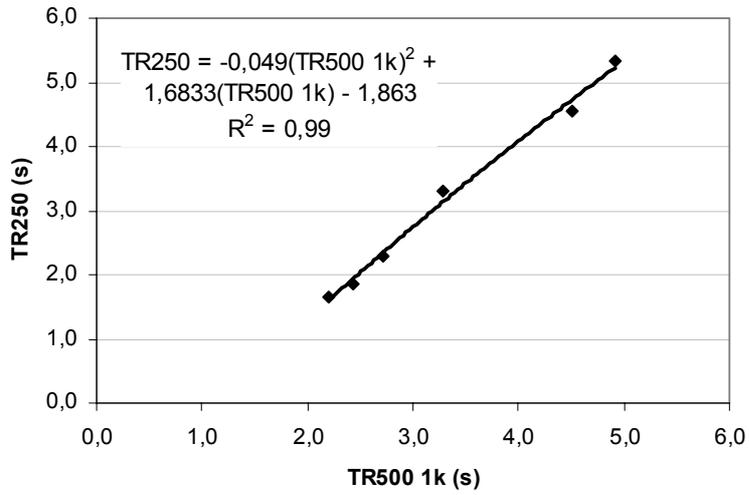
**GRÁFICOS DOS MELHORES  
MODELOS DE REGRESSÃO  
SIMPLES ENTRE OS PARÂMETROS  
ACÚSTICOS TR E RASTI**

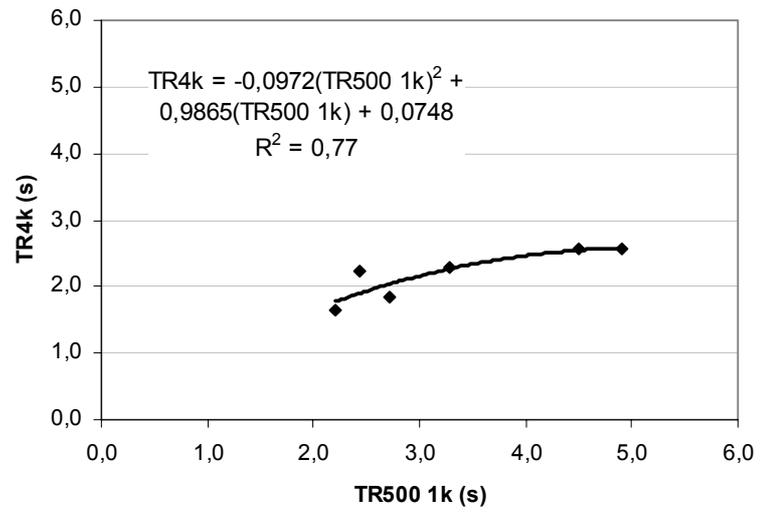








