



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

**Contribuições computacionais para o projecto
de edifícios confortáveis**

João Gabriel Reis de Mariz Graça

Orientador: Doutor João Afonso Ramalho Sopas Pereira Bento
Co-orientador: Doutor Helder José Perdigão Gonçalves

Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em Arquitectura

Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado com Muito Bom

Júri

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa
Vogais: Doutora Teresa Frederica Tojal de Valsassina Heitor
Doutor Manuel de Arriaga Brito Correia Guedes
Doutor Helder José Perdigão Gonçalves
Doutor Vasco Nunes Moreira Rato
Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa
Doutor João Afonso Ramalho Sopas Pereira Bento

Março de 2012



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Contribuições computacionais para o projecto de edifícios confortáveis

João Gabriel Reis de Mariz Graça

Orientador: Doutor João Afonso Ramalho Sopas Pereira Bento
Co-orientador: Doutor Helder José Perdigão Gonçalves

Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em Arquitectura

Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado com Muito Bom

Júri

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Doutora Teresa Frederica Tojal de Valsassina Heitor, Professora Catedrática do Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor Manuel de Arriaga Brito Correia Guedes; Professor Associado do Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor Helder José Perdigão Gonçalves, Investigador Principal do Laboratório Nacional de Energia e Geologia; (Co-Orientador Científico)

Doutor Vasco Nunes Moreira Rato, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa, do Instituto Universitário de Lisboa; – RELATOR

Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa, Professor Auxiliar do Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa; – RELATOR

Doutor João Afonso Ramalho Sopas Pereira Bento, Presidente da Comissão Executiva da EFACEC, Especialista na área da tese. (Orientador Científico)

Trabalho parcialmente financiado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia

Março de 2012

Abstract

This work represents a contribution to making design decisions occur through processing of an increasing number of knowledge and in an integrated manner. Thus the architects involved in designing tasks can benefit from the great development that scientific knowledge of the sciences related to the thermal and acoustic comfort in buildings has also benefited in recent years.

The variables of the thermal and acoustic comfort, while emotional experiences that depend on assessments of pleasantness, and can be seen as the same poetic realities that a particular way of seeing the architecture has defined as attributes of the atmosphere of the architecture. This theoretical approach is based, among other sources, upon Peter Zumthor's architectural works.

Taking advantage of the PROLOG features - a computer language that uses a non-deterministic and declarative paradigm, which allows computer representation of knowledge, and which allows Object Oriented Programming as well, providing an hybrid platform - it has been possible to develop a system consisting of several modules, which interact between them. The prototype system developed allows the architect to evaluate an increasing number of the variables which are strongly related with Thermal and Acoustics Comfort inside buildings, and can be used during the architectural design process of a building.

To illustrate this, the work presents a case study based on a project developed by the author in collaboration with the architect Henrique Tavares Chicó, and which refers to a competition of ideas for a Secondary School in Quinta do Peru, in the municipality of Sesimbra.

As conclusions of the study are, among others, the contributions allowed by the developed approach to the architectural design that can benefit from comfort assessments conducted in a knowledge appropriate and rapid way, despite its high complexity.

keywords

Architecture, Comfort, Acoustics, Thermal Performance, Knowledge-Based System, Architectural design, Sustainability, Energy Simulation, Regulations

Resumo

O presente trabalho representa um contributo para que a tomada de decisões de projecto possa ocorrer através do processamento de um cada vez maior número de conhecimentos e de forma integrada. Deste modo os arquitectos empenhados em funções de projecto poderão igualmente beneficiar do grande desenvolvimento que o conhecimento científico das ciências relacionadas com o Conforto Térmico e Acústico dos edifícios tem beneficiado nos últimos anos.

As variáveis do Conforto Térmico e Acústico, enquanto experiências emocionais que dependem de apreciações de agradabilidade, são as mesmas realidades poéticas que uma determinada forma de ver a arquitectura trata como atributos de definição da atmosfera da arquitectura. Esta forma de ver a arquitectura moderna baseia-se, entre outras fontes, na obra do arquitecto suíço Peter Zumthor.

Tirando-se partido das capacidades da linguagem PROLOG, uma linguagem com características declarativas e não-determinísticas que permite a representação computacional de conhecimento, mas que no caso particular escolhido (SWI-PROLOG) tem associada um módulo (XPCE) que integra os conceitos de programação orientada por objectos, foi possível desenvolver o protótipo de um sistema constituído por diferentes módulos que interagem entre si e que permitirão ao arquitecto aumentar de forma significativa o número de variáveis, relacionadas com o conforto, equacionadas durante o processo de concepção de edifícios.

Para ilustrar o trabalho desenvolvido apresenta-se um estudo de caso, relativo a um projecto desenvolvido pelo autor em colaboração com o Arq. Henrique Tavares Chicó, e que se refere a um concurso de ideias para uma Escola Secundária na Quinta do Perú, no concelho de Sesimbra.

Como conclusões do trabalho referem-se, entre outras, as contribuições possibilitadas pela abordagem prosseguida para que a concepção arquitectónica possa beneficiar de avaliações de conforto realizadas de uma forma adequada do ponto de vista cognitivo e célere, pese embora a sua elevada complexidade.

Palavras Chave

Arquitectura, Conforto, Acústica, Térmica, Sistema Baseado em Conhecimento, Concepção arquitectónica, Sustentabilidade, Simulação Energética, Regulamentação

Agradeço ao orientador científico deste trabalho, Prof. João Bento e ao co-orientador, Doutor Helder Gonçalves o apoio que me deram na realização do trabalho desde o seu início. Eles são a premissa mais importante do trabalho.

Aos meus amigos Eng. Jorge Patrício e Eng. Luís Santos Lopes agradeço a confiança que me deram quando quiserem iniciar o projecto de desenvolvimento do programa de cálculo acústico de edifícios, CAEd, com a minha colaboração. Esse programa constituiu o início do trabalho e sem essa experiência nada teria sido possível.

Agradeço também à Prof. Arq. Teresa Valsassina Heitor o apoio que me deu no enquadramento da tese com as questões relativas à Arquitectura.

Agradeço à colega da Unidade Energia no Ambiente Construído (UEAC) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Eng^a Marta Oliveira Panão, a ajuda que me deu com a sua experiência na área da simulação energética de edifícios.

Aos restantes colegas da mesma unidade do LNEG, Susana, Álvaro e Laura, quero agradecer por terem suportado o excesso de trabalho que resultou do facto de eu estar a finalizar o presente trabalho.

Ao colega, amigo, e ex-professor, Arq. Henrique Tavares Chicó, agradeço - no âmbito deste trabalho - a utilização do projecto da Escola Secundária da Quinta do Peru, em que colaborámos, como caso de estudo para realização dos exemplos de teste do software desenvolvido.

Agradeço a Jan Wielemaker pelo desenvolvimento da linguagem SWI-PROLOG, incluindo XPCE, bem como pelo facto de a ter disponibilizado de forma livre ao abrigo de uma licença GPL ¹. O que constituiu também uma premissa essencial da realização do presente trabalho.

Finalmente, agradeço à minha família todo o apoio e incentivo que sempre me deram para a realização deste trabalho.

¹GPL - General Public License

Conteúdo

Preâmbulo	1
Conforto	7
Conforto térmico	7
Incomodidade acústica	9
Legislação e conforto	11
Motivação	13
1 Introdução	15
1.1 Objectivo	15
1.2 Justificação do tema	15
1.3 Estado da arte	17
1.4 Metodologia	18
1.4.1 Avaliação do conforto térmico	18
1.4.2 Norma ISO 7730	19
1.4.3 Norma EN 15251	23
1.4.4 Conforto térmico e sustentabilidade	28
1.4.5 Simulações de conforto térmico	28
1.4.6 Avaliação acústica	31
2 Desenvolvimento do estudo	49
2.1 Módulo comum - common_Editor	51
2.1.1 Funcionalidades do programa common_Editor	55
2.1.2 Breve tutorial de imagens	56
2.1.3 Finalidade do programa common_Editor	59
2.2 Programa e+_Editor	60
2.2.1 Funcionalidades do programa e+_Editor	61
2.3 Programa CAEd	71
2.3.1 Introdução de dados em CAEd	72
2.4 Programa - RctCAD_v2	89
2.4.1 Funcionalidades do programa RctCAD_v2	91
3 Caso de Estudo	99
3.1 Descrição do caso de estudo	99
3.1.1 Descrição da construção	103
3.2 Avaliação do desempenho acústico	106
3.2.1 Cálculo do parâmetro R_w	107
3.2.2 Cálculo do parâmetro $L_{n,w}$	110

3.2.3	Cálculo do parâmetro R'_w de um elemento composto	111
3.2.4	Cálculo do parâmetro $D_{2m,nT,w}$	112
3.2.5	Cálculo do parâmetro $D_{nT,w}$	114
3.2.6	Cálculo do parâmetro $L'_{nT,w}$	125
3.2.7	Cálculo do tempo de reverberação	130
3.2.8	Síntese de resultados do desempenho acústico	132
3.3	Avaliação do conforto térmico	133
3.3.1	Aplicação da norma EN 15251	135
3.3.2	Modelação de espaços arquitectónicos	137
3.3.3	Soluções construtivas em avaliação	138
3.3.4	Resultados das avaliações de conforto térmico	141
3.3.5	Síntese de resultados do conforto térmico	153
4	Conclusões	157
4.1	Exemplo estudado	159
4.1.1	Avaliação acústica	160
4.1.2	Avaliação de conforto térmico	160
4.2	Desenvolvimentos futuros	162
4.3	Benefícios do ambiente de programação adoptado	162

Lista de Figuras

1	Peter Zumthor - Vistas interiores do Pavilhão Suíço na Expo 2000, Hannover	4
2	Curvas PNC (Preferred Noise Criteria) por bandas de frequências	10
1.1	<i>PPD</i> em função do voto previsível médio <i>PMV</i>	22
1.2	Temperatura operativa otimizada, em função de actividade e vestuário	22
1.3	de Dear e Brager - Erro no índice <i>PMV</i>	24
1.4	Humphreys - Temperatura média exterior mensal, °C	25
1.5	Limites da temperatura operativa em edifícios ventilados naturalmente	27
1.6	Diferentes contribuições para a transmissão sonora total de um espaço. “ F ” diz respeito à contribuição marginal (Flanking em inglês), “ D ” diz respeito à contribuição directa. A letra maiúscula identifica o espaço emissor e a letra minúscula o espaço receptor. Imagem re-construída com base na norma EN 12354-1 [34]	34
1.7	Definição dos caminhos de transmissão sonora entre dois espaços. Imagem re-construída com base na norma EN 12354-1 [34]	35
1.8	Definição dos caminhos de transmissão sonora entre dois espaços, sobrepostos ou contíguos. Imagem re-construída com base na norma EN 12354-2 [34]	42
2.1	Arquitectura do sistema informático em desenvolvimento - A partir do <code>common_Editor</code> é possível exportar geometrias para outros módulos, os quais permitirão a realização de diferentes avaliações do desempenho tendo por base uma forma arquitectónica comum	51
2.2	<code>Common_Editor</code> - Ambiente a 3D para visualização do modelo do edifício definido volumetricamente através dos espaços que o constituem	52
2.3	<code>Common_Editor</code> - Caixa de diálogo para criar novo espaço	53

- 2.4 Um espaço é constituído pelas suas superfícies. Selecionando o seu nome ou designação no Editor 3D é possível aceder a um conjunto diversificado de acções para manipular o espaço ou as superfícies. Tais como por exemplo: subdividir superfície existente em outras duas, criar novo volume no espaço a partir de uma superfície existente ou mesmo criar novo espaço adjacente ao existente 54
- 2.5 Janelas, Portas, bem como paredes circundantes são definidas como relações a partir de uma “superfície-mãe” em que se inserem. A alteração de cotas dos pontos da superfície-mãe provoca que os pontos das sub-superfícies são recalculados, devendo manter-se sempre as relações definidas 56
- 2.6 Caixa de diálogo para converter uma superfícies existente em outras duas 57
- 2.7 Resultado obtido depois de adicionada a nova superfície . . 57
- 2.8 Caixa de diálogo para criar novo volume a partir de superfície existente 58
- 2.9 Resultado obtido pela substituição de uma superfície existente por um novo volume 58
- 2.10 Caixa de diálogo para inserir um conjunto de sub-superfícies numa superfície existente 59
- 2.11 Ambiente editor_e+ 61
- 2.12 Caixa de diálogo para inicialização de uma nova zona térmica 62
- 2.13 Zona térmica resultante das definições apresentadas na figura anterior 63
- 2.14 Caixa de diálogo para introdução de uma nova abertura (janela ou porta) 63
- 2.15 Resultado obtido após a introdução de diversos volumes e janelas na zona térmica definida inicialmente 64
- 2.16 Base de dados de Materiais - Nesta fase de desenvolvimento a base de dados está reduzida ao essencial, porém em termos de programação cada novo elemento que se queira acrescentar representa apenas uma nova linha de código . . 66
- 2.17 Resultado obtido após a selecção de um material de tipo “Strutural:Concrete” (betão) na árvore da figura 2.16- O utilizador apenas terá que acrescentar um nome e a espessura pretendida 66
- 2.18 Resultado obtido após a selecção de um material de tipo “Material:Glass” (a), ou “WindowMaterial:Shade” (b), na árvore da figura 2.16. Em (a) O utilizador apenas terá que acrescentar um nome dado que a espessura é implícita nas propriedades do vidro; em (b) o utilizador apenas terá que acrescentar um nome e a distância do vidro ao sombreamento (Shading to Glass distance) 67
- 2.19 Caixa de diálogo para edição de objectos “Construction” possibilitando adicionar ou retirar materiais previamente definidos 67
- 2.20 Caixa de diálogo para edição de objectos “Compact:Schedule” 68

2.21	Caixa de diálogo para edição de objectos “Window:OverHang”	68
2.22	Primeira caixa de diálogo para construção/edição de objectos “WindowProperty:ShadingControl”	69
2.23	Segunda caixa de diálogo para construção/edição de objectos “WindowProperty:ShadingControl”	70
2.24	Ambiente CAEd	73
2.25	Redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogéneos, simples, em função da frequência, <i>in</i> [47], pp 76	75
2.26	Caixa de diálogo para iniciar a definição geométrica de uma fachada e assim poder calcular o parâmetro $D_{2m,nT,w}$	79
2.27	Resultado obtido com caixa de diálogo representada na figura 2.26	80
2.28	Caixa de diálogo para introduzir janelas na fachada	80
2.29	Seleccionando uma determinada superfície (Parede ou Janela) é possível aceder a um menu que permite novas acções entre as quais a introdução de elementos de pequenas dimensões $D_{n,e,w}$	81
2.30	Representação de uma fachada - quando todos os elementos da fachada estão representados no ambiente CAEd é possível executar o cálculo do seu isolamento sonoro, parâmetro $D_{2m,nT,w}$	81
2.31	Caixa de diálogo para iniciar a definição geométrica de um par de espaços emissão recepção e assim poder calcular o parâmetro $D_{nT,w}$	83
2.32	Resultado obtido	83
2.33	Dois tipos de Pares de espaços (Emissão / Recepção) com um conjunto de definições atribuído	84
2.34	Caixa de diálogo para iniciar a representação de um espaço para cálculo do tempo de reverberação	86
2.35	Espaço para cálculo do tempo de reverberação	87
2.36	Ambiente RctCAD com caixa de diálogo para inicialização do objecto edifício (apenas um é admitido por projecto). Requer um nome definido pelo utilizador, o ângulo do eixo “Y” do sistema de eixos do edifício com o Norte geométrico, e o tipo de localização	93
2.37	Caixa de diálogo para Definições Gerais do Edifício	93
2.38	Caixa de diálogo para Definição de uma nova Fracção Autónoma	94
2.39	Caixa de diálogo para inicialização geométrica da nova Fracção Autónoma. O Norte do edifício representa o eixo “Y” no sistema de eixos do edifício	94
2.40	Base de Dados para definição de materiais a utilizar na definição de futuras construções	95
2.41	Após selecção de um item na figura 2.40	95
2.42	Caixa de diálogo para inicializar da definição de novo objecto “elemento construtivo” opaco	96

2.43	Caixa de diálogo para editar “elementos construtivos” iniciados conforme figura 2.42. Possibilita que novos materiais ou espaços de ar bem como a sua localização relativa no interior do elemento construtivo	96
2.44	Caixa de diálogo para inicializar da definição de novo objecto “elemento construtivo” envidraçado	98
2.45	Caixa de diálogo para cálculo do valor “U” de “elementos construtivos” envidraçados	98
3.1	Planta geral - piso Térreo	100
3.2	Imagem tridimensional do corpo Sul do Estudo Prévio realizado	100
3.3	Imagem tridimensional; vista do quadrante Noroeste do Estudo Prévio realizado	101
3.4	Corte do edifício - Esboço desenhado à mão para projecto. Autoria: Henrique Tavares Chicó	101
3.5	Corte perspectivado representando o espaço de aprendizagem informal (Learning Street) e salas de aulas orientadas a Sul - “Croquis” de Henrique Tavares Chicó	102
3.6	Imagem de “rendering” obtida a partir do programa AutoCAD - corpo Sul, zona de salas de aula	102
3.7	Imagem tridimensional do modelo realizado no ambiente gráfico do programa common_Editor	104
3.8	Imagem tridimensional do modelo convertido para o programa e+_Editor	105
3.9	Imagem tridimensional do modelo obtido através de simulação com o programa EnergyPlus	105
3.10	Tabela de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora, a sons de condução aérea, de uma parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico	108
3.11	Gráfico de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora de uma parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico	109
3.12	Tabela de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora, a sons de condução aérea, de uma laje de betão armado com 20cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico	109
3.13	Gráfico de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora, a sons de condução aérea, de uma laje de betão com 20cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico	110
3.14	Tabela de CAEd - Cálculo do nível sonoro normalizado de percussão, de uma laje de betão com 20cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico	110

3.15 Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando a fachada interior da sala de aulas, em contacto com a zona de circulação de acesso	111
3.16 Tabela obtida a partir do programa CAEd, contendo a síntese do cálculo do isolamento sonoro da fachada	112
3.17 Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando a fachada exterior da sala de aulas	113
3.18 Imagem obtida a partir do programa CAEd, tabela de resultados obtidos para o cálculo do isolamento sonoro padronizado entre a fachada exterior (emissão) e a sala de aulas (recepção) - $D_{2m,nT,w}$ aos valores de R_w apresentados já se encontra somado o termo de adaptação do espectro C_{Tr} , em virtude de esta fachada possuir uma percentagem de área translúcida superior a 60%	114
3.19 Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando um par (emissão/ recepção) de espaços de salas de aulas com emissão sobrejacente	116
3.20 Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando um par (emissão / recepção) de espaços de salas de aulas Adjacentes	122
3.21 Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando um par de espaços adjacentes, constituído por uma zona de circulação (emissão) e uma sala de aulas (recepção)	124
3.22 Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando o modelo tridimensional para posterior cálculo do Tempo de reverberação	130
3.23 Planta de um conjunto de duas salas simuladas em termos de conforto térmico e de desempenho acústico	134
3.24 Corte transversal da zona em estudo assinalando-se a sala de aulas intermédia que foi simulada com o programa EnergyPlus	137
3.25 Pormenor construtivo do elemento construtivo separador de duas salas de aulas com emissão sobrejacente	139
3.26 Corte, pela zona do espaço estufa, das salas de aulas em avaliação	141
3.27 Representação tridimensional em ambiente e+_Editor do conjunto de duas salas de aulas referente à solução base - nesta solução não foi prevista a existência do espaço estufa partilhado	144
3.28 Representação tridimensional em ambiente "AutoCAD" do conjunto de duas salas de aulas referente à solução base. Imagem obtida após simulação com o programa "EnergyPlus"	144
3.29 Gráfico de resultados da temperatura operativa e temperatura exterior para a estação de aquecimento	145

3.30	Representação tridimensional em ambiente e+_Editor do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando uma mesma estufa	146
3.31	Representação tridimensional em ambiente “AutoCAD” do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando uma mesma estufa. Imagem obtida após simulação com o programa “EnergyPlus”	146
3.32	Gráfico de resultados da temperatura Operativa e temperatura exterior para a estação de aquecimento	148
3.33	Esquema do colector a ar	149
3.34	Representação tridimensional em ambiente “e+_Editor” do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando um mesmo colector a ar	149
3.35	Representação tridimensional em ambiente “AutoCAD” do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando um mesmo colector a ar. Imagem obtida após simulação com o programa “EnergyPlus”	150

Lista de Tabelas

1.1	escala de valores de PMV	19
1.2	<i>in</i> Norma EN 15251 [24] - Tabela A.1, Anexo A	26
1.3	<i>in</i> Norma EN 15251 [24] - Tabela A.2, Anexo A	26
1.4	Valores limites para a temperatura operativa, na estação de arrefecimento, em função da temperatura média exterior cumulativa, <i>in</i> [24]	27
1.5	Valores limites para a temperatura operativa, na estação de aquecimento, em edifícios escolares, <i>in</i> [24]	29
1.6	Valores limites para ΔT_o , na estação de arrefecimento, em edifícios escolares, <i>in</i> [24]	31
1.7	Junção rígida em X com elementos homogéneos	38
1.8	Junção rígida em T com elementos homogéneos	39
1.9	Junção rígida em X ou T de elementos homogéneos com interposição de elementos resilientes	39
1.10	Junção de Fachada Leve com elemento homogéneo	39
1.11	Junção de elemento leve com elemento homogéneo	40
1.12	Junção de dois elementos leves	40
2.1	Norma EN 717-1, valores de referência iniciais para o ruído de condução aérea	77
2.2	Norma EN ISO 717-2, valores de referência iniciais para o ruído de impacto	78
2.3	Cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} , de uma junção com as superfícies perpendiculares alinhadas	85
2.4	Cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} , de uma junção com as superfícies perpendiculares desalinhadas, formando um “T” virado para a Recepção	85
2.5	Cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} , de uma junção com as superfícies perpendiculares desalinhadas, formando um “T” virado para a Emissão	86
2.6	Método de medição da área de objectos “superfície”	89
3.1	Propriedades físicas consideradas para o cálculo de frequências críticas	108
3.2	Resultados obtidos no cálculo das frequências críticas	108
3.3	Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 1: Junção rígida em T com elementos homogéneos	117

3.4	Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 2: Junção rígida em T (voltado para a recepção) com elementos homogéneos	118
3.5	Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 3: Junção rígida em X com elementos homogéneos	119
3.6	Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 4: Junção em T (voltado para a emissão) de tipo ligação entre elemento Leve e elemento homogéneo. Considera-se que o envidraçado exterior da sala de aulas é um elemento leve . . .	120
3.7	Síntese dos resultados - de $D_{nT,w}$ relativo a um par de espaços (emissão/recepção): duas salas de aulas adjacentes . .	123
3.8	Síntese dos resultados de $D_{nT,w}$ relativo a um par de espaços (emissão/recepção): “zona de circulação/sala de aulas”	124
3.9	Síntese dos resultados - cálculo de $L'_{nT,w}$ do par de espaços com emissão sobrejacente	126
3.10	Síntese dos resultados para o cálculo do tempo de reverberação da sala de aulas	131
3.11	Síntese dos Resultados para os parâmetros aplicáveis do RRAE	132
3.12	Características distintas dos dois tectos falsos	133
3.13	Propriedades térmicas dos materiais opacos	140
3.14	Propriedades térmicas do vidro	140
3.15	Propriedades térmicas das caixas de ar	141
3.16	Síntese dos resultados das avaliações de conforto térmico de Inverno realizadas com o programa EnergyPlus	153
3.17	Síntese dos resultados das avaliações de conforto térmico de Verão realizadas com o programa EnergyPlus	153

Preâmbulo

A arquitectura, enquanto processo de concepção, é uma actividade multi-disciplinar para a qual concorre um grande número de outras disciplinas, consideradas afins. Em face desta característica e da complexidade de algumas dessas disciplinas, é comum verificar-se um tipo de abordagem do projecto de arquitectura que tende a realizar-se por etapas separadas, em que cada uma das tais disciplinas afins é equacionada e tratada de forma autónoma, porém com um esforço de integração posterior.

Esta dificuldade traduz-se frequentemente numa perda de qualidade do projecto de arquitectura, bem como das diversas especialidades dedicadas à resolução das questões de desempenho das diferentes disciplinas envolvidas. Efectivamente, quando não existe uma concepção integrada do conjunto complexo de disciplinas e variáveis que devem ser equacionadas, adoptam-se outras soluções - frequentemente consideradas de recurso - para cumprir de forma satisfatória as exigências de desempenho necessárias à qualidade do produto final, ou impostas pela legislação.

Por outro lado a arquitectura, enquanto produto final, destina-se a uma fruição pelas pessoas que a utilizam que deve motivar, da parte destas, apreciações de agradabilidade, pelo que todas as questões relacionadas com o conforto e bem estar das pessoas no interior dos espaços deverão estar sempre muito presentes na arquitectura. Assim, para que um projecto seja bem sucedido, parece evidente que será necessário introduzir a temática do conforto, logo desde o processo de concepção.

O conforto depende de um conjunto variado de condições, acústicas, térmicas, visuais e de iluminação, entre outros e está relacionado com a forma mais ou menos agradável como o ser humano habita os espaços. As condições de conforto térmico ou de conforto acústico, por exemplo, encontram-se definidas através de variáveis cujo conhecimento está actualmente muito detalhado existindo também legislação exaustiva sobre a matéria.

Uma abordagem da concepção arquitectónica baseada na fenomenologia apresenta pontos de grande proximidade com as definições do conforto nos edifícios, e de acordo com desenvolvimentos recentes encerra em si também os conceitos de multi-disciplinaridade e de percepção multi-sensorial, os quais promovem, desde o início da concepção, uma visão

integradora das diferentes áreas de conforto que devem estar presentes. Assim, particularmente quando se adopta este tipo de abordagem metodológica para o projecto de arquitectura, está-se a alicerçar toda uma filosofia de concepção que à partida deverá considerar os aspectos perceptuais e de conforto como um todo unificado.

Nestes termos, o presente trabalho visa contribuir para promover uma concepção arquitectónica em que as questões de multi-disciplinaridade e de percepção multi-sensorial dentro da perspectiva acima referida possam estar presentes nas decisões dos arquitectos enquanto projectam.

A abordagem metodológica para o projecto de arquitectura baseada na fenomenologia foi desenvolvida pelo teórico de arquitectura Christian Norberg-Shultz [1], que preconiza um retorno às coisas concretas em oposição a construções mentais e abstracções. Quando se refere a coisas concretas pretende indicar também a percepção de um determinado lugar onde não intervêm apenas os fenómenos visuais, mas outros, como a luz o cheiro, os sons e tudo o que contribui para criar um ambiente arquitectónico.

Trabalhos mais recentes de Juhani Pallasmaa [2] representam desenvolvimentos deste mesmo tema que tornam clara a multi-disciplinaridade da arquitectura bem como o conceito de percepção multi-sensorial.

Pallasmaa critica aquilo a que chama de “ocularcentrismo” e que consiste, não em considerar a percepção visual como o sentido mais importante do ser humano, mas em considerar os aspectos visuais como autónomos em relação aos outros sentidos. Pallasmaa afirma que *Esta separação e redução fragmenta a complexidade inata, bem como a compreensão e a plasticidade do sistema perceptual reforçando o sentido se separação e alienação.*

Para Pallasmaa assume grande importância a relação do corpo humano no espaço como método de medição e aferição das nossas sensações. É através do corpo que medimos o espaço: por exemplo, através dos passos que, segundo a nossa leitura, são necessários para atingir um determinado ponto que tomamos consciência de quão longe está um elemento da paisagem. Refere ainda que uma experiência espacial significativa implica a participação de todos os sentidos, os quais não se restringem aos cinco sentidos que estamos habituados a considerar.

Dentro desta temática da fenomenologia, Pallasmaa identifica alguns arquitectos cuja obra não se limita ao domínio do sentido visual, mas que reconhece o papel do ouvido, do tacto e do sabor, designando este tipo de arquitectura por “arquitectura do músculo e da pele”. Como exemplos do movimento moderno refere: Alvar Aalto e Frank Lloyd Wright, e como exemplos contemporâneos: Glenn Murcutt, Steven Holl e Peter Zumthor (prémio Pritzker 2009).

Aalto é citado como um excelente exemplo de preocupação com os aspec-

tos multi-sensoriais. Os seus pormenores construtivos são desenhados para o toque da mão, convidam à experimentação do corpo e criam uma intimidade acolhedora. Também os espaços que projecta convidam à descoberta muscular.

Estas preocupações relativas aos múltiplos aspectos dos sentidos estão também presentes nalguns escritos, citados por Pallasmaa:

Preocupações com a percepção da luz e do som - Uma peça de mobília que faz parte do habitat diário de uma pessoa não deve causar excesso de brilho (ou encandeamento), devido à reflexão da luz; nem deve ser inconveniente em termos de absorção sonora;

Preocupações com a transmissão de calor - Uma peça que toma um contacto íntimo com uma pessoa, uma cadeira, não deverá ser construída com materiais que sejam excessivamente condutores de calor.

Esta preocupação de Aalto, relativamente à condutibilidade dos materiais de uma cadeira, encontra paralelo com as variáveis do conforto térmico, pondo em evidência que o corpo humano perde calor por condução, radiação, convecção e evaporação e que é determinante que esse conjunto de perdas se realize sem acentuadas assimetrias relativamente a estas acções.

Também nas obras arquitectónicas de Peter Zumthor tal como na sua obra escrita, podemos encontrar numerosos exemplos de proximidade entre a abordagem fenomenológica e as variáveis e definições de conforto, térmico, acústico ou de iluminação. São preocupações marcantes de Zumthor os aspectos sensoriais da experiência arquitectónica, como o toque da pedra - propriedades respeitantes ao sentido do tacto - o cheiro o gosto, mas também as sensações térmicas e acústicas e o tratamento da luz natural.

Em “Atmosferas” [3], Zumthor refere o seguinte:

O que é no fundo a qualidade arquitectónica?... A qualidade arquitectónica para mim não significa aparecer nos guias arquitectónicos, ou na história da arquitectura, ou ser publicado, etc. Qualidade arquitectónica só pode significar que sou tocado por uma obra. Mas porque diabo me tocam estas obras? E como posso projectar tal coisa? Como se podem projectar coisas assim que têm uma presença tão bela e natural que me toca sempre de novo. A denominação para isto é a atmosfera...

A experiência arquitectónica pode assim ser vista como uma experiência emocional que, na obra teórica de Zumthor, não se resume apenas aos aspectos visuais da arquitectura, mas a outros aspectos como a experiência térmica, acústica e de iluminação dos espaços, entre outros.

No pavilhão Suiço da Expo 2000 em Hannover [Figuras 1a e 1b] - também conhecido como “The Swiss sound box”; em vez de se mostrar informações teóricas ou virtuais para promover a Suíça - a ideia básica foi a de oferecer algo concreto para os visitantes da Expo, que estariam cansados

de estudar todas as mensagens de outros pavilhões nacionais: um lugar acolhedor para descansar, um lugar para ser apenas, um lugar que oferecesse um pouco de algo saboroso da Suíça para os visitantes com sede ou com fome, e música ao vivo desconectada, movendo e alterando todo o espaço, num ambiente descontraído.

Tomando a sério o tema da Expo “A sustentabilidade”, foram construídas fora do pavilhão de 144 km de madeira com uma secção transversal de 20 x 10 cm, totalizando 2.800 metros cúbicos de lariço e pinheiros de florestas suíças, montadas sem cola, parafusos ou pregos. Apenas se preparou com cabos de aço, em que cada feixe era pressionada para baixo. Após o encerramento da Expo, o edifício foi desmontado e as vigas de madeira vendidas (Figuras 1a e 1b).

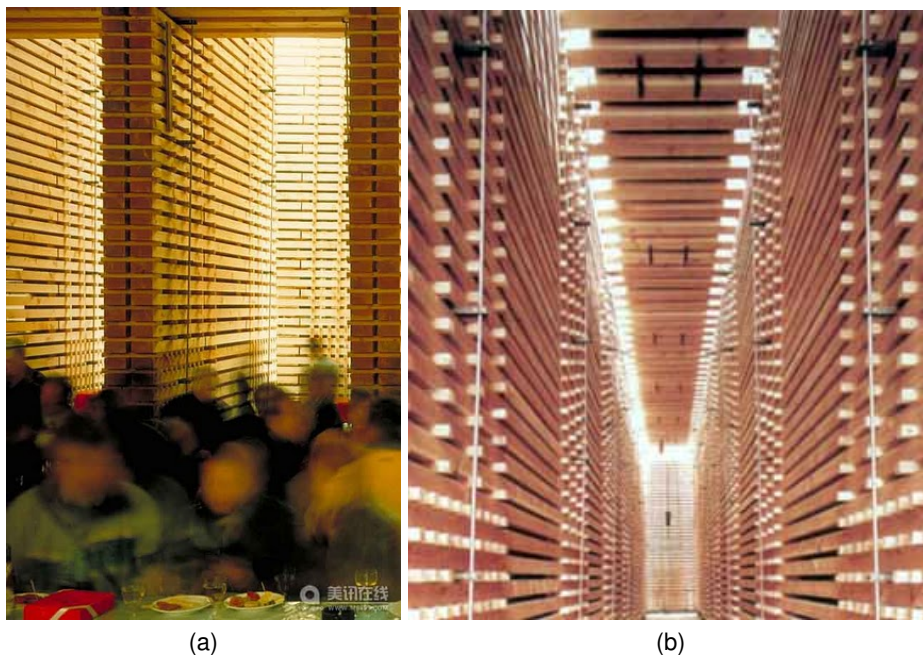


Figura 1: Peter Zumthor - Vistas interiores do Pavilhão Suíço na Expo 2000, Hannover - fotos de Thomas Flechtner

A qualidade acústica dos espaços depende de muitas variáveis, mas depende sobretudo do tipo de utilização que vai ter o espaço. Em certos casos exige-se apenas intimidade, pelo que o espaço deve estar defendido de ruídos provenientes do exterior. Num espaço dedicado à música - como este pavilhão da Suíça na Expo 2000 de Hannover - as exigências tornam-se muito mais complexas.

Beranek [4] sustenta que a variável “tempo de reverberação” - que é uma característica dos espaços - desempenha um papel muito importante na qualidade acústica desses mesmos espaços. O tempo de reverberação é

definido como o tempo necessário para que um determinado som baixe 60dB, após a sua emissão, num determinado espaço.

O som emitido por uma fonte atinge o ouvido humano em primeiro lugar através da sua radiação directa, e num segunda fase depois de se inter-reflectir nas paredes que formam o espaço fechado. Estas reflexões podem exercer-se numerosas vezes, como refere Beranek, sendo que em cada uma delas perde-se alguma energia sonora, até que o som se dissipa totalmente.

Para que haja qualidade acústica num determinado espaço é necessário que o som não permaneça demasiado tempo no interior desse mesmo espaço. Se o tempo de reverberação for elevado e a peça de música exigir que as notas sejam dadas com muita rapidez, poderá acontecer que os sons emitidos sejam mascarados pelos que foram dados nos tempos anteriores. Este fenómeno acontece particularmente quando a intensidade do segundo som emitido é inferior à intensidade do som que ainda se encontra a reverberar num determinado momento.

Porém, alguma reflexão do som é necessária para este não seja demasiado seco, semelhante ao som que se produz no exterior em que toda a energia sonora é dissipada logo após a transmissão directa. As inter-reflexões que atingem o ouvido humano nos primeiros mili-segundos após a chegada do som directo, contribuem para reforçar a percepção original.

A madeira é um material que permite uma reflexão do som moderada, os seus coeficientes de absorção sonora no domínio da frequência podem oscilar entre valores de 0,3 [a 125Hz] e 0,05 [a 4kHz] dependendo também do suporte onde está apoiada.