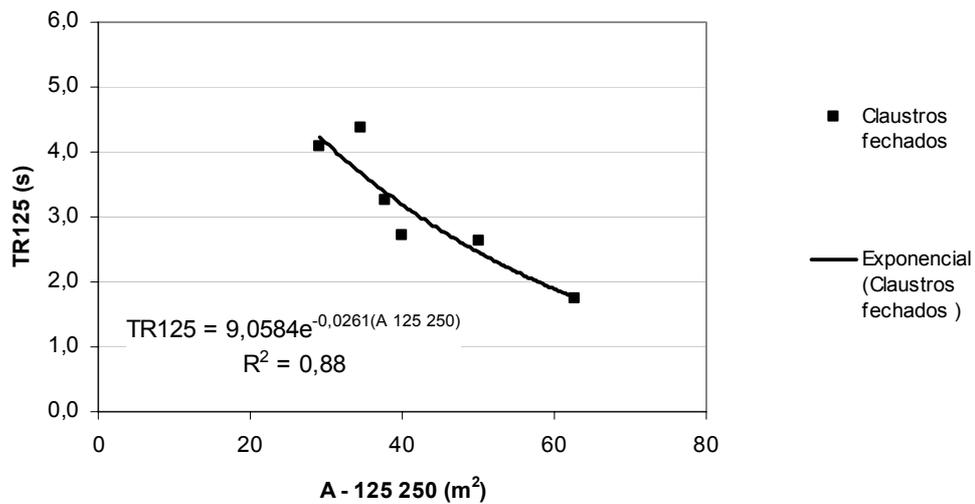
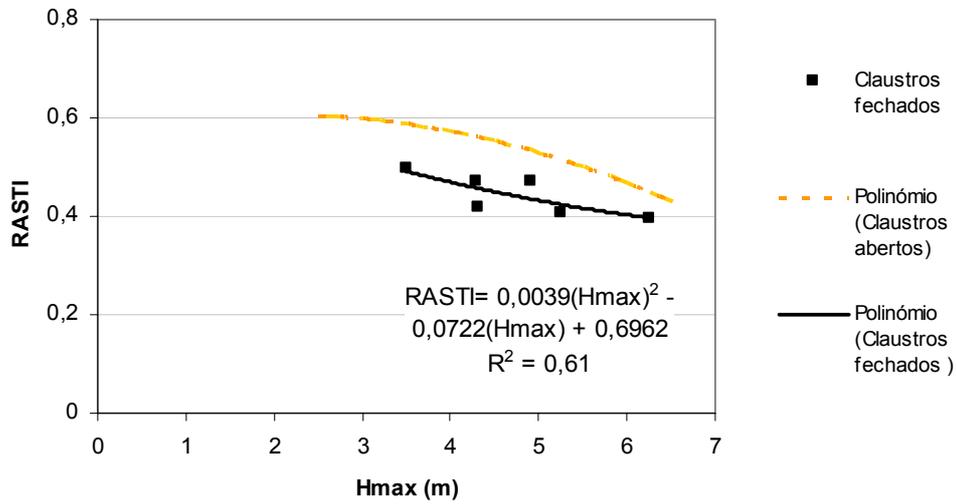
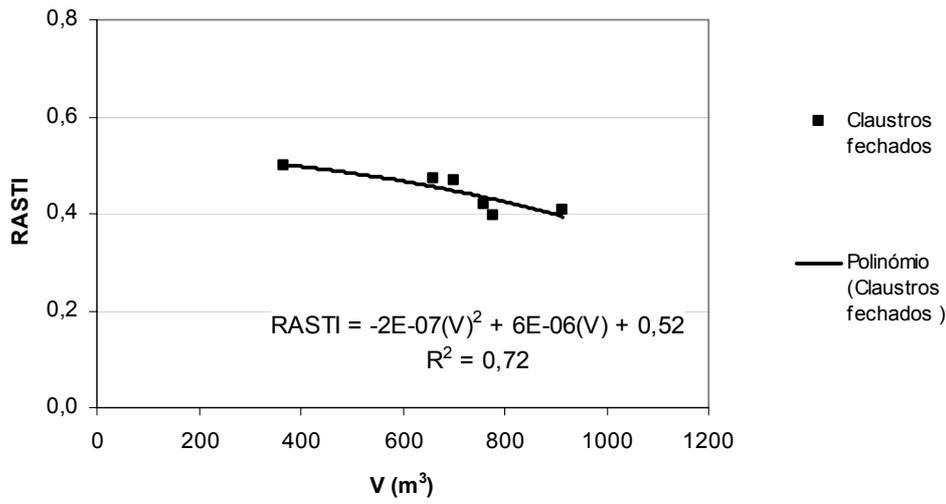


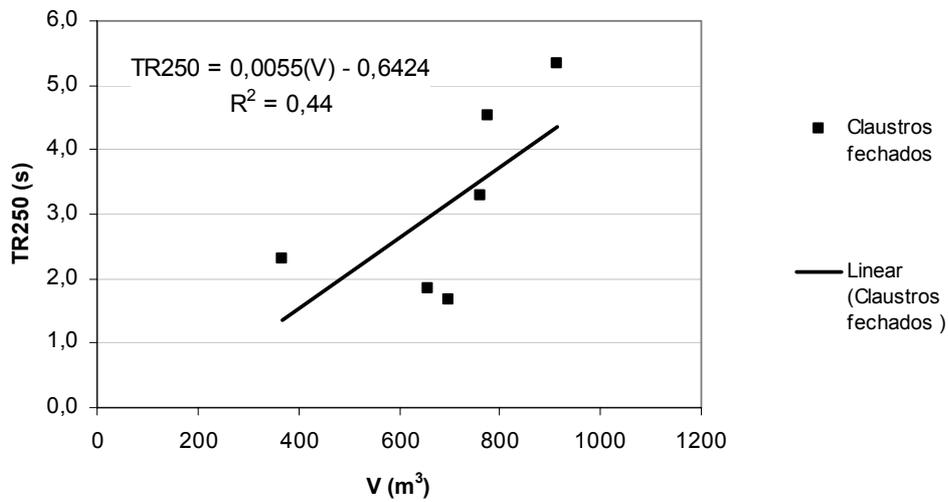