Neste edifício tendo em atenção a solução arquitectónica, podemos compreender que ele deverá ter um bom desempenho acústico tal como é seu objectivo. Os barrotes de madeira foram dispostos nas paredes deixando entre si algumas aberturas que correspondem às sambladuras de encaixe da madeira. Através destes espaços de ar parte do som é dissipado.

Efectivamente parte das ondas sonoras são reflectidas, mas outra parte é dissipada quando toma o caminho proporcionado pelas aberturas entre barrotes. Através das múltiplas inter-reflexões de som, que ocorrem no tardoz destas paredes semi-ocais que delimitam o espaço, e da perda de energia sonora que se verifica em cada reflexão, é possível compreender que uma parte significativa das ondas sonoras emitidas são dissipadas com este sistema construtivo.

Referindo-se também ao Pavilhão da Expo 2000 em Hannover, Peter Zumthor[3] descreve a temperatura do espaço como um atributo da atmosfera arquitectónica da seguinte forma:

“Acredito que cada edifício tem uma certa temperatura. Para a execução do pavilhão da Suíça em Hanôver utilizámos muita madeira, muitas vigas

de madeira. E quando havia calor estava fresco neste Pavilhão como numa floresta, e quando fazia frio, havia mais calor lá dentro do que lá fora, mesmo não estando fechado. O facto de que os materiais retiram mais ou menos do nosso calor corporal é conhecido. Histórias de como o aço é frio e por isso retira calor...”

Verifica-se portanto que a abordagem fenomenológica da Arquitectura anseia tornar presente nas pessoas que utilizam os espaços de arquitectura um conjunto variado de emoções que encontram a sua raiz, na forma, nas sensações acústicas, térmicas, ou de iluminação que caracterizam os espaços e assim definem no seu conjunto a atmosfera desses mesmos espaços.

Muitos outros exemplos poderiam ser aqui mencionados das obras de grandes arquitectos, quer do movimento moderno, quer da arquitectura contemporânea preocupados com a abordagem fenomenológica, e com a multiplicidade de sensações que fazem a nossa percepção do espaço da arquitectura. Porém, o objectivo destes exemplos é evidenciar o facto de que estes fenómenos têm também uma interpretação científica que o arquitecto deve dominar com o objectivo de ser mais rigoroso na sua intencionalidade.

Como refere Susana Silva Pereira [5] Um conhecimento científico aprofundado dos fenómenos e parâmetros do conforto humano poderá contribuir para comprovar as observações subjectivas que os teóricos da fenomenologia realizaram.

O arquitecto que tenha um conhecimento aprofundado dos fenómenos físicos relativos às trocas de calor entre o corpo do ser humano e o ambiente, ou dos aspectos de qualidade acústica dos espaços, poderá ser muito mais bem sucedido na realização de um espaço com uma atmosfera agradável, do que aquele que não possua esse conhecimento.

À semelhança do tacto, os sensores térmicos estão no interior da pele. A sensação de calor ou frio que o contacto com a temperatura de uma superfície exterior proporciona, depende da velocidade com que o calor sai do corpo humano e não da sua temperatura efectiva. Assim se explica que num mesmo espaço, onde ao fim de algum tempo as temperaturas tendem a estabilizar-se, diferentes objectos com diferentes condutibilidades térmicas proporcionem diferentes sensações de frio ou calor, conforme observou Alvar Aalto. Do mesmo modo o corpo humano pode perder calor por radiação para paredes de materiais com uma absorvidade elevada, que estejam próximos, ou ainda beneficiar de pequenas brisas que promovem a convecção no interior dos espaços de habitação, ou ainda beneficiar de efeitos evaporativos provenientes de espelhos de água ou outras fontes em pátios interiores adjacentes às habitações.

Controlar de forma rigorosa toda esta riqueza de interacções térmicas ou acústicas deve ser objectivo de um arquitecto que aborde a percepção de

forma integrada e multi-sensorial dentro da perspectiva de Aalto, Pallasmaa, ou Zumthor.

Conforto

Encarando-se o conforto como uma experiência emocional com grande influência nas apreciações de agradabilidade dos espaços, dentro de uma perspectiva multi-sensorial, parece evidente que esta variável deva ser uma preocupação muito relevante nos actos próprios da concepção arquitectónica.

Acresce que, no que se refere ao desempenho térmico, se os arquitectos projectarem os edifícios a pensar em otimizar o conforto térmico e se conseguirem atingir esse objectivo apenas com meios passivos estarão a contribuir para uma redução significativa das necessidades de climatização desses mesmos edifícios.

Conforto térmico

De acordo com J. L. M. Hensen[6] o conforto térmico é geralmente definido como uma condição mental que expressa um estado de satisfação com o ambiente térmico envolvente. Pelo contrário a insatisfação deve-se a que o corpo esteja demasiado quente ou demasiado frio. A insatisfação pode também dever-se ao facto de uma parte particular do corpo estar excessivamente quente ou fria.

Desde as primeiras investigações (Fanger[7], McIntyre[8], Gagge[9]) que a experiência do conforto é vista como o resultado do balanço térmico que se realiza no corpo humano e que é influenciado por:

- parâmetros ambientais, tais como temperatura do ar ambiente (T_a), temperatura radiante média (T_r), velocidade do ar (v), e humidade relativa (hr);
- parâmetros relativos ao indivíduo, tais como nível de actividade ou taxa metabólica (M) (unidades : $1\text{met} = 58\text{W}/\text{m}^2$), e resistência térmica do vestuário (I_{cl}) (unidades : $1\text{clo} = 0,155\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)

O corpo humano produz calor devido à acção do seu metabolismo - os alimentos absorvidos pelo ser humano combinam-se com o oxigénio, gerando energia e produzindo continuamente calor. Também realiza trocas de calor com o ambiente (principalmente por radiação e convecção) perdendo calor pela evaporação de fluidos corporais. Possui ainda um conjunto de mecanismos termo-reguladores que desencadeiam respostas automáticas (independentes da vontade) com o objectivo de regular as perdas de calor pelo corpo e a produção interna de calor, esses mecanismos dividem-se em 3 grupos:

- regulação vascular (vaso-constricção em caso de frio e vaso dilatação em caso de calor);
- transpiração;
- produção metabólica extraordinária devido ao frio (contração dos músculos e da pele).

Para além deste sistema autónomo de termo-regulação as pessoas poderão também recorrer a uma termo-regulação comportamental, como por exemplo o movimento físico ou a adequação do vestuário. Este tipo de termo-regulação está associado à consciencialização por parte do indivíduo das suas sensações de temperatura bem como do seu grau de conforto térmico [10].

A consciencialização do conforto térmico distingue-se das sensações de temperatura na medida em que o primeiro consiste numa experiência emocional porque depende de apreciações como agradável e desagradável, enquanto a sensação de temperatura é uma experiência racional porque se refere a apreciações objectivas de frio ou calor.

McIntyre [8] esclarece o significado de agradável e de confortável afirmando que não têm um valor absoluto, mas antes dependem da experiência e de uma expectativa psicológica.

Hensel [10] afirma que as sensações de temperatura dependem principalmente do papel dos termo sensores fisiológicos existentes no interior do corpo humano. Assim verifica-se que o conforto diz respeito a um estado geral do sistema de termo- regulação pelo que as alterações do conforto térmico são sempre mais lentas que as sensações de temperatura.

Poderá portanto concluir-se que aquela **temperatura do espaço**, que contribui para a definição da atmosfera da arquitectura, tal como referida por Zumthor, é a mesma realidade descrita como **conforto térmico**, uma vez que ambas são descritas como experiências emocionais que dependem de apreciações como agradável ou desagradável, por parte das pessoas que habitam os espaços.

Sendo o conforto térmico uma grandeza que está muito bem caracterizada do ponto de vista científico, torna-se possível estimá-lo de forma concreta, objectiva e rigorosa e conseqüentemente utilizá-lo na concepção de edifícios como uma ferramenta importante (na fase de projecto) para a definição daquela atmosfera arquitectónica que Zumthor refere.

Da mesma forma que o sentido do tacto está dentro da pele do ser humano também os seus sensores para as sensações de calor e de frio o estão. Estas dependem mais da rapidez com que o fluxo de calor sai do nosso corpo para o ambiente envolvente do que da temperatura dos elementos com os quais se faz a troca. Com está implícito no pensamento de Aalto quando se refere à necessidade de projectar cadeiras com baixa condutibilidade

térmica. Efectivamente as perdas por condução através da superfície do nosso corpo em contacto com a cadeira dependem dessa variável. De forma semelhante poderemos ter experiências de frio e de calor através de perdas por radiação, ou convecção resultantes de interacções térmicas entre o nosso corpo e a envolvente construída ou paisagística que nos rodeia.

Um conhecimento aprofundado por parte do arquitecto das variáveis que intervêm no conforto térmico podem enriquecer de forma significativa os ambientes que eles projectam que motivarão aos utentes dos espaços ricas experiências multi-sensoriais.

Incomodidade acústica

A utilização da designação de “**conforto acústico**”, para exprimir situações de agradabilidade ou descontentamento das pessoas relativamente aos estímulos sonoros que recebem num determinado ambiente, não é muito frequente. A classificação dos sons em ruidosos, ou não, exprime essa condição de desagrado ou, na sua ausência, de agrado por parte dos indivíduos relativamente ao ambiente sonoro. Pode assim considerar-se que o conforto acústico consiste na ausência de ruído.

Conforme Pedro Martins da Silva refere [11]: *Em acústica, o ruído define-se, correctamente, como um estímulo sonoro cujo conteúdo informativo não apresenta interesse para o auditor ou como um estímulo sonoro indesejável para o auditor. Qualquer destas definições enferma de limitações que obstam à sua generalização a tudo o que se considera ruído. Mas evidenciam o facto de que um problema de ruído envolve sentimentos pessoais do auditor, apresentando-se essencialmente como uma questão de sensibilidade e de condições do ambiente. Pode dizer-se que as intensidades dos ruídos se classificam num plano mais psicológico do que físico, traduzindo-se em sensações que, sinteticamente, podem denominar-se de incomodidade.*

Incomodidade atribuída a um ruído pode considerar-se como a tradução do ressentimento do auditor, relativamente a uma intrusão naquilo que considera ser o seu domínio de incomodidade.

Como exemplo pode-se referir que uma melodia de música clássica pode ser considerada por uma pessoa como uma melodia extraordinária, e para um seu vizinho um ruído incomodativo que lhe perturba o sono.

O efeito do ruído nas emoções humanas varia entre o que é negligenciável até estados de irritação ou mesmo de raiva e de rotura psicológica. Psicologicamente o ruído pode variar entre valores inofensivos até valores que provocam dor ou mesmo danos físicos. O ruído pode ainda ter influência no aumento ou diminuição do rendimento dos trabalhadores.

Quando os estímulos sonoros são semelhantes, a intensidade sonora poderá ser um critério para definir o grau de incomodidade provocado pelo

ruído, porém quando as características desses estímulos são mais diferenciadas o recurso a este critério pode não ser suficiente. *Um outro critério para avaliar o grau de incomodidade do ruído relaciona-se com a forma como este interfere nas condições de comunicação auditiva. Esta interferência é fundamentalmente uma forma de mascaramento, portanto uma redução da inteligibilidade em consequência do desvio do limiar de audição, provocado pelo ruído...* [11]

Designa-se por nível de interferência na conversação (*Preferred Speech Interference Level* - PSIL) a média aritmética dos níveis de pressão sonora do estímulo perturbador, nas bandas de frequência consideradas (500Hz, 1000Hz e 2000Hz). Com base neste parâmetro Beranek elaborou um critério para avaliação do clima de ruído em escritórios o qual foi extrapolado para outras situações [Figura 2].

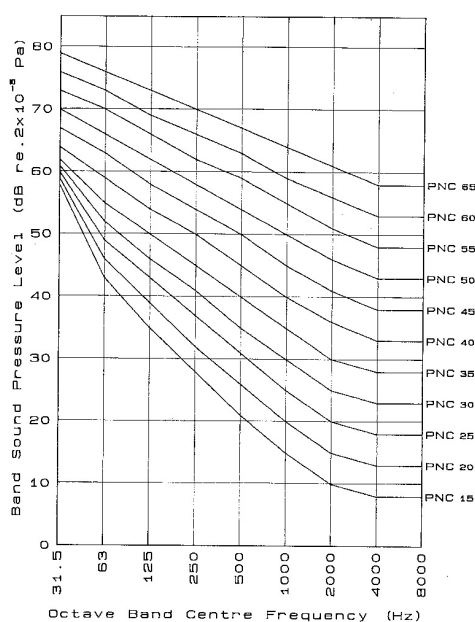


Figura 2: Curvas PNC (Preferred Noise Criteria) por bandas de frequências, *in* [57], pp 142

Um ruído aceitável em termos de inteligibilidade da palavra poderá não o ser no caso de outras actividades como por exemplo: ouvir música ou dormir. Enquanto dois ruídos contínuos com o mesmo espectro de frequências podem ser avaliados por simples comparação das suas energias totais, já diferentes ruídos com variações temporais e de espectro de frequências requerem um procedimento de classificação que tenha em consideração o aumento da sensibilidade do ouvido humano à gama de frequências médias do espectro, a natureza intermitente do ruído, bem como as características subjectivas do ruído.

Para classificar um ruído pelo método de Beranek designado por *Preferred*

Noise Criteria (PNC) é necessário representar num gráfico semelhante ao da Figura 2 os valores que esse ruído toma para as diferentes frequências. A classificação PNC corresponde à curva de valor máximo do nível sonoro atingido, qualquer que seja a sua frequência.

Para além da inteligibilidade da palavra, a privacidade constitui um objectivo importante a considerar nos edifícios, que devem proporcionar aos seus utentes, não só uma protecção eficaz da confidencialidade das suas comunicações, como prevenir a intrusão de ruídos indesejáveis provenientes de compartimentos vizinhos. O grau de confidencialidade e privacidade dos espaços depende não só do isolamento sonoro mas também do nível sonoro do ruído de fundo [12].

Legislação e conforto

Existe em Portugal um conjunto grande de legislação que procura assegurar mínimos de desempenho para Acústica e Térmica dos edifícios. A referida legislação tem por objectivo assegurar que as condições de conforto no interior dos edifícios sejam mantidas em níveis aceitáveis. Os regulamentos com maior aplicabilidade no projecto de arquitectura são os seguintes:

- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril;
- Regulamento Geral do Ruído (RGR), Decreto-lei 9/2007 de 17 de Janeiro;
- Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). Decreto-Lei 96/2008 de 9 de Junho.

O primeiro dos objectivos do RCCTE consiste em que *as exigências de conforto térmico, seja ele de aquecimento ou de arrefecimento, e de ventilação para garantia de qualidade do ar no interior dos edifícios, bem como as necessidades de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem dispêndio excessivo de energia.*²

Para efeitos da sua aplicação torna-se necessária a utilização de um método de cálculo em que, através da contabilização de todas as perdas e ganhos de calor ocorridos no edifício em estudo, se estima, em determinadas condições nominais, a quantidade de energia (kWh/m².ano) necessária para manter o edifício na temperatura de conforto no Inverno (20 °C) e no Verão (25 °C). A partir do resultado obtido que corresponde às necessidades de energia térmica calcula-se a quantidade de energia primária correspondente tendo em consideração o rendimento dos sistemas de climatização utilizado e finalmente calculam-se as emissões de CO₂ correspondentes, tendo em atenção o mix energético de produção de energia a nível

² Regulamento das Características de comportamento Térmico dos edifícios RCCTE - Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril, Artigo 1, alínea a) [objectivos].

nacional.

Esta metodologia poderá constituir uma primeira abordagem em termos da utilização do conforto térmico como ferramenta do projecto de arquitectura. Porém traz consigo implícitas algumas simplificações das quais se destaca o facto de o modelo físico do RCCTE preconizar uma avaliação baseada em temperaturas médias diárias, as quais poderão não simular correctamente as múltiplas variações das condições de conforto ao longo do dia.

O RGR estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora, visando a salvaguarda da saúde humana e o bem estar das populações. Aplica-se às actividades ruidosas permanentes e temporárias e a outras fontes de ruído susceptíveis de causar incomodidade. Este regulamento aplica-se também ao ruído de vizinhança.

Os indicadores de ruído utilizados na descrição do ruído ambiente que têm relação com os efeitos prejudiciais na saúde ou bem-estar humanos são definidos conforme a Norma Portuguesa NP1730³

De acordo com esta norma o nível sonoro equivalente ponderado “A” para um intervalo de tempo T estima-se pela equação (1):

$$L_{A,eq,T} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_A^2}{P_0^2} dt \right] \quad (1)$$

Onde:

$L_{A,eq,T}$ = Nível de pressão sonora equivalente, ponderado “A”, para um intervalo de tempo T , em dB;

P_0 = Nível de pressão sonora de referência = $20\mu\text{Pa}$;

P_A = Nível de pressão sonora medido, ponderado “A”, em Pa;

t_1 = Tempo de início da medição;

t_2 = Tempo de finalização da medição.

O RRAE estabelece os requisitos acústicos dos edifícios com vista a melhorar as condições de qualidade acústica desses edifícios. O RRAE, tendo em consideração o leque variado de possibilidades funcionais e tipológicas dos edifícios, procura, para os casos aplicáveis, assegurar que a privacidade dos utentes dos edifícios seja protegida, que não ocorram situações de intrusão sonora devidos a ruídos de tráfego urbano, maquinaria e de espaços vizinhos e ainda que as condições de inteligibilidade, em espaços onde a comunicação seja um dado importante, seja maximizada.

Para este efeito o RRAE impõe:

³A Norma Portuguesa NP 1730 (constituída em 3 partes) de 1996 intitulada “Acústica. Descrição e medição do ruído ambiente”, harmonizada com a Norma Internacional ISO 1996 “Acoustics. Description and measurement of environmental noise.”, estabelece os procedimentos a adoptar na realização de ensaios acústicos para avaliação de exposição a níveis de Ruído Ambiente exterior e para avaliação da incomodidade devida ao ruído

- valores mínimos e máximos para o isolamento sonoro a sons de condução aérea e de percussão respectivamente, de diferentes espaços de edifícios;
- valores máximos para o ruído produzido pelos equipamentos existentes nos edifícios;
- valores máximos para o tempo de reverberação de certos compartimentos onde a boa comunicação seja um requisito essencial da adequação funcional.

Motivação

Comparando algumas afirmações dos teóricos de arquitectura e de arquitectos - que utilizam a abordagem fenomenológica como metodologia de projecto - com as afirmações dos cientistas que estudam o conforto térmico, verifica-se existir uma grande semelhança entre as preocupações dos primeiros e as variáveis que os segundos estudam.

Efectivamente tanto uns como outros, ao estudarem os efeitos térmicos e acústicos dos edifícios, abordam-nos segundo uma mesma perspectiva que é a da experiência emocional que as sensações provocam nos seres humanos.

Assim parece legítimo aproveitar todo o trabalho realizado pelos cientistas do conforto para, de uma forma mais rigorosa, tentar imprimir nos edifícios as capacidades de inter-agirem com as emoções das pessoas.

O conforto térmico é a base da regulamentação térmica dos edifícios, porém esta variável é tratada de uma forma simplificada. Utiliza-se apenas a temperatura ambiente como indicador.

Por outro lado esta regulamentação visa outros objectivos, como por exemplo a redução das emissões de CO₂ e do consumo nominal dos edifícios, e introduz certos incentivos, como é o caso do factor de forma, que causam outro tipo de impactos nos projectos dos edifícios para além das questões do conforto.

Assim a preocupação com o conforto térmico parece muito próxima da concepção arquitectónica e dos objectivos dos arquitectos em procurar que os seus edifícios tenham um ambiente agradável para as pessoas que os irão habitar.

Já na acústica o conforto depende mais do interesse que o conteúdo informativo do som apresenta para o auditor, pelo que a Regulamentação em vigor, tem por objectivo prioritário o de promover o isolamento sonoro entre diferentes espaços de fracções autónomas ou outros espaços onde se preveja que possam existir interferências indesejáveis.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objectivo

A presente dissertação visa o desenvolvimento de um ambiente computacional, de apoio ao projecto de arquitectura. O objectivo é promover uma concepção arquitectónica que integre, de uma forma adequada do ponto de vista cognitivo e conjunta, avaliações de desempenho ambiental, relacionadas com o bem estar dos utilizadores, destacando as condições de conforto térmico e acústico como objecto de estudo.

Por condições de conforto térmico entende-se *um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente circundante sob o ponto de vista térmico* [13]; um desenvolvimento mais detalhado é apresentado na página 7 e seguintes.

Por condições de condições de conforto acústico entende-se um estado de ausência de estímulos indesejáveis; é apresentado um desenvolvimento mais detalhado deste aspecto na página 9 e seguintes.

Para além de informar o projecto de arquitectura é também objectivo destas ferramentas habilitar os arquitectos com meios que facilitem e apoiem o diálogo e a partilha de informação com os outros especialistas intervenientes no processo de projectar.

Pretende-se deste modo contribuir para garantir a eficácia das soluções propostas e da sua concretização, permitindo, assim, uma intervenção positiva na melhoria da qualidade do ambiente construído.

1.2 Justificação do tema

O projecto de arquitectura, enquanto processo de concepção envolve um conjunto de procedimentos que, partindo da manipulação do espaço tridimensional, decorre entre uma determinada solicitação ou aspiração (pro-

blema) e a sua concretização prática (solução). Como refere Brian Lawson [14] trata-se de um processo de decisão complexo, marcado por variáveis de natureza diversificada e para o qual concorrem diferentes campos de conhecimento e intervenientes com características e solicitações distintas.

Por outro lado o projecto de arquitectura, destina-se a elaborar uma resposta que satisfaça necessidades várias e preencha valores e expectativas dos seus destinatários finais. Para além de responder com eficácia a exigências programáticas, de natureza técnica, regulamentar e orçamental, é necessário garantir o bem-estar físico e emocional dos seus utilizadores, assegurando níveis adequados de conforto ambiental.

Quando não existe uma concepção integrada do conjunto de variáveis que devem ser equacionadas, o projecto de arquitectura tende a desenvolver-se por etapas distintas, em que as várias questões são tratadas de forma autónoma pelas correspondentes áreas disciplinares.

Esta forma de abordagem ao processo de projectar gera frequentemente problemas decorrentes da incompatibilidade entre as soluções propostas pelas diversas especialidades, podendo afectar negativamente a coerência da solução final.

Nestes termos, procura-se com esta dissertação contribuir para promover uma concepção arquitectónica mais integradora que permita aos arquitectos conceber edifícios com elevado desempenho ambiental, i. e. edifícios confortáveis, e onde possam ser previstas ainda em fase de projecto as características multi-sensoriais da percepção das pessoas no interior dos espaços projectados. Acresce que o presente trabalho encontra aqui uma reforço da sua pertinência e justificação.

O sistema informático em desenvolvimento deverá possuir ainda as seguintes capacidades:

- possibilitar a implementação de representação de conhecimento pericial;
- possibilitar a implementação **futura** de algoritmos de procura, à semelhança do que foi desenvolvido em trabalho anterior [15]. Este consistiu no desenvolvimento de um sistema pericial para o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, versão de 1990¹ que, baseado em regras heurísticas, procurava e sugeria soluções construtivas cumpridoras da referida legislação para uma determinada geometria fornecida pelo utilizador;
- ou mesmo possibilitar o desenvolvimento de agentes de Inteligência Artificial que possam executar tarefas de revisão automática de projecto.

¹Decreto-Lei 40/90 de 6 de Fevereiro

1.3 Estado da arte

Não foi encontrada no mercado nenhuma ferramenta que pudesse, ou tão pouco visasse, satisfazer os objectivos aqui formulados.

Apesar de existir um esforço no sentido de se desenvolverem ferramentas que integrem no projecto um conjunto grande de verificações como é o caso do conceito BIM ² que alguns sistemas de CAD incorporam. São exemplos da utilização significativa das tecnologias BIM, os programas AutoCAD da empresa “Autodesk” [16] e ArchiCAD da empresa “Graphisoft” [17].

Porém, esses programas de CAD seguem uma via de programação com linguagens de tipo imperativo, em que o utilizador vai definindo o seu objecto de forma excessivamente detalhada e apenas no final será possível realizar as avaliações de desempenho necessárias. Esta fórmula não se torna prática nem adequada para a concepção arquitectónica dado que as decisões com maior impacto no desempenho dos parâmetros em estudo devem ser tomadas no início do projecto dado que por vezes dependem de forma significativa da forma arquitectónica.

Outra possibilidade seria a utilização de uma ferramenta simplificada para modelação de formas e volumes arquitectónicos, por exemplo caso do programa **Google Sketchup** [18] o qual já possibilita uma interface com o programa **EnergyPlus** [19].

Este programa, tratando-se de um programa de **código aberto**, permitiria a construção e desenvolvimento de novas classes de objectos adaptadas às necessidades das outras interfaces ou programas pretendidos (Avaliação Acústica, RCCTE, ou porventura de avaliação da iluminação). Porém, a possibilidade de interacção do mesmo afigurou-se excessivamente laboriosa para ser integrada no período de tempo em que o presente estudo deveria ser enquadrado. Acrescendo que uma interligação entre a linguagem em que o programa está escrito e as necessidades de representação de conhecimento pericial afigurava-se porventura excessivamente inadequada senão mesmo inatingível.

Existem ainda outros programas comerciais que se aproximam dos objectivos aqui formulados e do tipo de funcionalidades pretendidas como é o caso dos programas “Design Builder” e “Ecotect” da empresa Autodesk [20].

O programa “Design Builder” [21] trata-se de uma interface gráfica para apoio à simulação com o programa EnergyPlus do Department of Energy do Governo dos Estados Unidos [19], não possuindo a capacidade de realizar modelações acústicas. Permite modelar o edifício num ambiente tridimensional e realizar simulações tendo por base o programa Energy Plus.

²BIM - Building Information Modeling

O programa “Ecotect” trata-se também de uma interface gráfica com funcionalidades semelhantes às do programa “Design Builder”, possibilitando a realização de simulações de acústicas. Porém estas limitam-se a um traçado de raios do percurso do som, não possuindo qualquer funcionalidade que permita avaliar os parâmetros do RRAE com base na norma EN 12354.

Uma vez que se pretende também implementar código que descreva conhecimento, para numa fase posterior processar esse conhecimento, torna-se necessária a utilização de uma linguagem declarativa e não determinística, como é o caso do Prolog, tendo no presente caso sido utilizado o ambiente **Swi-PROLOG/XPCE** [22].

Assim, conclui-se que não se encontra no mercado nenhum programa informático que possua as funcionalidades que se pretende incluir no trabalho em desenvolvimento, particularmente no que se refere à sua adaptação à regulamentação portuguesa de acústica e térmica, bem como à sua capacidade de incluir código que permita formas mais expeditas de representação de conhecimento pericial.

1.4 Metodologia

A realização deste trabalho compreende duas fases:

1. Desenvolvimento de diversas ferramentas informáticas, usando a linguagem Swi-Prolog, que possam contribuir para uma abordagem de projecto mais adequada, do ponto de vista cognitivo, aos raciocínios que os arquitectos formulam no seu processo de concepção arquitectónica de edifícios;
2. Realização de um estudo de caso, que permita exemplificar a avaliação de um projecto em fase de concepção utilizando as ferramentas desenvolvidas aplicadas a diferentes tipos de exigências de desempenho, nomeadamente:
 - Avaliação do conforto térmico usando o programa EnergyPlus;
 - Avaliação de conforto acústico com base na verificação do cumprimento RRAE.

1.4.1 Avaliação do conforto térmico

O conforto térmico está caracterizado de uma forma bastante detalhada e aceite pela comunidade científica existindo já um consenso muito alargado sobre a caracterização das suas variáveis o que é comprovado pela existência de diversas normas internacionais sobre este tema, tais como:

- a ISO-7730 [23], baseada na formulação de P. Ole Fanger[7], mas com maior aplicabilidade hoje nos edifícios condicionados;

- a EN-15251 [24], para o conforto adaptativo, segundo Fergus Nicol[25], apresenta maior rigor nos casos de edifícios ventilados naturalmente;
- e a ASHRAE 55-2004 [26].

A norma EN 15251 encontrou ainda a necessidade de prevenir efeitos desconfortáveis de natureza acústica e relativos à iluminação natural, estabelecendo-se para o efeito valores limites, tais como:

- Máximos para certos parâmetros de conforto acústico [*sound pressure level*, em dB(A)] a verificar no interior dos espaços, de modo a prevenir as situações em que necessidade de ventilar obrigue a permanecer com as janelas abertas;
- Mínimos para a iluminação no plano de trabalho e máximos para o efeito de encandeamento.

1.4.2 Norma ISO 7730

A Norma ISO 7730 [23] baseia-se nos estudos e formulações de P. O. Fanger para definir uma metodologia de avaliação do conforto térmico.

Sendo o conforto térmico definido como *um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente circundante sob o ponto de vista térmico* [13], em virtude da sua variabilidade biológica, não é possível que as pessoas que habitam um determinado espaço tenham todas o mesmo grau de satisfação térmica em simultâneo.

A norma ISO 7730 define, como parâmetros de avaliação do conforto, o índice PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied* - Percentagem de Pessoas Descontentes ou Insatisfeitas) que exprime um valor estatístico, função do índice PMV (*Predicted Mean Vote* - Voto Previsível Médio).

Segundo esta norma o parâmetro PMV é um índice que permite a avaliação por um grande grupo de pessoas expressando um voto de sensação térmica referindo-se a uma escala dos sete níveis, tais como representados na Tabela 1.1.

muito quente	+3
quente	+2
ligeiramente quente	+1
neutro	0
ligeiramente frio	-1
frio	-2
muito frio	-3

Tabela 1.1: escala de valores de PMV

Cálculo de PMV

O índice *PMV* poderá ser calculado quando forem determinados os seguintes parâmetros:

1. índice de actividade - produção de energia pelo metabolismo humano;
2. índice de vestuário - resistência térmica;
3. variáveis relativas ao ambiente:
 - Temperatura do ar ambiente;
 - Temperatura radiante média;
 - Velocidade do ar;
 - Humidade relativa ou pressão do vapor de água.

O índice *PMV* baseia-se num balanço térmico do corpo humano. O homem está em equilíbrio quando a produção interna de calor no corpo é igual à perda de calor para o meio ambiente.

O índice *PMV* é dado pela seguinte expressão[23]:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,0303 \times e^{0,036M} + 0,028) \times \{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \\
 & \times [5733 - 6,99 \times (M - W) - P_w] - 0,42 \\
 & \times [(M - W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - P_w) \\
 & - 0,0014 \times M \times (34 - T_a) - 3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \\
 & \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (T_{cl} - T_a) \} \quad (1.1)
 \end{aligned}$$

Onde:

PMV = Voto Previsível Médio (Predicted Mean Vote);

M = Energia produzida pelo metabolismo em W/m² de superfície corporal;

W = Trabalho produzido em W/m²;

I_{cl} = Resistência térmica do vestuário, em m² .° C/W;

f_{cl} = Razão entre a superfície vestida do corpo e superfície despida;

T_a = Temperatura do ar ambiente, em °C;

T_r = Temperatura radiante média, em °C;

V_{Ar} = Velocidade relativa do ar, em m/s;

P_w = Pressão parcial de vapor de água, em Pa;

h_c = Resistência térmica por convecção, em W/m² .° C;

T_{cl} = Temperatura à superfície do vestuário, em °C;

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 \times (M - W) - I_{cl} \times \left\{ 3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \right. \\ \left. \times \left\{ (T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 + f_{cl} \times h_c \times (T_{cl} - t_a) \right\} \right.$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \times (T_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{para: } 2,38 \times (T_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \times \sqrt{V_{ar}} \\ 12,1 \times \sqrt{V_{ar}} & \text{para: } 2,38 \times (T_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \times \sqrt{V_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \times I_{cl} & \text{para: } I_{cl} \leq 0,078m^2 \cdot ^\circ C/W \\ 1,05 + 0,645 \times I_{cl} & \text{para: } I_{cl} > 0,078m^2 \cdot ^\circ C/W \end{cases}$$

O índice *PMV* poderá ser calculado, utilizando a equação (1.1), para diferentes combinações de taxa metabólica, vestuário, temperatura do ar ambiente, temperatura radiante média, velocidade do ar. Porém, é ainda recomendável que o índice *PMV* possua valores compreendidos entre -2 e +2; devendo ainda ser considerados os seguintes limites de aplicação para os seus seis principais parâmetros:

$$M = 46 \text{ a } 232W/m^2 \text{ (0,8 a 4 met);}$$

$$I_{cl} = 0 \text{ a } 0,310m^2 \cdot ^\circ C/W \text{ (0 a 2 clo);}$$

$$T_a = 0 \text{ a } 30^\circ C;$$

$$T_r = 0 \text{ a } 10^\circ C;$$

$$V_{Ar} = 0 \text{ a } 1 \text{ m/s.}$$

Percentagem previsível de insatisfeitos

O índice *PMV* é um valor médio do voto previsível médio relativamente aos votos dados por um grupo importante de pessoas que estejam expostos ao mesmo ambiente térmico. Porém como os votos individuais estão dispersos em torno deste valor médio torna-se necessário estimar o número de pessoas que possam sentir frio ou calor.

Para esse efeito utiliza-se o índice *PPD* que pode ser estimado, a partir do momento que se conheça *PMV*, através da Figura 1.1 ou da equação (1.2).

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2)} \quad (1.2)$$

O conforto térmico é assim definido como uma expressão de satisfação relativamente ao ambiente térmico. A insatisfação pode dever-se a uma falta de conforto devido ao ambiente estar quente ou frio para o corpo humano na sua totalidade conforme expresso pelos índices *PMV* e *PPD*. Mas a insatisfação térmica pode dever-se também a um aquecimento ou arrefecimento de uma determinada parte do corpo (desconforto localizado).

A norma ISO 7730 utiliza ainda o conceito de temperatura operativa para

relacionar os níveis de actividade e de vestuário em termos da sua contribuição para o conforto térmico. Para tal utiliza a temperatura operativa óptima, que corresponde a uma situação de $PMV = 0$, conforme se apresenta na Figura 1.2.

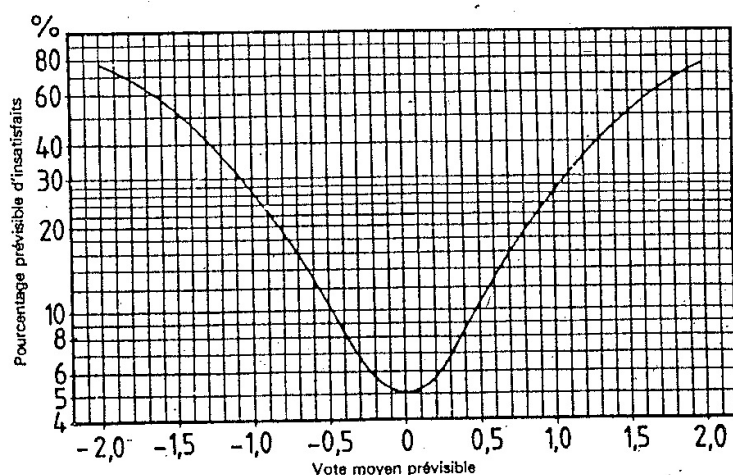


Figura 1.1: PPD, em função de PMV, in [23] - pp 3, figura 1.