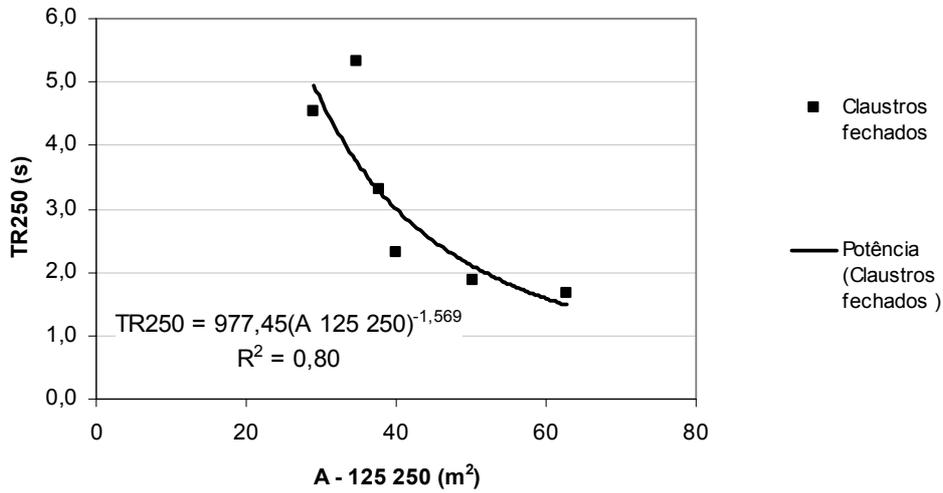
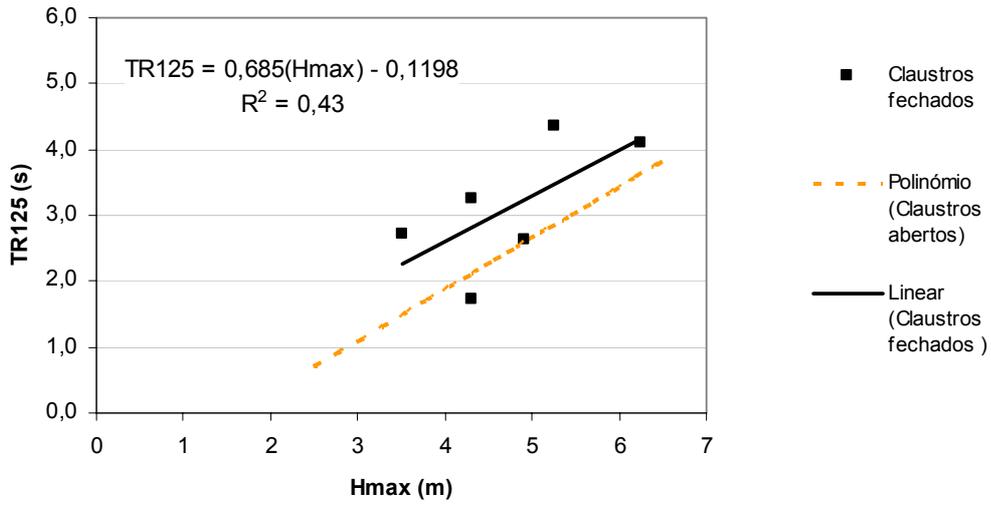


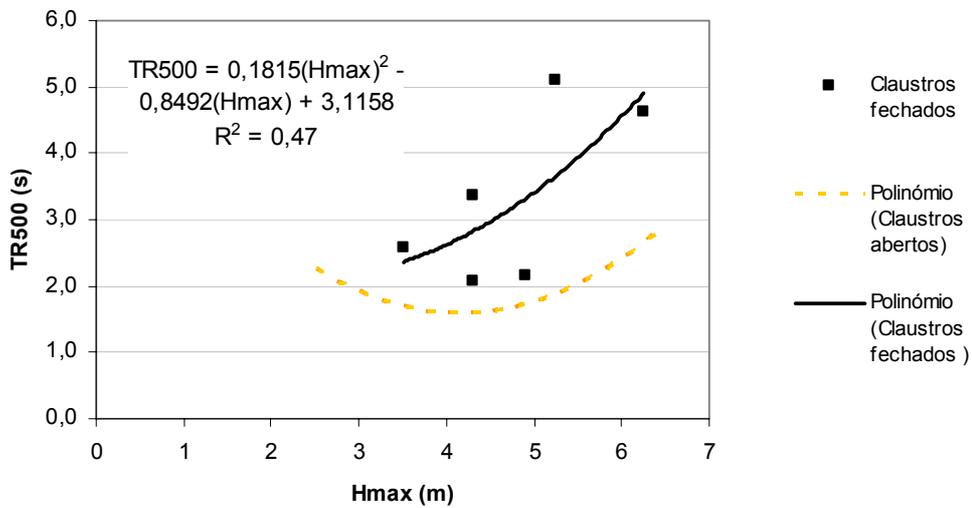
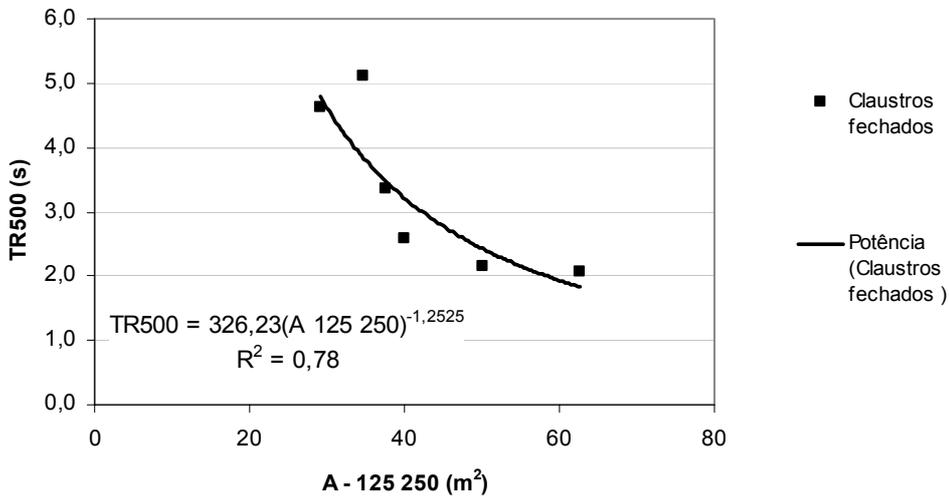
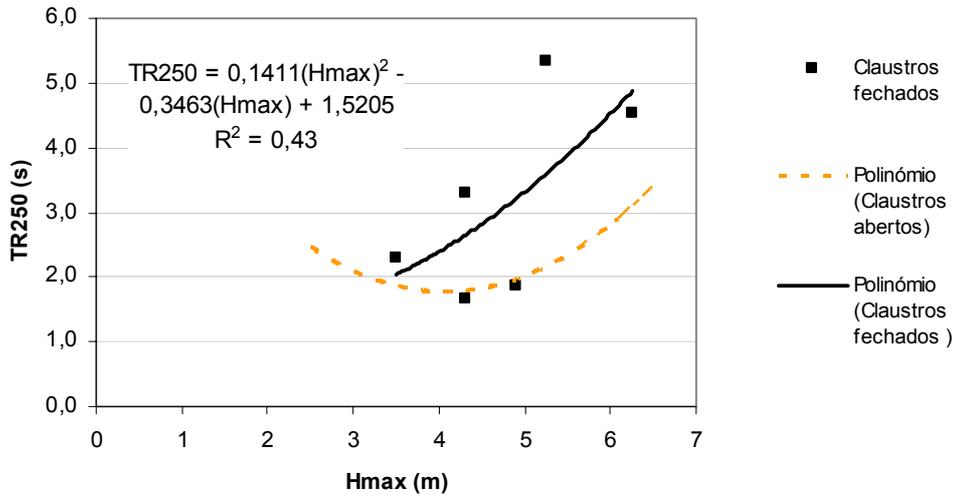