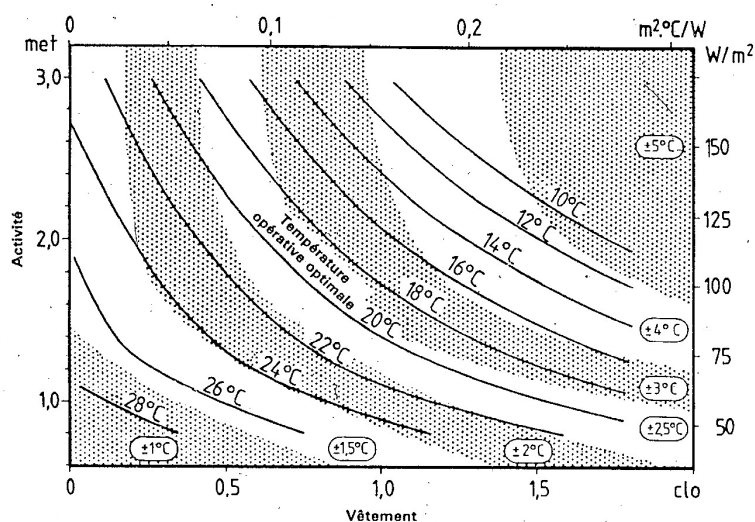


Figura 1.2: Temperatura operativa optimizada, em função de actividade e vestuário, in[23] - pp 6, figura 2

Temperatura operativa foi definida por Winslow, Herrington e Gagge [27] como sendo a temperatura uniforme de uma envolvente negra através da qual o ser humano troca calor por radiação e convecção à mesma taxa que uma determinada envolvente dada não uniforme. Este índice integra os efeitos da temperatura do ar ambiente, da temperatura radiante média

da envolvente e da deslocação do ar e pode ser calculada pela equação (1.3):

$$T_{op} = \frac{h_r \times T_r + h_c \times T_a}{h_r + h_c} \times \left[T_a \times \sqrt{\frac{v}{v_o}} - T_{sk} \times \left(\sqrt{\frac{v}{v_o}} - 1 \right) \right] \quad (1.3)$$

Onde:

T_{op} = Temperatura Operativa, em °C;

T_r = Temperatura radiante média, em °C;

T_a = Temperatura seca do ar ambiente, em °C;

h_r = Condutância térmica superficial por radiação, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;

h_c = Condutância térmica superficial por convecção, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;

v = Velocidade do ar, em m/s;

v_o = Velocidade do ar de referência = 0,075m/s;

T_{sk} = Temperatura da pele, em °C,

1.4.3 Norma EN 15251

A norma 7730 define um índice que expressa o estado térmico do corpo humano em termos do ambiente térmico circundante, incluindo os contributos da temperatura, humidade, velocidade do ar, nível de vestuário e actividade. Este índice permite prever as condições de conforto térmico num compartimento fechado e com condições estacionárias.

Porém, ao realizarem-se observações em campo [29], foram verificadas discrepâncias entre os valores estimados e os índices teóricos desta norma [Figura 1.3].

Nicol e Humphreys [28] sugerem que estas discrepâncias se devem a um feed-back entre o conforto das pessoas e os seus comportamentos que lhes permite adaptarem-se às condições climáticas das observações de campo.

Sendo objectivo de uma norma de conforto de edifícios promover a realização de projectos de edifícios que possam ser confortáveis para os seus utentes torna-se necessário que as mesmas normas se aproximem dos comportamentos adaptativos dos ocupantes desses edifícios.

Com este objectivo Nicol e Humphreys [30] definem o seguinte princípio adaptativo: *“qualquer alteração climática que produza desconforto num determinado ambiente produzirá por parte dos ocupantes desse ambiente uma reacção no sentido de restaurar o conforto”*.

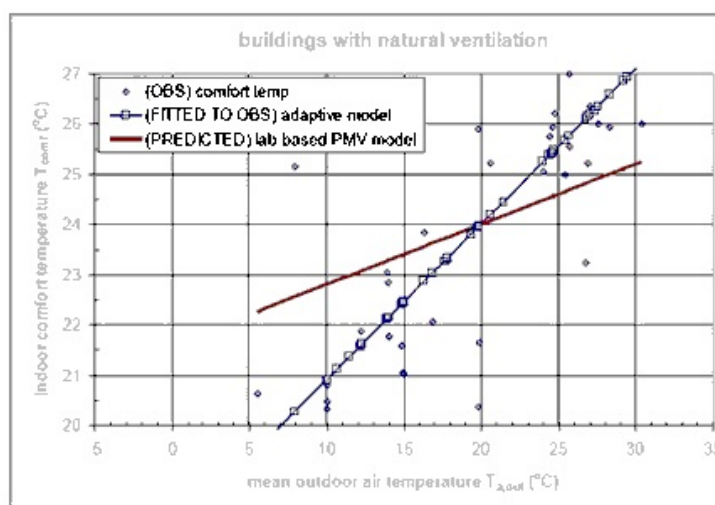


Figura 1.3: de Dear e Brager - Erro no índice *PMV*, in [29] - pp 552

Ao correlacionar o voto de conforto às acções das pessoas este princípio adaptativo liga a temperatura de conforto ao contexto em que as pessoas se encontram. Poderemos agrupar as possibilidades de reacção dos indivíduos em três grupos de variáveis, são eles:

- variáveis relativas à interacção das pessoas com o **clima** - o corolário desta premissa baseia-se no facto de que o conforto das pessoas está profundamente relacionado com a temperatura média exterior, conforme foi revelado pelas observações em campo [Figura 1.3];
- variáveis relativas à interacção das pessoas com os **edifícios** - Baker e Standeven [31] introduzem aqui outro conceito: o de *oportunidade adaptativa*. Que consiste na possibilidade que os ocupantes podem ter (ou não) de ajustar as suas condições de conforto. Por exemplo: abrir uma janela, fechar um estore, utilizar um ventilador, ajustar o seu vestuário, etc.
- variáveis relativas à interacção das pessoas com o **tempo** - A resposta de um indivíduo a uma situação de desconforto leva algum tempo a produzir-se. Algumas acções são rápidas como por exemplo o abrir-se uma janela, outras são mais lentas como por exemplo a adaptação à moda de Verão ou de Inverno. Para traduzir o efeito de adaptação a uma exposição prolongada a um determinado tipo de clima Humphrey [32] sugeriu a definição de uma variável: a temperatura média exterior cumulativa - equação (1.4).

A temperatura exterior média cumulativa é dada pela seguinte expressão:

$$T_{rm}(t) = (1 - \alpha) \times \{T_{t-1} + \alpha \times T_{t-2} + \alpha^2 \times T_{t-3} \dots\} \quad (1.4)$$

Onde:

$T_{rm(t)}$ = Temperatura exterior média cumulativa para um período de tempo t , em °C;

T_t = Temperatura média para um tempo t numa série de intervalos de tempo iguais (dias, por exemplo);

α = Constante, tal que: $1 > \alpha \geq 0$, poderá assumir-se = 0,8.

Em edifícios climatizados e com ventilação mecânica a temperatura interior é controlada pelo sistema, não havendo a possibilidade de os ocupantes alterarem as condições de conforto de acordo com o “princípio adaptativo”. Para situações deste tipo verificou-se, nas observações realizadas em campo, que a zona de conforto neutro é descrita por uma evolução apresentando menor variabilidade.

Já nos casos de edifícios ventilados naturalmente as observações reflectem uma adaptação às condições exteriores, conforme se pode verificar na figura 1.4.3 podendo observar-se ainda que a zona de conforto neutra segue uma linha que é proporcional ao aumento da temperatura exterior.

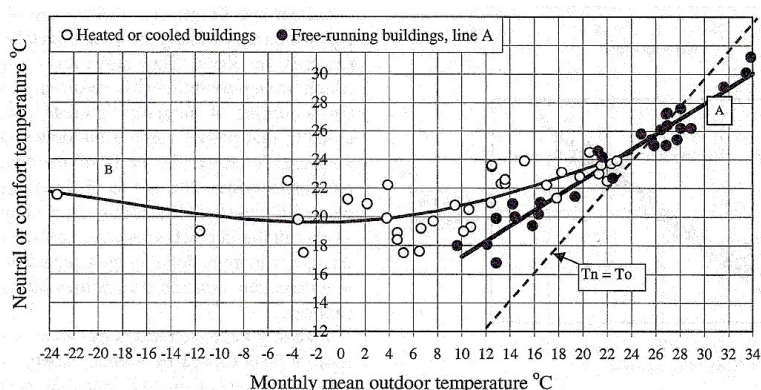


Figura 1.4: Humphreys - Temperatura média exterior mensal, °C. in [30] - pp 566

Em face das insuficiências da ISO 7730 [23], em prever as condições de conforto das pessoas, no caso dos edifícios ventilados naturalmente, foi sentida a necessidade de promover a realização de uma outra norma que tivesse em consideração os princípios adaptativos. Assim, é a partir destes pressupostos que surge a norma EN 15251 [23].

Esta norma define critérios de projecto para serem usados no dimensionamento de sistemas. Define também os principais parâmetros que devem ser usados como “input” no cálculo energético de edifícios em avaliações de períodos de tempo longos do ambiente interior. Esta norma identifica também os parâmetros que devem ser usados para monitorização de ambientes interiores nos termos da Directiva Europeia EPBD (European Performance of Buildings Directive).

A norma EN15251 estabelece quatro categorias de conforto térmico, conforme tabela 1.2. Em face da grande variabilidade das variáveis actividade

Categoria	Estado geral do conforto do corpo	
	PPD %	Voto Previsível Médio (PMV)
I	< 6	-0,2 < PMV <+0,2
II	< 10	-0,5 < PMV <+0,5
III	< 15	-0,7 < PMV <+0,7
IV	> 15	PMV < -0,7; ou +0,7 < PMV

Tabela 1.2: *in* Norma EN 15251 [24] - Tabela A.1, Anexo A

e nível de vestuário, nos termos desta norma, elas tomam valores fixos que correspondem a uma média previsível de comportamento das pessoas em função da estação do ano e dos fins a que se destinam os espaços.

Na Tabela 1.3 apresentam-se os valores recomendados para as temperaturas de projecto, segundo as quatro categorias definidas na norma.

Tipo de Edifício ou de espaço	Categoria	Temperatura Operativa °C	
		Mínimo Aquec. (Inverno) $\simeq 1,0Clo$	Máximo Arrefec. (Verão) $\simeq 0,5Clo$
Edifícios de Habitação Quartos, Salas e Cozinhas actividade sedentária $\simeq 1,2Clo$	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
Edifícios de Habitação: Outros espaços, Arrumos, Circul. actividade sedentária $\simeq 1,6Clo$	I	18,0	
	II	16,0	
	III	14,0	
Edifícios Escolares Salas de Aula actividade sedentária $\simeq 1,2Clo$	I	21,0	25,0
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0

Tabela 1.3: *in* Norma EN 15251 [24] - Tabela A.2, Anexo A

Os valores limite (para as diferentes categorias definidas na EN 15251) das temperaturas operativas no interior dos espaços de edifícios sem sistemas de arrefecimento mecânicos são apresentados nas tabela 1.4 e figura 1.5.

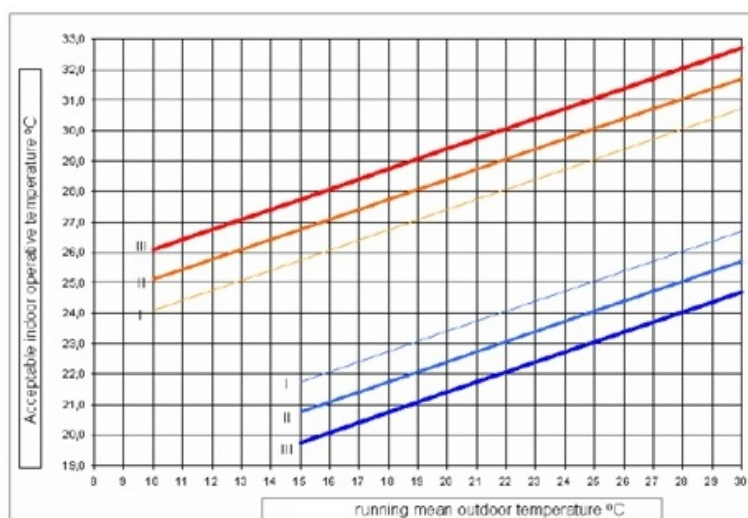


Figura 1.5: Limites da temperatura operativa em edifícios ventilados naturalmente, in [24] - Anexo A , pp 27

Categoria I	Limite superior $T_{op(i,max)} = 0,33 \times T_{rm} + 18,8 + 2$
	Limite inferior $T_{op(i,min)} = 0,33 \times T_{rm} + 18,8 - 2$
Categoria II	Limite superior $T_{op(i,max)} = 0,33 \times T_{rm} + 18,8 + 3$
	Limite inferior $T_{op(i,min)} = 0,33 \times T_{rm} + 18,8 - 3$
Categoria III	Limite superior $T_{op(i,max)} = 0,33 \times T_{rm} + 18,8 + 4$
	Limite inferior $T_{op(i,min)} = 0,33 \times T_{rm} + 18,8 - 4$

Tabela 1.4: Valores limites para a temperatura operativa, na estação de arrefecimento, em função da temperatura média exterior cumulativa, in [24]

Onde:

T_{op} = Temperatura Operativa, em °C;

T_{rm} = Temperatura exterior média cumulativa, em °C;

Qualidade do ar, iluminação e acústica na EN 15251

Tendo em atenção que há outros requisitos a que os edifícios estão sujeitos, a norma EN 15251 fornece recomendações de projecto para outros aspectos importantes tais como:

- Taxas de ventilação internas aconselháveis - no sentido de prevenir a falta de qualidade do ar interior devido à existência de poluentes no interior do edifício - Anexos B e C da referida norma;
- Critérios para manutenção de níveis de luminância no plano de trabalho adequados às tarefas previstas para diferentes funções dos espaços. Esta variável poderá ter influência no conforto térmico com

base nos ganhos de calor provenientes de janelas ou de equipamentos de iluminação artificial - Anexo D da referida norma;

- Níveis máximos de ruído com base no parâmetro (NC - *noise criteria*) que devem verificar-se no interior dos espaços. Não é recomendável que seja praticada ventilação natural nos edifícios quando os valores aqui preconizados são excedidos - Anexo E da referida norma;

1.4.4 Conforto térmico e sustentabilidade

Nicol e Humphreys [30] destacam a importância do papel que as normas podem representar na sustentabilidade dos edifícios. O conforto térmico é também uma variável importante na avaliação do grau de sustentabilidade dos edifícios. A ferramenta de avaliação e certificação da construção sustentável SBTool_Pt [33] avalia e classifica o desempenho do conforto térmico através do “parâmetro 18” do grupo “Amenidades”.

1.4.5 Simulações de conforto térmico

As simulações a realizar no âmbito deste trabalho visam exemplificar como poderá realizar-se uma abordagem de concepção, no âmbito do desenvolvimento do projecto de arquitectura, que procure entrar em consideração com uma avaliação do conforto térmico ainda na fase de projecto.

Na realidade, condições estáveis de conforto térmico são difíceis de encontrar, conforme sublinha Hensen [6]. Acresce que o conhecimento presente dos mecanismos de termo-regulação humana não nos permite prever ainda com confiança a nossa resposta a estímulos variáveis. Situações como arrefecimentos bruscos num determinado compartimento não clarificaram qual o período de tempo que torna essas mudanças significativas para as pessoas.

Da mesma forma ainda não é claro até que ponto a circulação das pessoas por diferentes compartimentos num mesmo edifício com estados térmicos distintos provoca nelas sensações de desconforto. Há assim um conjunto grande de investigações que interessam à arquitectura e que estão ainda em curso ou por realizar.

Compreender até que ponto as alterações de temperatura no interior de um mesmo edifício ou fracção poderão influenciar de forma decisiva a organização em planta de um conjunto de funções de um edifício é do maior interesse para a arquitectura se ela quiser ser sustentável ou apresentar uma atmosfera agradável em termos do conforto térmico.

Apesar de não dispormos de muita informação sobre o conforto térmico humano em condições variáveis particularmente para as situações atrás referidas, poderemos realizar simulações para verificar se as condições preconizadas na EN 15251 se verificam no interior dos espaços dos edifícios, dentro dos pressupostos definidos na mesma norma.

Assim, no âmbito da realização do caso de estudo, adoptou-se como metodologia de avaliação do conforto térmico a preconizada pelo método de avaliação da sustentabilidade dos edifícios SBTool_Pt [33]. Este método prevê a realização de simulações com um programa de simulação dinâmica do comportamento térmico, que deverão abranger a totalidade dos períodos da estação de aquecimento e de arrefecimento, no sentido de se verificar se as condições de conforto adaptativo, nos termos da norma EN 15251 são verificadas durante 95% de cada uma dessas estações.

No âmbito deste trabalho, optou-se pela utilização do programa Energy-Plus, para o qual se desenvolveu também uma interface que será descrita mais à frente neste trabalho. A referida interface permitirá a realização de múltiplas avaliações do conforto térmico de uma forma muito mais rápida do que quando executadas com recurso exclusivo ao programa Energy-Plus, uma vez que toda a construção dos objectos de definição geométrica do edifício é muito simplificada e adaptada aos conceitos espaciais mais utilizados pelos arquitectos nestas tarefas.

Consoante os resultados obtidos com estas simulações, assim poderá verificar-se em que categoria de conforto o edifício se situa, nos termos da norma EN 15251. Ou em alternativa e numa fase posterior, poderá calcular-se qual a energia térmica necessária para que o edifício cumpra as condições de conforto de uma determinada categoria de conforto adaptativo.

Relativamente à estação de aquecimento, deverá ser calculada a temperatura operativa durante esta estação que é excedida em, pelo menos, 95% do tempo de utilização dos espaços do projecto.

Categoria I	$T_{op} \geq 21,0^{\circ}\text{C}$
Categoria II	$21,0^{\circ}\text{C} > T_{op} > 20,0^{\circ}\text{C}$
Categoria III	$20,0^{\circ}\text{C} > T_{op} > 19,0^{\circ}\text{C}$
Categoria IV	$T_{op(i,max)} < 19,0^{\circ}\text{C}$

Tabela 1.5: Valores limites para a temperatura operativa, na estação de aquecimento, em edifícios escolares, *in* [24]

Consoante a temperatura operativa mínima verificada - que é excedida em 95% do tempo de funcionamento - poder-se-á concluir qual a categoria de conforto adaptativo do edifício ou espaço em análise para a estação de aquecimento [Tabela 1.5].

Para definição da estação de aquecimento utiliza-se o critério definido no RCCTE: *estação convencional de aquecimento é o período do ano com início no primeiro decénio posterior a um de Outubro em que, para a localidade do caso de estudo, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com termo no último decénio anterior a 31 de Maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C.*

Relativamente à estação de arrefecimento utiliza-se também um procedimento análogo ao preconizado pela norma EN 15251 e na ferramenta SBTool_Pt.

Também aqui o critério a utilizar para definição da estação de arrefecimento deverá ser o preconizado no RCCTE: estação convencional de arrefecimento é o conjunto dos meses de Verão (Junho, Julho, Agosto e Setembro) em que é maior a probabilidade de ocorrência de temperaturas exteriores elevadas que possam exigir arrefecimento ambiente em edifícios com pequenas cargas internas.

Seguidamente calcula-se para cada um dos dias da mesma estação a temperatura operativa óptima bem como as diferenças entre as temperaturas operativas óptimas obtidas e as temperaturas operativas nos diferentes espaços, para cada hora da estação de arrefecimento. Finalmente calcula-se a diferença de temperatura máxima que não é excedida em 95% do tempo de utilização nos espaços em estudo.

Assim, numa primeira fase serão calculadas, com base nos ficheiros meteorológicos utilizados ³, para cada um dos dias da estação de arrefecimento, as respectivas temperaturas médias exteriores cumulativas, conforme equação (1.5), que representa uma simplificação da equação (1.4), página 24, também definida na mesma norma EN 15251.

$$T_{rm(t)} = (T_{t-1} + 0,8 \times T_{t-2} + 0,6 \times T_{t-3} + 0,5 \times T_{t-4} + 0,4 \times T_{t-5} + 0,3 \times T_{t-6} + 0,2 \times T_{t-7}) / 3,8 \quad (1.5)$$

Onde:

$T_{rm(t)}$ = Temperatura exterior média cumulativa para um período de tempo t , neste caso um dia, em °C;

T_{t-1} = Temperatura média exterior do dia **anterior** ao dia em causa;

T_{t-2} = Temperatura média exterior **2** dias antes do dia em causa;

T_{t-n} = Temperatura média exterior **n** dias antes do dia em causa.

Com base nos resultados obtidos através da aplicação da equação (1.5), para cada um dos dias da estação de arrefecimento, deverá ser calculada seguidamente a temperatura operativa óptima, para o mesmo período de tempo, utilizando para tal a equação (1.6).

$$T_{opt} = 0,33 \times T_{rm(t)} + 18,8 \quad (1.6)$$

Onde:

T_{opt} = Temperatura operativa óptima, em °C.

³O programa EnergyPlus disponibiliza também um relatório de output com estes valores: "environmental:outdoor drybulb temperature"

Finalmente, com base nos valores obtidos através da aplicação da equação (1.6), para cada uma das horas de funcionamento do edifício na estação de arrefecimento, será calculada a diferença de temperatura (ΔT_o), entre a temperatura operativa verificada no espaço (T_o) e a temperatura operativa óptima do respectivo dia (T_{opt}), utilizando para tal a equação (1.7).

$$\Delta T_o = |T_o - T_{opt}| \quad (1.7)$$

Depois de todos os valores calculados estima-se qual a diferença de temperatura (ΔT_o) máxima que ocorre em 95% do tempo do período de funcionamento do espaço ou edifício em estudo, durante a estação de arrefecimento. Este valor permite verificar qual a categoria de conforto adaptativo do mesmo espaço ou edifício em estudo.

Assim, por aplicação da tabela 1.4 poderá utilizar-se a tabela 1.6

Categoria I	$\Delta T_o \leq 2,0^\circ\text{C}$
Categoria II	$2,0^\circ\text{C} < \Delta T_o < 3,0^\circ\text{C}$
Categoria III	$3,0^\circ\text{C} < \Delta T_o < 4,0^\circ\text{C}$
Categoria IV	$\Delta T_o > 4,0^\circ\text{C}$

Tabela 1.6: Valores limites para ΔT_o , na estação de arrefecimento, em edifícios escolares, in [24]

1.4.6 Avaliação acústica

Conforme se referiu anteriormente a qualidade acústica dos espaços depende da capacidade da construção para evitar a intrusão de ruídos indesejáveis provenientes do exterior ou de espaços adjacentes, ou ainda de equipamentos. A qualidade acústica depende também, em certos casos de salas onde a comunicação seja relevante, das condições de reverberação do som nesse espaço.

Para evitar a intrusão de sons indesejáveis é necessário promover o isolamento sonoro dos elementos separadores. Adicionalmente, no caso dos equipamentos o seu ruído particular deverá ser minimizado. O controlo da reverberação no interior dos espaços depende das capacidades de absorção sonora no domínio da frequência dos materiais de revestimento das suas superfícies.

No sentido de assegurar níveis de qualidade acústica nos edifícios a legislação portuguesa impõe exigências de desempenho acústico à construção de edifícios tendo em atenção as actividades previstas no projectos para os diferentes espaços. Os parâmetros acústicos utilizados pelo RRAE que impõem diferentes níveis de desempenho tendo em consideração os diferentes tipos de espaços de arquitectura, são os seguintes:

- Índice de isolamento sonoro padronizado ponderado a sons de condução aérea entre fachadas exteriores e compartimentos elegíveis interiores ($D_{2m,nT,w}$), em dB;

- Índice de isolamento sonoro padronizado ponderado a sons de condução aérea entre diferentes compartimentos interiores ($D_{nT,w}$), em dB;
- Índice de isolamento sonoro padronizado ponderado a sons de percussão entre diferentes compartimentos interiores ($L'_{nT,w}$), em dB;
- Nível de avaliação do ruído particular devido a equipamentos ($L_{Ar,nT}$), em dB;
- Tempo de reverberação (T_R), em segundos.

norma EN 12354

Para o cálculo dos parâmetros acima descritos o mesmo RRAE preconiza o método de cálculo da norma europeia EN 12354, partes 1, 2, 3 e 6 [34]. A norma tem por título “**Acústica da Construção - Cálculo do desempenho acústico dos edifícios a partir do desempenho acústico do seus elementos**”.

Cálculo de $D_{nT,w}$ - norma EN 12354-1:2000

A parte 1 da norma EN 12354 trata do isolamento sonoro aos ruídos de condução aérea entre locais de um mesmo edifício. Esta norma define previamente algumas grandezas que são utilizadas no cálculo.

O índice de redução sonora aparente a sons de condução aérea R' é o produto de -10 pelo logaritmo da razão entre a potência sonora total W_{tot} transmitida e a potência sonora W_1 incidente sobre um elemento separador de dois espaços.

$$R' = -10 \times \lg \tau' \quad (1.8)$$

Onde:

$$\tau' = W_{tot}/W_1 \quad (1.9)$$

O índice de redução sonora aparente a sons de condução aérea R' é geralmente determinado através de ensaios e da aplicação da equação (1.10):

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \times \lg \left[\frac{S_s}{A} \right] \text{ dB} \quad (1.10)$$

Onde:

L_1 = Nível de pressão sonora média no local da emissão, em dB;

L_2 = Nível de pressão sonora média no local da recepção, em dB;

A = Área de absorção sonora equivalente no local de recepção, em m^2 ;

S_s = Área do elemento separador, em m^2 ;

O índice de isolamento sonoro padronizado a sons de condução aérea ($D_{n,T}$) é dado pela equação (1.11):

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \times \lg \left[\frac{T_R}{T_o} \right] \text{ dB} \quad (1.11)$$

Onde:

T_R = Tempo de reverberação no espaço de recepção, em segundos;

T_o = Tempo de reverberação de referência = 0,5 segundos;

O índice de isolamento sonoro normalizado (D_n) é dado pela equação (1.12):

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \times \lg \left[\frac{A}{A_o} \right] \text{ dB} \quad (1.12)$$

Onde:

A_o = Área de absorção sonora equivalente, $A_o = 10 \text{ m}^2$;

Podem assim ser estabelecidas as seguintes relações entre os parâmetros anteriormente definidos.

$$\begin{aligned} D_n &= R' + 10 \times \lg \left[\frac{A_o}{S_s} \right] \text{ dB} \\ &= R' + 10 \times \lg \left[\frac{10}{S_s} \right] \text{ dB} \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} D_{nT} &= R' + 10 \times \lg \left[\frac{0,16 \times V}{T_o \times S_s} \right] \\ &= R' + 10 \times \lg \left[\frac{0,32 \times V}{S_s} \right] \text{ dB} \end{aligned} \quad (1.14)$$

Onde:

V = Volume do espaço de recepção, m^3 ;

O RRAE utiliza o parâmetro $D_{nT,w}$ Isolamento sonoro padronizado ponderado, para avaliar o grau de isolamento a ruídos de condução aérea entre espaços de edifícios.

A potência sonora no local de recepção deve-se a ruído radiante devido aos elementos separadores dos espaços, e aos elementos marginais e ainda a outras transmissões directas e indirectas significativas. O factor de transmissão total (τ') conforme apresentado na equação (1.8)) pode ser decomposto em partes distintas conforme se apresenta na equação (1.15) e conforme é ilustrado na figura 1.6.

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (1.15)$$

Onde:

- τ' = Razão entre a potência sonora total radiada no espaço de recepção e a potência sonora incidente na parte comum ao elemento separador;
- τ_d = Razão entre a potência sonora radiada pela parte comum da parede separadora e potência sonora incidente na parte comum do elemento separador, inclui os caminhos Dd e Fd;
- τ_f = Razão entre a potência sonora radiada por um elemento lateral “f” no local de recepção e potência sonora incidente na parte comum do elemento separador, inclui os caminhos Ff e Df;
- τ_e = Razão entre a potência sonora radiada no local de recepção por um elemento da parede de separação devido à transmissão directa por condução aérea incidente sobre esse elemento, e a potência sonora incidente na parte comum do elemento separador;
- τ_s = Razão entre a potência sonora radiada no local de recepção por um sistema “s” devido à transmissão indirecta de ruídos aéreos incidentes sobre este sistema de transmissão e a potência sonora incidente sobre a parte comum do elemento separador;
- n = Número de elementos marginais, em princípio igual a 4, mas podendo ser superior ou inferior;
- m = Número de elementos com transmissão aérea por via directa de ruídos de condução aérea;
- k = Número de sistemas com transmissão indirecta de ruídos de condução aérea;

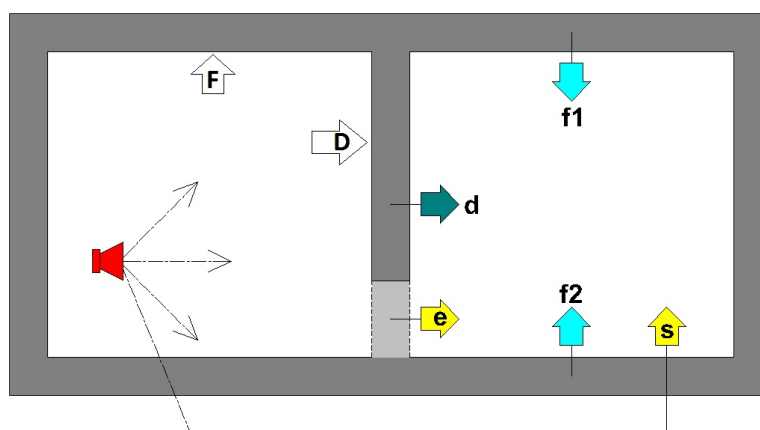


Figura 1.6: Diferentes contribuições para a transmissão sonora total de um espaço. “F” diz respeito à contribuição marginal (Flanking em inglês), “D” diz respeito à contribuição directa. A letra maiúscula identifica o espaço emissor e a letra minúscula o espaço receptor. Imagem re-construída com base na norma EN 12354-1 [34]

O ruído radiado por um elemento construtivo de um edifício pode ser considerado como a soma da transmissão sonora do contributo de vários caminhos de transmissão. Cada um desses caminhos pode ser identificado pelo elemento “i” sobre o qual o ruído incide no espaço emissor e o elemento “j” que radia o ruído para o espaço receptor. Os caminhos relativos à parede lateral e ao elemento separador estão indicados na figura 1.7.

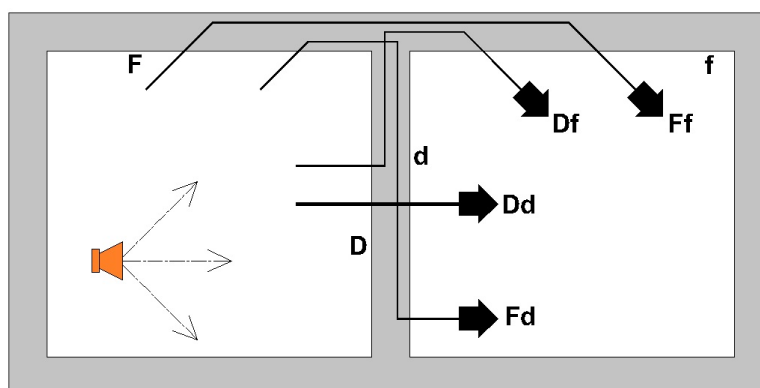


Figura 1.7: Definição dos caminhos de transmissão sonora entre dois espaços. Imagem re-construída com base na norma EN 12354-1 [34]

Para o cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea a norma EN 12354-1 [34] prevê dois métodos: um detalhado e outro simplificado.

No programa informático desenvolvido, no âmbito deste trabalho, utilizou-se sempre o método simplificado, pelo que se omite aqui a descrição do método detalhado.

O método de cálculo simplificado determina o índice de isolamento sonoro ponderado aparente a sons de condução aérea (R_w) a partir dos índices de isolamento sonoro dos seus elementos considerados. Esta ponderação realiza-se com base na norma EN ISO 717-1 [35]. Porém a este parâmetro R_w pode também ser somado um índice de adaptação do espectro C.

O RRAE prevê que, quando a área translúcida seja superior a 60% do elemento de fachada em análise, deva ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação apropriado C ou C_{Tr} , conforme o ruído dominante na emissão ⁴. A escolha do tipo de ruído dominante deve ser realizada com base na norma ISO 717-1, em presença do ruído dominante no local. Não possuindo elementos que permitam decidir qual o tipo de ruído preponderante adoptou-se, neste exemplo de estudo, o termo de adaptação ao ruído de tráfego C_{Tr} por ser o mais desfavorável.

A aplicação do modelo simplificado limita-se às transmissões directas e

⁴ C é o termo de adaptação espectral do índice de isolamento sonoro para ruído rosa incidente; C_{Tr} é o termo de adaptação espectral do índice de isolamento sonoro para ruído de tráfego incidente

marginais⁵ com estruturas essencialmente homogéneas. Assim o índice de isolamento sonoro ponderado entre dois espaços é calculado com base na equação (1.16).

$$R'_w = -10 \times \lg \left[10^{-\frac{R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd,w}}{10}} \right] \text{ dB} \quad (1.16)$$

Onde:

$R_{Dd,w}$ = Índice de isolamento sonoro ponderado por transmissão directa, em dB;

$R_{Ff,w}$ = Índice de isolamento sonoro ponderado marginal pelo caminho de transmissão Ff, em dB;

$R_{Df,w}$ = Índice de isolamento sonoro ponderado marginal pelo caminho de transmissão Df, em dB;

$R_{Fd,w}$ = Índice de isolamento sonoro ponderado marginal pelo caminho de transmissão Fd, em dB;

n = número de elementos marginais no local, em princípio $n=4$ (para elemento separador rectangular simples).

O índice de isolamento sonoro ponderado, por transmissão directa, é determinado a partir do valor do elemento de separação, de acordo com a equação (1.17).

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (1.17)$$

Onde:

$R_{Dd,w}$ = Índice de isolamento sonoro ponderado do elemento separador, em dB;

$\Delta R_{Dd,w}$ = O acréscimo de isolamento sonoro ponderado, por adição de um elemento duplicador do lado da emissão ou do lado da recepção, em dB.

Os índices de isolamento sonoro marginal ponderado são calculados com base nas equações (1.18), (1.19) e (1.20).

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \times \lg \left[\frac{S_s}{l_o \times l_f} \right] \text{ dB} \quad (1.18)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \times \lg \left[\frac{S_s}{l_o \times l_f} \right] \text{ dB} \quad (1.19)$$

⁵Não são consideradas as contribuições de elementos de pequenas dimensões ($D_{n,e}$), nem a contribuição indirecta total medida ($D_{n,s}$)

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{d,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \times \lg \left[\frac{S_s}{l_o \times l_f} \right] \text{ dB} \quad (1.20)$$

Onde:

$R_{F,w}$ = Índice de isolamento sonoro ponderado do elemento marginal “F” no lado da emissão, em dB;

$R_{f,w}$ = Índice de isolamento sonoro ponderado do elemento marginal “f” no lado da recepção, em dB;

$\Delta R_{Ff,w}$ = O acréscimo de isolamento sonora ponderado, por adição de um elemento duplicador ao elemento marginal, quer seja do lado da emissão ou do lado da recepção, em dB;

$\Delta R_{Fd,w}$ = O acréscimo de isolamento sonoro ponderado, por adição de um elemento duplicador ao elemento marginal do lado da emissão, ou ao elemento separador do lado da recepção, em dB;

$\Delta R_{Df,w}$ = O acréscimo de isolamento sonora ponderado, por adição de um elemento duplicador ao elemento separador do lado da emissão, ou ao elemento marginal do lado da recepção, em dB;

ΔK_{Ff} = O índice de isolamento vibratório pelo caminho de transmissão Ff, em dB;

ΔK_{Fd} = O índice de isolamento vibratório pelo caminho de transmissão Fd, em dB;

ΔK_{Df} = O índice de isolamento vibratório pelo caminho de transmissão Df, em dB;

S_s = A superfície do elemento separador, em m²;

l_f = O comprimento da junção corrente entre a parede de separação e as paredes marginais F e f, em m;

l_o = O comprimento da junção de referência $l_o = 1\text{m}$.