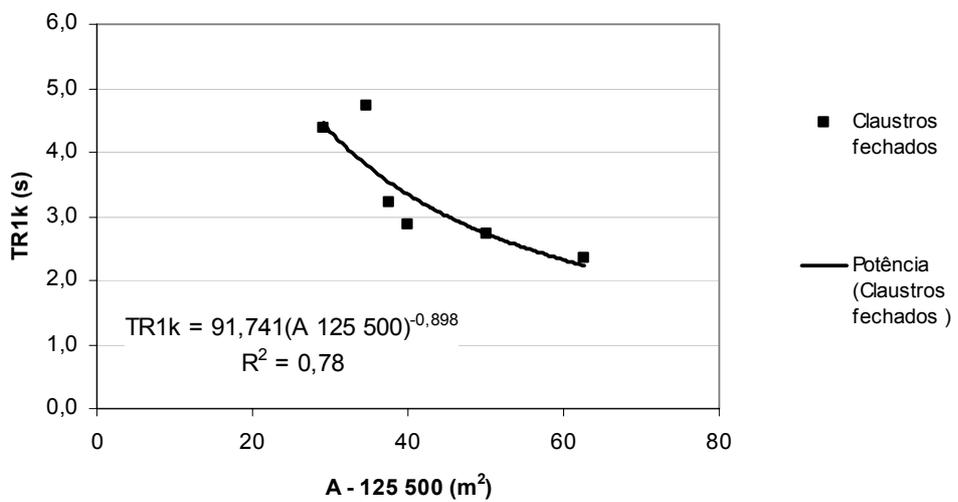
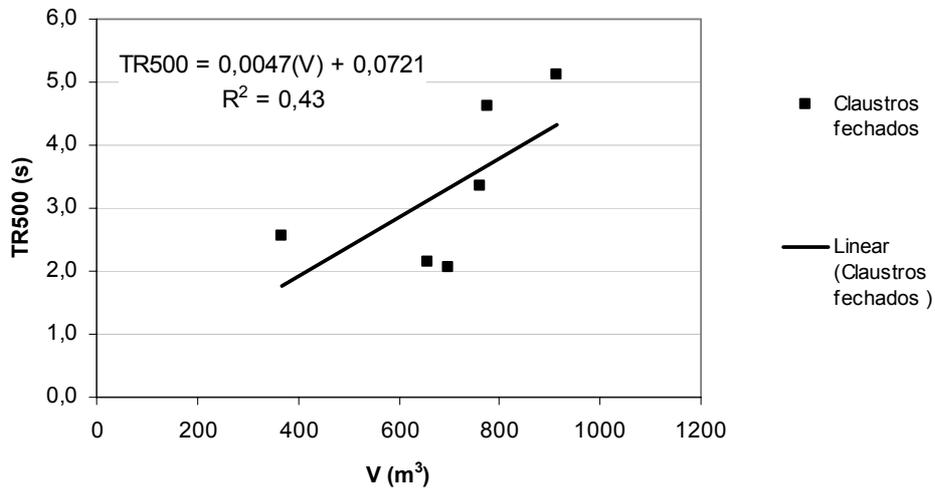
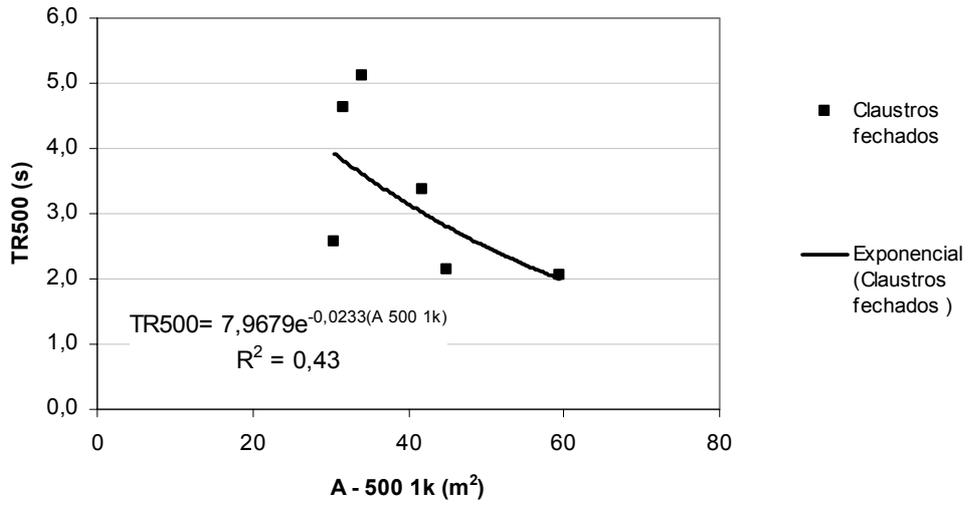
# Anexo D

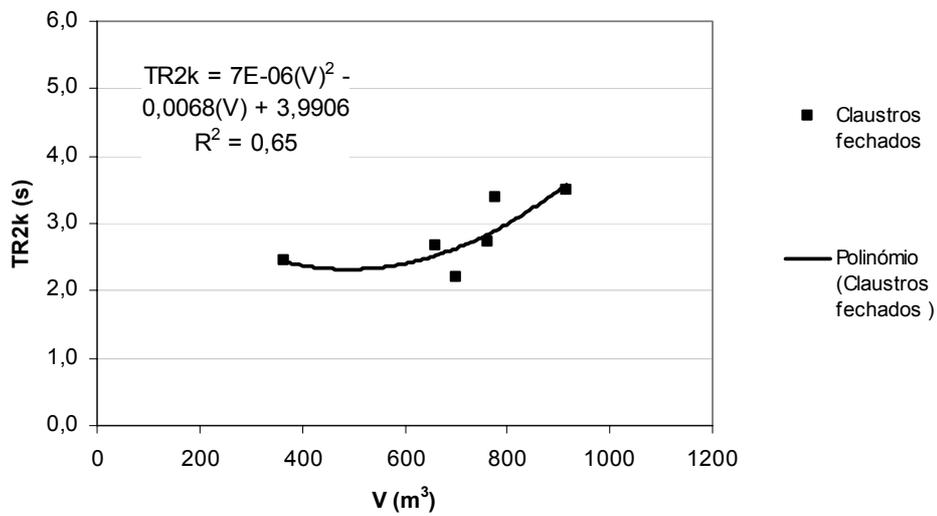
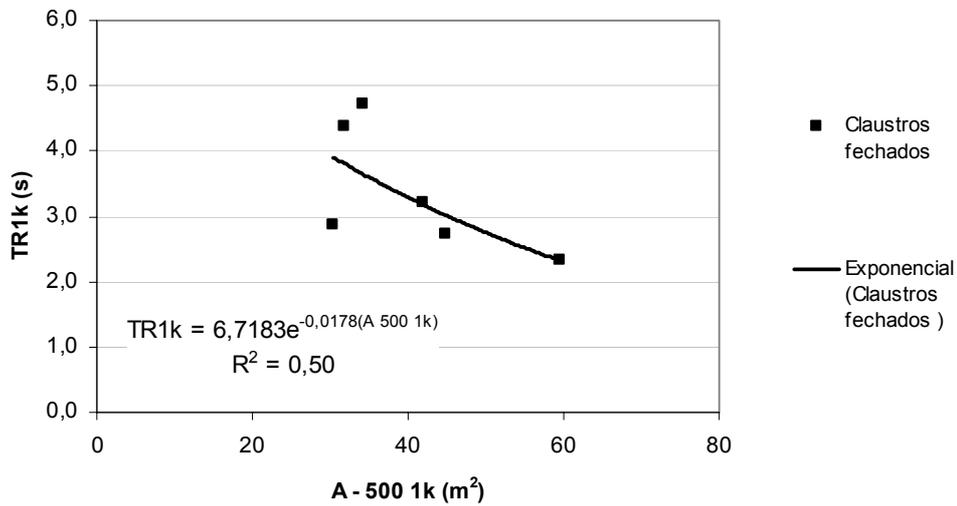
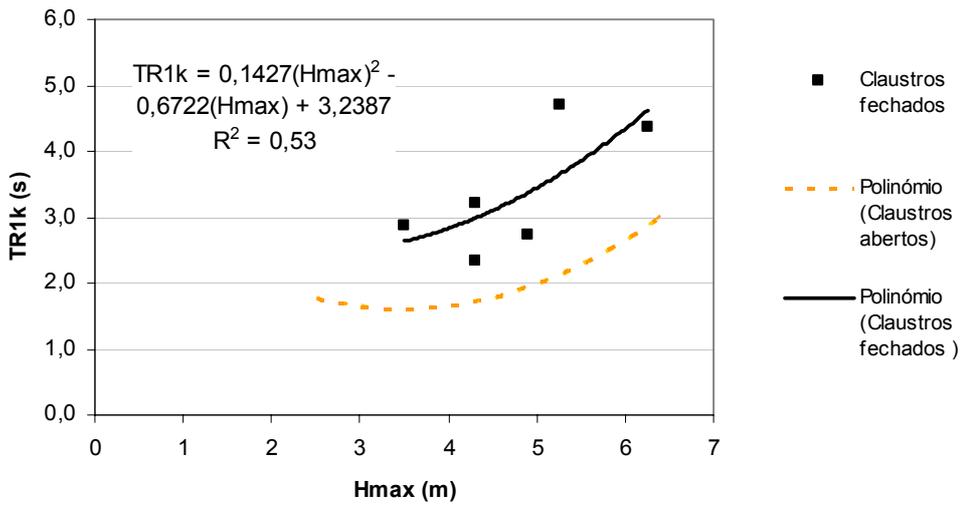
**GRÁFICOS DOS MELHORES  
MODELOS DE REGRESSÃO  
SIMPLES ENTRE OS PARÂMETROS  
ACÚSTICOS TR E RASTI E  