O cálculo dos índices de redução de transmissão vibratória K_{ij} deve realizar-se com base no “Anexo E” da mesma norma. No caso de elementos homogêneos o índice de redução de transmissão vibratória pode ser expresso através do factor de transmissão γ_{ij} , correspondente à transmissão, ao nível da junção, dos elementos i e j, conforme a equação (1.21).

$$\begin{aligned} K_{ij} &= -10 \times \lg [\gamma_{ij}] + 5 \times \lg \left[\frac{f_{c,j}}{f_{ref}} \right] \\ &= -10 \times \lg [\gamma_{ij}] + 5 \times \lg \left[\frac{f_{c,i}}{f_{ref}} \right] \text{ dB} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Onde:

f_c = Frequência crítica, em Hz;

f_{ref} = Frequência de referência, $f_{ref} = 1000$ Hz.

Para junções de elementos correntes o cálculo dos índices de redução de transmissão vibratória K_{ij} poderão ser estimados nos termos da norma EN 12354-1 [34] por métodos semi-empíricos, em função da massa superficial dos elementos designados por m_1 e m_2 . Os valores obtidos segundo estes métodos pressupõem que a massa dos elementos complanares é igual.

As equações para determinação dos valores dos índices de redução de transmissão vibratória K_{ij} são função da grandeza M definida pela equação (1.22).

$$M = \lg \left[\frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \right] \quad (1.22)$$

Onde:

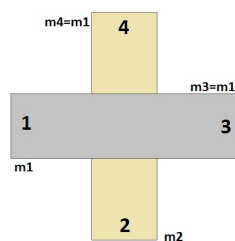
m'_i = Massa superficial do elemento **i** (elemento excitado), do caminho de transmissão **ij**, em Kg/m²;

$m'_{\perp i}$ = Massa superficial do elemento perpendicular ao elemento excitado, e que constitui essa junção, em Kg/m².

Para o cálculo de M deve utilizar-se unicamente a massa correspondente ao elemento base que está ligada aos elementos construtivos em junção, devendo ser excluídas as massas de elementos de revestimentos tais como lajes flutuantes ou tectos falsos.

Em geral, a transmissão é pouco dependente da frequência no intervalo compreendido entre os 125Hz e os 2000Hz. As equações empíricas do cálculo dos K_{ij} em que se indica 0dB/oitava, referem-se aos casos em que a transmissão sonora é independente da frequência.

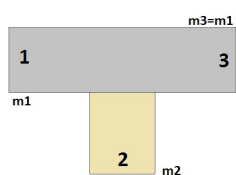
Apresenta-se nas tabelas 1.7 a 1.12 as equações para cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} que devem ser utilizadas, tendo em consideração os respectivos tipos construtivos.



$$K_{13} = 8,7 + 17,1 \times M + 5,7 \times M^2 \text{ dB; 0dB/oit.}$$

$$K_{12} = K_{23} = 8,7 + 5,7 \times M^2 \text{ dB; 0dB/oitava}$$

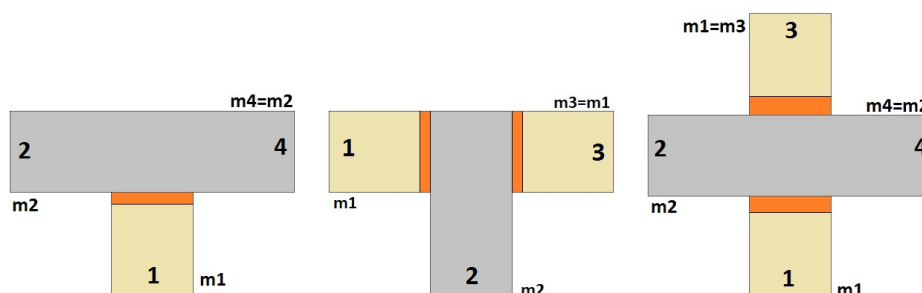
Tabela 1.7: Junção rígida em X com elementos homogêneos



$$K_{13} = 8,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 \text{ dB; } 0\text{dB/oit.}$$

$$K_{12} = K_{23} = 5,7 + 5,7 \times M^2 \text{ dB; } 0\text{dB/oitava}$$

Tabela 1.8: Junção rígida em T com elementos homogêneos



$$K_{13} = 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 + 2 \times \Delta_1 \text{ dB;}$$

$$K_{24} = 3,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 \text{ dB; } 0\text{dB} \leq K_{24} \leq -4\text{dB;}$$

$$K_{12} = K_{23} = 5,7 + 5,7 \times M^2 + \Delta_1 \text{ dB.}$$

Tabela 1.9: Junção rígida em X ou T de elementos homogêneos com interposição de elementos resilientes

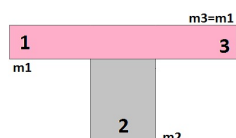
Onde:

$$\Delta_1 = 10 \times \lg 10(f/f_1); f > f_1;$$

$$f_1 = 125\text{Hz se } (E_1/e_1) = 100\text{MN/m}^3;$$

E_1 = Módulo de Young, em N/m^2 .

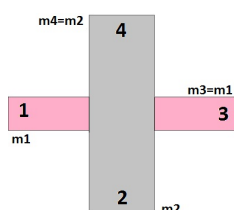
e_1 = Espessura do elemento resiliente interposto, em m.



$$K_{13} = 5 + 10 \times M \text{ dB; mínimo } 5\text{dB; } 0\text{dB/oitava;}$$

$$K_{12} = K_{23} = 10 + 10 \times |M| \text{ dB; } 0\text{dB/oitava.}$$

Tabela 1.10: Junção de Fachada Leve com elemento homogêneo



$$K_{13} = 10 + 20 \times M - 3,3 \times \lg \left[\frac{f}{f_k} \right] \text{ dB; mínimo 10dB;}$$

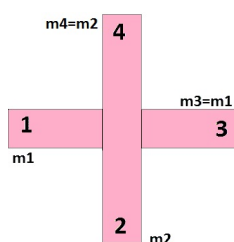
$$K_{24} = 3,0 - 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 \text{ dB;}$$

$$(m_2/m_1) > 3; \text{ 0 dB/oitava}$$

$$K_{12} = K_{23} = 10 + 10 \times |M| - 3,3 \times \lg \left[\frac{f}{f_k} \right] \text{ dB;}$$

$$f_k = 500 \text{ Hz}$$

Tabela 1.11: Junção de elemento leve com elemento homogêneo



$$K_{13} = 10 + 20 \times M - 3,3 \times \lg \left[\frac{f}{f_k} \right] \text{ dB; mínimo 10dB;}$$

$$K_{12} = K_{23} = 10 + 10 \times |M| - 3,3 \times \lg \left[\frac{f}{f_k} \right] \text{ dB;}$$

$$f_k = 500 \text{ Hz}$$

Tabela 1.12: Junção de dois elementos leves

Cálculo de $L'_{nT,w}$ - norma EN 12354-2:2000

A parte 2 da norma EN 12354 [34] trata do isolamento sonoro a sons de percussão entre locais de um mesmo edifício.

O índice de isolamento sonoro a sons de percussão (ou impacto) entre espaços, de acordo com a norma EN ISO 140-7 [36], pode ser determinado através de diversas grandezas: L'_n , L'_{nT} , ou $L'_n + C_I$. A partir destas grandezas, expressas em bandas de frequência (oitava ou terços de oitava) é possível obter o índice de isolamento sonoro respectivo - porém expresso num valor único - através da aplicação da norma EN ISO 717-2 [37]. Obtendo-se assim, respectivamente: $L'_{n,w}$, $L'_{nT,w}$, ou $L'_{nT,w} + C_I$, em que C_I é o termo de adaptação espectral para o ruído de impacto nos termos da norma EN ISO 717-2.

O índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado L'_n é o nível de ruído de percussão normalizado relativamente à área de absorção equivalente de referência no local de recepção - equação (1.23):

$$L'_n = L_i + 10 \times \lg \left[\frac{A}{A_o} \right] \text{ dB} \quad (1.23)$$

Onde:

L_i = Nível de ruído de percussão no local da recepção, em dB;

A = Área de absorção equivalente medida no local de recepção, em m^2 ;

A_o = Área de absorção de referência; $A_o = 10 \text{ m}^2$.

O índice de isolamento sonoro a sons de percussão padronizado L'_{nT} é o nível de ruído de percussão normalizado em termos do tempo de reverberação do local receptor em comparação com valor de referência de 0,5 segundos - equação (1.24):

$$L'_{nT} = L_i - 10 \times \lg \left[\frac{T_R}{T_o} \right] \text{ dB} \quad (1.24)$$

Onde:

T_R = Tempo de reverberação no local de recepção, em segundos;

T_o = Tempo de reverberação de referência; Para habitações $T_o = 0,5$ segundos.

Relação entre estas grandezas (L'_n e L'_{nT}) - equação (1.25) :

$$\begin{aligned} L'_{nT} &= L'_n - 10 \times \lg \left[\frac{0,16 \times V}{A_o \times T_o} \right] \text{ dB} \\ &= L'_n - 10 \times \lg [0,032 \times V] \text{ dB} \end{aligned} \quad (1.25)$$

Onde:

V = Volume do espaço de recepção, em m^3 .

A potência sonora no local de recepção é devida ao ruído que é radiado por cada elemento construtivo, o qual por sua vez se deve ao ruído vibratório que é transmitido por impacto a esse elemento no espaço emissor. Considera-se que as transmissões por cada um dos caminhos são independentes e o campo sonoro e vibratório se comportam de forma aleatória de modo a que o nível de ruído de impacto L'_n pode ser obtido pela soma da energia transmitida através de cada um dos caminhos. Estes caminhos de transmissão encontram-se definidos na figura 1.8, onde se indica quer a transmissão marginal quer a transmissão directa.

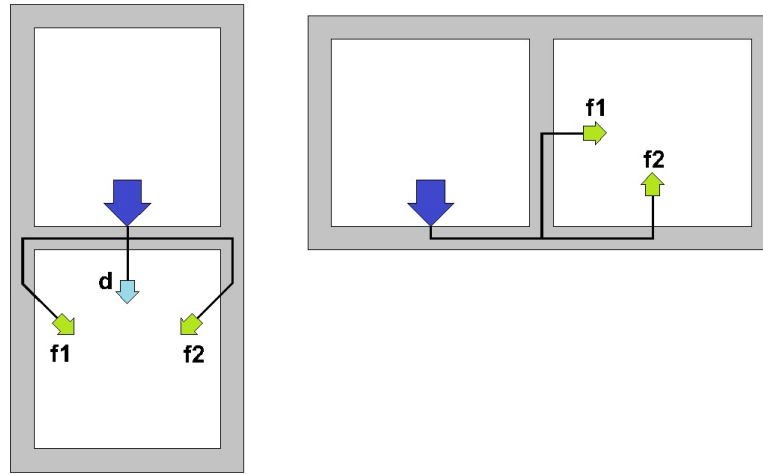


Figura 1.8: Definição dos caminhos de transmissão sonora entre dois espaços, sobrepostos ou contíguos. Imagem re-construída com base na norma EN 12354-2 [34]

Para um par de espaços sobrepostos em que o espaço superior é o espaço emissor, o nível de ruído de impacto L'_n no local receptor é dado pela equação (1.26).

$$L'_n = 10 \times \lg \left[10^{L_{n,d}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \right] \text{ dB} \quad (1.26)$$

Onde:

$L_{n,d}$ = Ruído de impacto normalizado, devido à transmissão directa, em dB;

$L_{n,ij}$ = Ruído de impacto normalizado, devido à transmissão marginal, em dB;

n = número de caminhos de transmissão indirecta.

Para um par de espaços contíguos ou adjacentes, o nível de ruído de impacto L'_n no local receptor é dado pela equação (1.27).

$$L'_n = 10 \times \lg \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \text{ dB} \quad (1.27)$$

Para o cálculo do isolamento sonoro a sons de percussão utiliza-se o método detalhado, conforme definido na norma EN 12354-2 [34].

Para o cálculo da transmissão directa utiliza-se a equação (1.28).

$$L_{n,d} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} - \Delta L_{d,situ} \text{ dB} \quad (1.28)$$

Onde:

$L_{n,situ}$ = Valor in situ do nível de ruído de impacto normalizado, em dB;

ΔL_{situ} = melhoria no ruído de impacto normalizado in situ, devido à existência de um revestimento de piso, em dB;

$\Delta L_{d,situ}$ = melhoria no ruído de impacto normalizado in situ, devido à existência de um elemento duplicador no elemento separador, em dB.

Para o cálculo das transmissões marginais entre elementos separadores “i” (laje de pavimento) e “j” (elementos marginais), o nível de impacto normalizado é utiliza-se a equação (1.29).

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \times \lg \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \text{ dB} \quad (1.29)$$

Onde:

$R_{i,situ}$ = Índice de redução sonora, a sons de condução aérea, do elemento “i” no espaço receptor, em dB;

$R_{j,situ}$ = Índice de redução sonora, a sons de condução aérea, do elemento “j” no espaço receptor, em dB;

$\Delta R_{j,situ}$ = melhoria do isolamento sonoro dos sons de condução aérea in situ, devido à existência de um elemento duplicador, que se faz sentir no espaço de recepção, em dB;

$\overline{D_{v,ij,situ}}$ = isolamento vibratório bidireccional, em dB;

S_i = Área do elementos excitado, em m^2 ;

S_j = Área do elemento radiante, em m^2 ;

O valor do isolamento vibratório bidireccional pode ser deduzido a partir do índice de isolamento vibratório de acordo com a equação (1.30).

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \times \lg \left[\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} \times a_{j,situ}}} \right] \text{ dB} \quad (1.30)$$

Onde:

$a_{i,situ}$ = Comprimento de absorção equivalente do elemento “i” in situ, em m;

$a_{j,situ}$ = Comprimento de absorção equivalente do elemento “j” in situ, em m;

Para alguns elementos construtivos o comprimento de absorção equivalente, $a_{i,situ}$ considera-se numericamente igual à área superficial do referido elemento $a_{i,situ} = S_i/l_o$ e $a_{j,situ} = S_j/l_o$, em que $l_o = 1m^2$.

Os casos de elementos construtivos em que esta relação se verifica são os seguintes:

- Elementos de paredes duplas leves, madeira ou metálicas;
- Elementos em que o factor de perdas interno é superior a 0,03;
- Elementos que são mais leves que os elementos construtivos envolventes (a uma razão de 3 para 1);
- Elementos que não estão ligados de forma rígida aos elementos construtivos circundantes.

O programa CAEd utiliza no seu algoritmo para o cálculo de $L_{n,ij}$ a simplificação acima descrita, conforme se representa na equação (1.31). Esta tem como premissas a substituição do termo $\overline{D_{v,ij,situ}}$ ⁶ da equação (1.29) pela equação (1.30).

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - K_{ij} + 10 \times \lg \left[\frac{l_{ij}}{S_i} \right] \text{ dB} \quad (1.31)$$

Numa primeira aproximação o comprimento de absorção equivalente pode ser considerado como $a_{i,situ} = S_i/l_o$ e $a_{j,situ} = S_j/l_o$, para qualquer tipo de elemento, em que e $a_{j,situ} = S_j/l_o$. Se o índice de isolamento vibratório tem um valor inferior a $K_{ij,min}$ deverá utilizar-se o valor mínimo conforme a equação (1.32), para (Kij = Ff, Fd ou Df).

$$K_{ij,min} = 10 \times \lg \left[l_{ij} \times l_o \times \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right] \text{ dB} \quad (1.32)$$

Limitações deste procedimento de cálculo:

- Este modelo só pode ser aplicado em combinações de elementos para os quais o índice de isolamento vibratório seja conhecido ou possa ser determinado a partir de valores conhecidos;
- É recomendável que os elementos construtivos tenham aproximadamente as mesmas características radiativas dos dois lados da junção;
- A contribuição de caminhos de transmissão secundários com diversas junções é negligenciável;
- O índice de isolamento do nível de ruído de impacto ΔL_n medido sobre uma laje maciça de acordo com a norma EN ISO 140-8[38], não poderá ser utilizada para o caso de um pavimento em soalho de madeira ou com outro pavimento leve semelhante.

⁶assumindo que $a_{i,situ} = S_i$ e $a_{j,situ} = S_j$, do ponto de vista numérico

Cálculo de $D_{2m,nT,w}$ - norma EN 12354-3:2000

A parte 3 da norma EN 12354 [34] trata do isolamento sonoro de fachadas a sons de condução aérea provenientes do exterior.

Define-se como isolamento sonoro normalizado $D_{2m,n}$ a diferença entre o nível de pressão sonora no exterior, afastado 2 m do paramento exterior da fachada e o nível de pressão sonora no local de recepção, normalizada relativamente à área de absorção sonora do local receptor e que corresponde a um valor de referência da área de absorção. Conforme equação (1.33).

$$D_{2m,n} = L_{1,2m} - L_2 - 10 \times \lg \left[\frac{A}{A_o} \right] \text{ dB} \quad (1.33)$$

Onde:

A_o = Área de absorção de referência $A_o = 10\text{m}^2$.

$$\begin{aligned} D_{2m,nT} &= D_{2m,n} + 10 \times \lg \left[0,16 \times \frac{V}{T_o \times A_o} \right] \text{ dB} \\ &= D_{2m,n} + 10 \times \lg [0,032 \times V] \text{ dB} \end{aligned} \quad (1.34)$$

O índice R' de redução sonora aparente, a sons de condução aérea, de uma fachada, relativamente a um campo difuso de excitação sonora incidente, calcula-se pela soma; da potência sonora transmitida por via directa de cada um dos elementos; com potência sonora dos elementos marginais.

$$R' = -10 \times \lg \left(\sum_{i=1}^n \tau_{e,i} + \sum_{i=1}^m \tau_{f,i} \right) \text{ dB} \quad (1.35)$$

Onde:

$\tau_{e,i}$ = Razão entre a potência sonora radiada por um elemento de fachada “i” relativa à transmissão directa sobre a mesma fachada e a transmissão sonora total incidente sobre a fachada;

$\tau_{f,i}$ = Razão entre a potência sonora radiada por um elemento marginal “f” no espaço receptor relativo à transmissão marginal e a transmissão sonora total incidente sobre a fachada, porém nos termos do ponto 4.3 da norma EN 12354-3 [34] as transmissões marginais são normalmente negligenciáveis. No caso da construção pesada em Portugal poderá ser considerado um valor de aproximadamente 2dB para este efeito;

n = Número de elementos da fachada com transmissão directa;

m = Número de elementos da fachada com transmissão marginal.