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS**

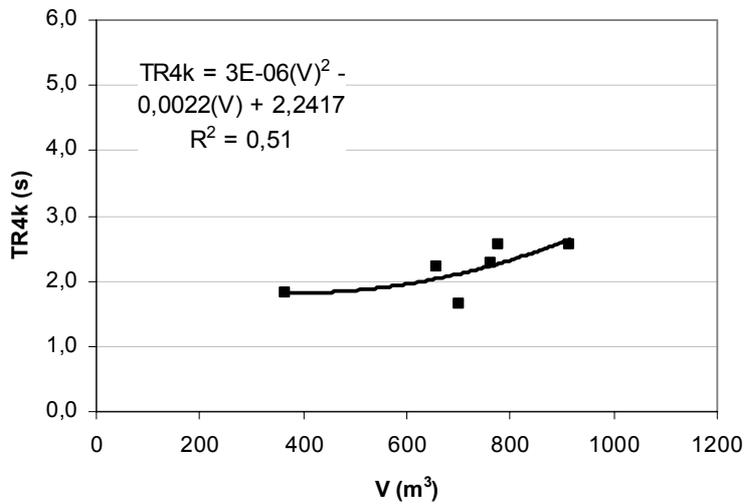
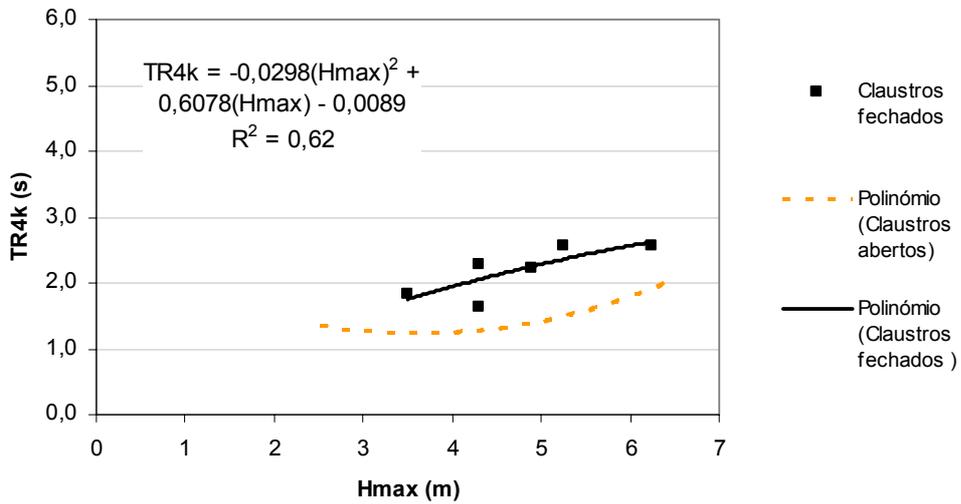
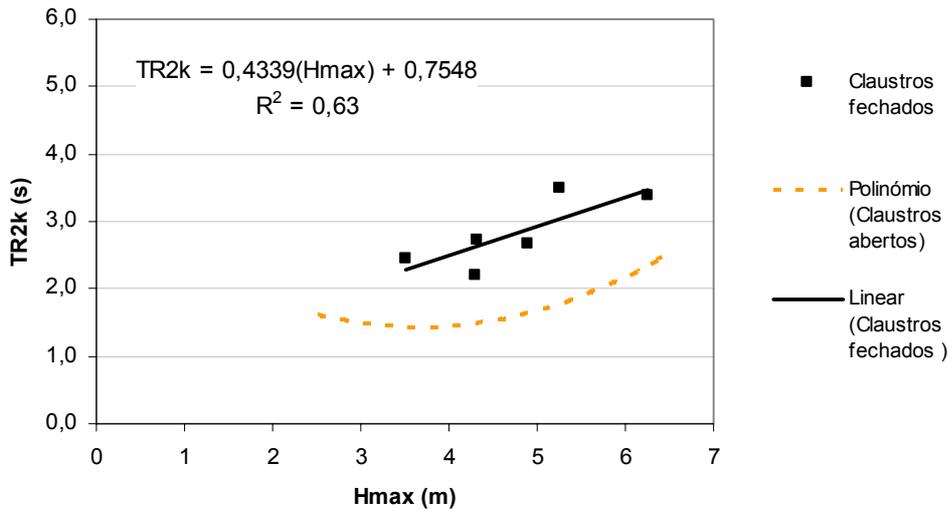


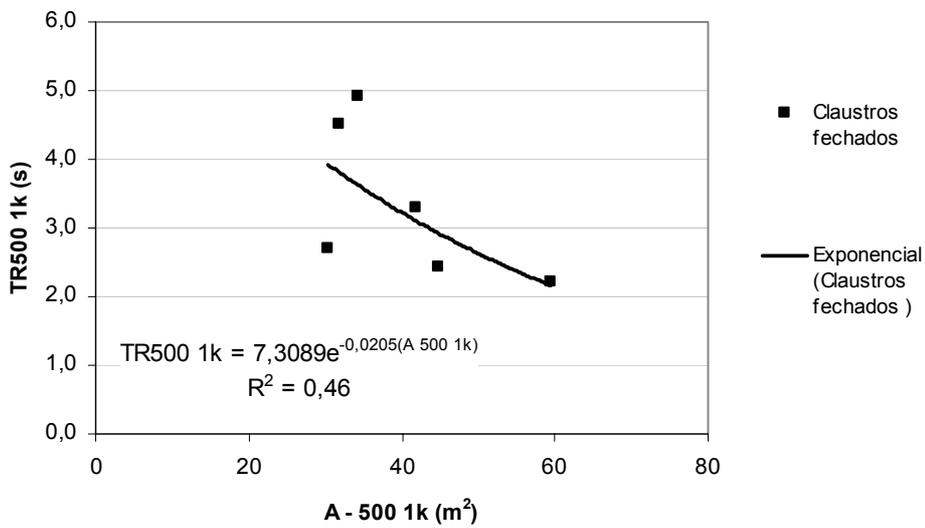
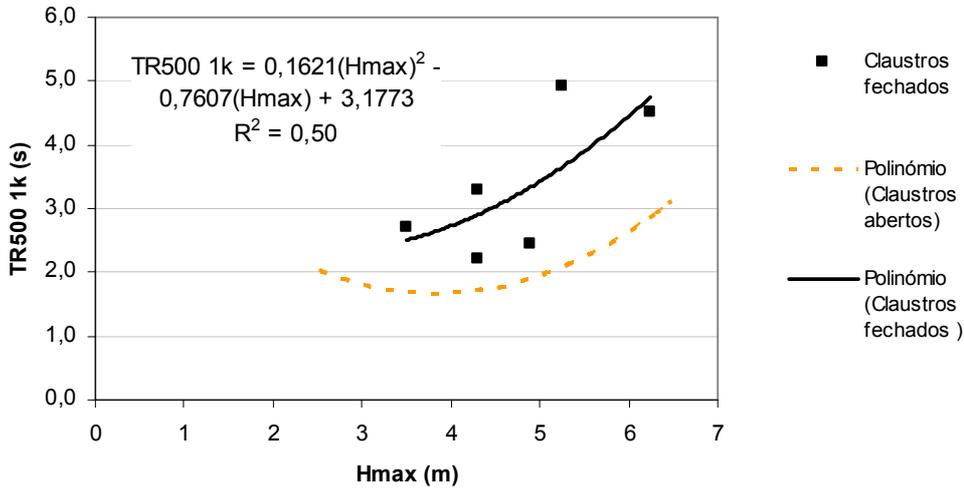
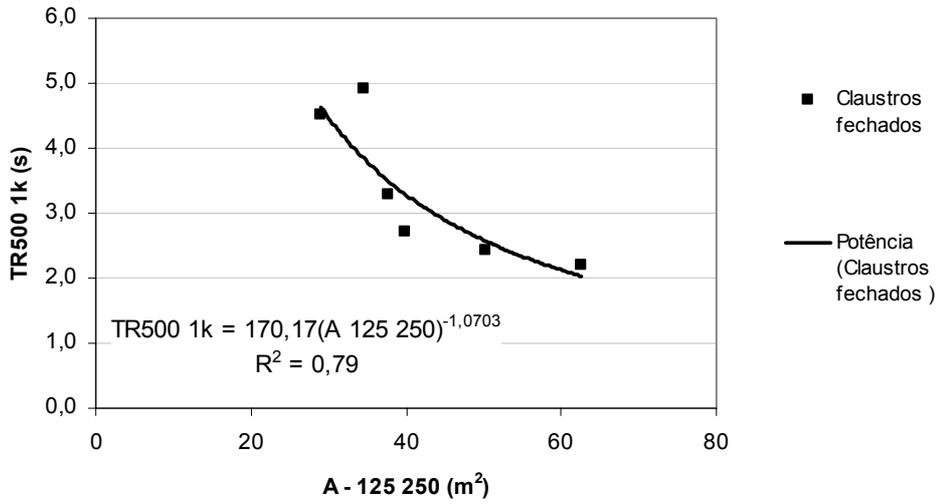


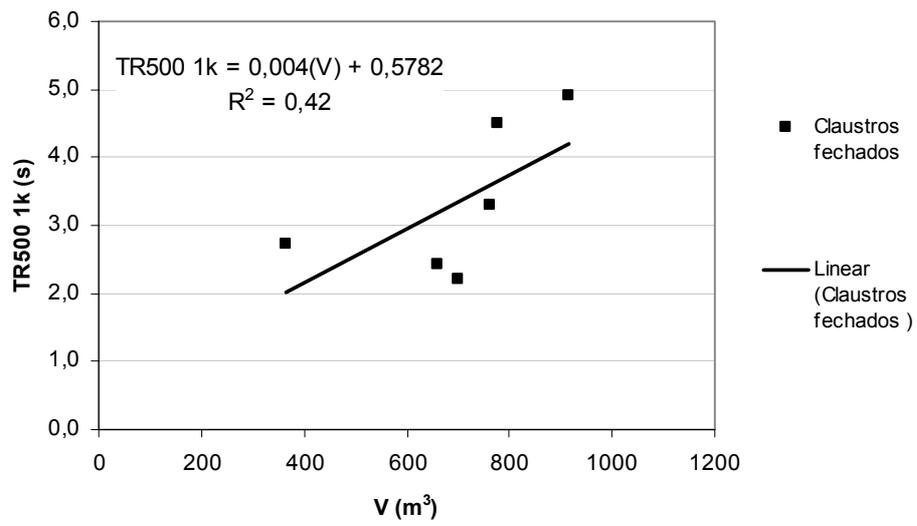














# Anexo E

**GRÁFICOS DAS EXPRESSÕES  
OBTIDAS COM MODELOS SIMPLES  
PARA A VARIAÇÃO NOS VALORES  
DE RASTI E DE TR RESULTANTES  
DO FECHO COM VIDRO DAS  
GALERIAS DOS CLAUSTROS**