O índice isolamento sonoro padronizado, a sons de condução aérea, de uma fachada $D_{2m,nT}$ depende do índice de redução sonora aparente R'

dessa mesma fachada visto do interior, da influência da forma exterior da fachada, tal como a existência de varandas e das dimensões da mesma fachada, de acordo com a equação (1.36).

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \times \lg \left(\frac{V}{6 \times T_o \times S} \right) \text{ dB} \quad (1.36)$$

Onde:

V = Volume do local de recepção, em m^3 ;

S = Superfície total da fachada medida pelo interior, em m^2 ;

ΔL_{fs} Isolamento acústico devido à forma da fachada, em dB.

Todos os elementos da fachada devem ser incluídos no cálculo, tais como pequenos elementos [equação (1.37)] ou outros elementos de fachada [equação (1.38)].

$$\tau_{e,j} = \frac{A_o}{S} \times 10^{-D_{n,e,i}/10} \text{ dB} \quad (1.37)$$

Onde:

$D_{n,e,i}$ = Índice de isolamento sonoro normalizado de um elemento de pequenas dimensões “i”, em dB;

S = Superfície total da fachada medida pelo interior, em m^2 ;

A_o Área de referência $A_o = 10\text{m}^2$.

$$\tau_{e,j} = \frac{S_i}{S} \times 10^{-R_i/10} \text{ dB} \quad (1.38)$$

Onde:

R_i = Índice de redução sonora, a sons de condução aérea, do elemento “i”, em dB;

S = Superfície total da fachada medida pelo interior, em m^2 ;

Tempo de reverberação - norma EN 12354-6:2003

A absorção sonora de espaços fechados pode ser expressa através da área de absorção sonora equivalente, ou do tempo de reverberação, nos termos da norma prEN ISO 3382-2[39]. Estas variáveis devem ser expressas por bandas de frequências (oitavas ou terços de oitava).

O tempo de reverberação T_R é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora de um determinado som seja reduzido em 60dB após a paragem da excitação sonora dessa fonte sonora.

A absorção sonora dos elementos (construtivos ou outros) dos espaços podem ser expressos através da sua área de absorção sonora equivalente ou do seu coeficiente de absorção sonora. Estas variáveis devem ser

expressas por bandas de frequências (oitavas ou terços de oitava).

Área de absorção sonora equivalente de um objecto A_{obj} é a diferença entre a área de absorção sonora equivalente de uma sala de teste com ou sem esse objecto.

Coefficiente de absorção sonora α_s é a área de absorção sonora equivalente de um provete de teste dividido pela área do mesmo provete.

Para determinar a área de absorção equivalente de um espaço fechado deve utilizar-se a equação (1.39).

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} \times S_i + \sum_{j=1}^o A_{obj,j} + \sum_{k=1}^p \alpha_{s,k} \times S_k + A_{air} \quad (1.39)$$

Onde:

n = número de superfícies “i”;

o = número de objectos “j”;

p = número de conjuntos de objectos “k”;

A área de absorção equivalente do ar A_{air} é dada pela equação (1.40). De acordo com a norma EN 12354-6 A_{air} pode ser negligenciado para salas cujo volume seja inferior a 200 m².

$$A_{air} = 4 \times m \times V \times (1 - \Psi) \quad (1.40)$$

Onde:

m = Potência de absorção sonora do ar, em Neper/m;

V = Volume do espaço vazio fechado, em m³;

Ψ = Fracção de volume ocupado por objectos;

Uma fracção de volume ocupado por objectos pode ser expressa através da equação (1.41).

$$\Psi = \frac{\sum_{j=1}^o V_{obj,j} + \sum_{k=1}^p V_{obj,k}}{V} \quad (1.41)$$

Assim o tempo de reverberação de um espaço fechado é função:

- da área total de absorção equivalente A , obtida através da equação (1.37);
- do Volume V do espaço vazio interior do espaço;
- da fracção de volume ocupado por objectos ψ existentes no espaço;

O tempo de reverberação T_R determina-se através da equação (1.42):

$$T_R = \frac{55,3}{c_o} \times \frac{V \times (1 - \Psi)}{A} \quad (1.42)$$

Onde:

c_o = A velocidade de transmissão do som no ar, em m/s.

Considerando que a velocidade de transmissão do som no ar $C_o = 345,6$ m/s a fracção $55,3/c_o$ toma o valor 0,16 na equação (1.42), nos termos da norma EN ISO 140-4[40].

Identifica-se na norma EN 12354-6:2003 como limitação para a utilização desta expressão, que a sua aplicação se restrinja a recintos fechados com as seguintes características:

Volumes de forma regular: nenhuma dimensão deve exceder 5 vezes a dimensão de qualquer outra;

Absorção com distribuição uniforme: em cada par de superfícies opostas a relação entre diferentes valores do coeficiente de absorção sonora não deve exceder um factor superior a 3;

Número limitado de objectos: a fracção de volume de objectos não deve exceder 0,2.

Capítulo 2

Desenvolvimento do estudo

Conforme se afirmou no sub-capítulo 1.4 metodologia, página, 18 este trabalho compreende uma fase de desenvolvimento de ferramentas informáticas e uma fase de aplicação das mesmas a um exemplo prático, ou estudo de caso onde se fará a avaliação de um projecto de arquitectura.

O sistema informático em apreço recorre à utilização da linguagem PROLOG, mais especificamente o interpretador SWI-PROLOG, desenvolvido por Jan Wielemaker da Universidade de Amesterdão [22].

Escolheu-se a linguagem SWI-PROLOG pelas seguintes razões:

- É uma linguagem declarativa que permite a representação de conhecimento e de informação a serem utilizados nas rotinas de cálculo de forma simples e rápida;
- Permite a introdução de algoritmos de procura que, associados ao conhecimento representado, poderão permitir a realização de inferências lógicas (daí a associação ao conceito de Inteligência Artificial);
- Está equipada com um módulo gráfico para interface com o utilizador (*Graphic User Interface* - GUI), com a designação de módulo XPCE, o qual utiliza os conceitos de programação orientada por objectos o que permite uma ligação robusta entre a visualização a três dimensões (3D) e as tarefas de procura anteriormente referidos;
- Permite a realização de um sistema Multi-Plataforma, dado que o código fonte desenvolvido poderá ser utilizado em ambientes Windows, Linux, Unix ou MacOS.

Segundo os autores da linguagem [41] o módulo XPCE não é exactamente PROLOG, mas constitui-se como um ambiente de programação híbrido que permite ao utilizador tirar partido das capacidades do PROLOG e simultaneamente fazê-lo num ambiente gráfico com uma interface potente e agradável para as necessidades do utilizador, particularmente neste caso em que se trata de conceptualizar projectos de arquitectura.

Aliás, como referem os autores [41], XPCE e PROLOG são sistemas muito distintos baseados em paradigmas de programação muito diferentes. Em XPCE é possível construir objectos globais com métodos, funções e atribuição destrutiva (*send methods, get methods*), no entanto XPCE não utiliza o conceito de não-determinismo tal como ele existe em PROLOG.

A partir de uma análise introspectiva do que é o projecto de arquitectura, procurou desenvolver-se um sistema que possibilitasse ao arquitecto uma concepção arquitectónica, o mais adequada do ponto de vista cognitivo possível e que simultaneamente pudesse contribuir para que um conjunto cada vez maior de informação possa ser tomado em consideração durante os actos de concepção de edifícios.

Efectivamente, a regulamentação sobre edifícios e particularmente sobre os aspectos de conforto ambiental dos mesmos, tem crescido nos últimos anos em complexidade e níveis de exigência, pelo que se torna cada vez mais difícil aos arquitectos integrar, de uma forma simultânea, o grande conjunto de variáveis que se colocam em equação, no processo de síntese que constitui o desenvolvimento de um projecto de arquitectura.

Para tentar dar resposta a este conjunto de necessidades colocou-se em desenvolvimento um conjunto de programas, interligados entre si, que deverão permitir ao arquitecto a realização de avaliações de desempenho integradas, relativas às diversas variáveis relacionadas com o conforto das pessoas dentro dos edifícios e com a regulamentação afim. Os módulos em desenvolvimento são os seguintes:

- Programa comum que interliga com todos os outros designado no âmbito deste trabalho por “**Módulo Comum - common_Editor**”, figura 2.2;
- Programa de interface com o programa **EnergyPlus** designado por no âmbito deste trabalho por “**e+ editor**”;
- Programa para verificação dos Regulamentos de Acústica dos Edifícios - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) e Regulamento Geral sobre o Ruído (RGR), designado no âmbito deste trabalho por “**CAEd - Cálculo Acústico de Edifícios**”;
- Programa para verificação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, designado no âmbito deste trabalho por “**RctCAD_v2**”.

Na figura 2.1 apresenta-se um esquema do funcionamento do sistema em desenvolvimento onde se evidenciam as hierarquias relativas às capacidades de exportação dos módulos que concorrem todos de forma integrada para informar a concepção arquitectónica.

Arquitectura do sistema

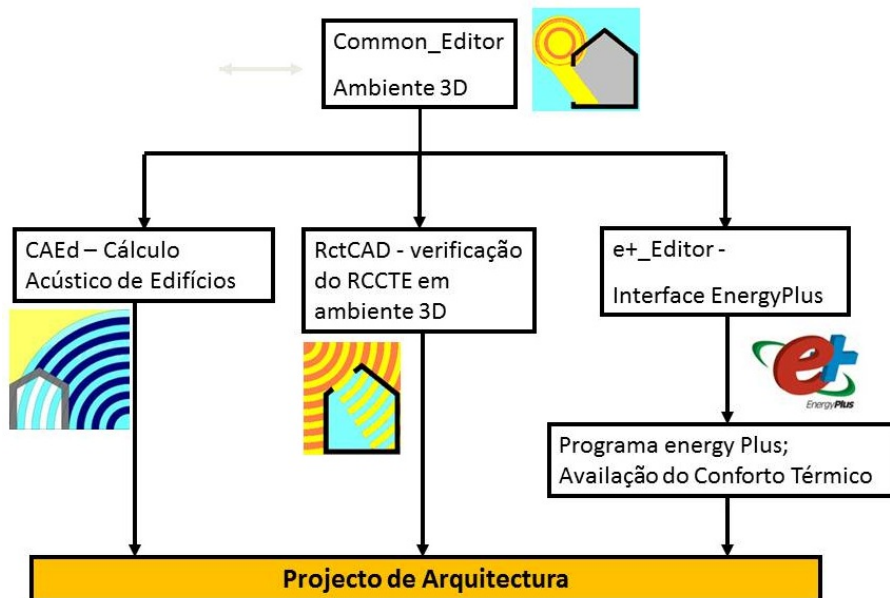


Figura 2.1: Arquitectura do sistema informático em desenvolvimento - A partir do common_Editor é possível exportar geometrias para outros módulos, os quais permitirão a realização de diferentes avaliações do desempenho tendo por base uma forma arquitectónica comum

2.1 Módulo comum - common_Editor

O objectivo deste módulo é permitir ao arquitecto uma conceptualização a 3D do edifício em fase de concepção. A entidade primária a partir da qual o arquitecto realiza esta conceptualização é o compartimento ou espaço fechado.

Para o efeito desenvolveu-se um conjunto de rotinas que permitem a construção volumétrica de espaços de uma forma rápida e adequada do ponto de vista cognitivo. Na figura 2.2 apresenta-se uma imagem da interface com o utilizador, sendo possível visualizar uma representação de coordenadas a 3D no ambiente para posterior representação dos espaços.

O programa é constituído por uma barra de menus, uma barra de ferramentas constituída por um conjunto de ícons que oferecem um atalho rápido para as acções consideradas mais frequentes, um editor 3D onde são representados os objectos que vão sendo definidos, tais como os diversos espaços que constituem o edifício, suas superfícies de paredes coberturas ou pavimentos, bem como as janelas ou portas (objectos sub-superfícies) que essas superfícies possuam.

O compartimento ou espaço fechado poderá crescer e decompor-se em diferentes volumes, bem como permitir a geração de outros espaços adja-

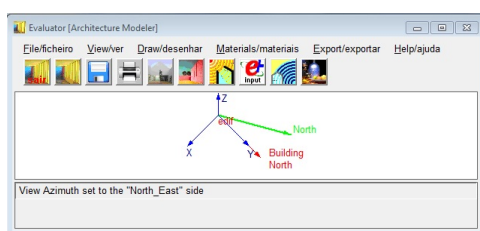


Figura 2.2: Common_Editor - Ambiente a 3D para visualização do modelo do edifício definido volumetricamente através dos espaços que o constituem

centes a qualquer espaço já definido a partir desse espaço pré-existente. Na figura 2.3 representa-se uma das caixa de diálogo que permitem a construção de um novo espaço e na figura 2.4 é possível visualizar um espaço já representado no ambiente 3D bem como um menu de acções possíveis a partir de qualquer objecto superfície. A eleição deste objecto conceptual que assume um papel de entidade primária no projecto deveu-se ao facto de se ter considerado que ele sintetizava um conjunto de características que lhe permitiam inter-agir de uma forma rápida com os programas de interface que lhe seriam associados.

- A temperatura operativa, enquanto variável que permite avaliar o conforto térmico [equação (1.3)] depende, entre outras variáveis, da temperatura radiante média do espaço envolvente, e esta por sua vez exige informação sobre a área e constituição da envolvente do espaço e o conhecimento da localização e temperatura da superfície interior dos diferentes elementos da envolvente [42];
- No programa de cálculo acústico de edifícios a transmissão sonora e, assim também, o isolamento sonoro são estudados no âmbito da norma EN 12354, partes 1 e 2, realizam-se através da ligação de dois espaços fechados;
- No âmbito do mesmo programa as avaliações do tempo de reverberação de acordo com a norma EN 12354-6 referem-se a espaços fechados de tipo compartimentos;
- As avaliações de consumo energético que se realizam, com base no modelo do RCCTE, preconizam outras entidades espaciais como conceito geométrico inicial: a fracção autónoma ou o edifício. Porém, estes poderão ser definidos a partir de um conjunto de espaços previamente agrupados;
- As avaliações de consumo energético que se realizam, com base no programa EnergyPlus, preconizam outras entidades espaciais como conceito geométrico inicial: neste caso, a zona térmica (vista como um conjunto de espaços com padrões de consumo e ocupação semelhantes) ou o edifício (visto como um conjunto de zonas térmicas). De igual modo, zonas térmicas e edifícios poderão ser definidos a partir de um conjunto de espaços previamente agrupados;
- O conceito de espaço fechado é também consistente com o possível desenvolvimento futuro (já fora do âmbito deste trabalho) de uma in-

terface com o programa Radiance para avaliação do desempenho da iluminação natural no interior dos espaços fechados, em virtude de os fenômenos de inter-reflexão da iluminação serem imprescindíveis na avaliação destes parâmetros.

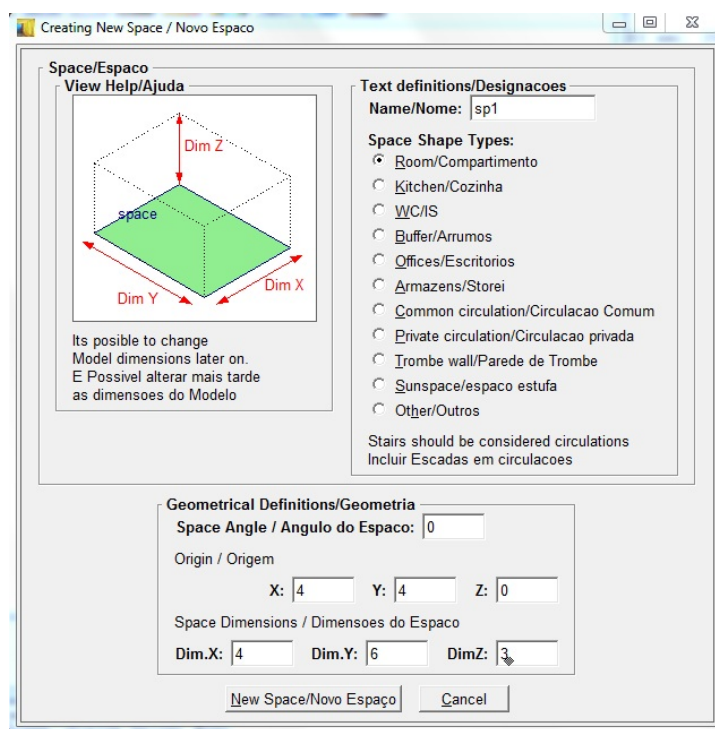


Figura 2.3: Common_Editor - Caixa de diálogo para criar novo espaço

O conceito de espaço ou recinto fechado (*enclosure*) assume também um papel significativo no pensamento do filósofo Martin Heidegger[43], cuja obra constitui um dos fundamentos teóricos da obra de Peter Zumthor.

O espaço representado neste sistema em desenvolvimento é o espaço geométrico tridimensional, mas o conceito de espaço que Heidegger caracteriza refere-se ao espaço concreto que tem por base a experiência do quotidiano.

Para Heidegger os espaços recebem o seu ser a partir do conceito de lugar e não da definição geométrica do espaço. Porém a relação entre exterior e interior que é um aspecto primordial do conceito de espaço concreto e possui um grau variável de extensão e enclausuramento. Enquanto que as paisagens são entidades de extensão contínua, os assentamentos edificados constituem basicamente entidades de tipo recinto fechado ou enclausuramentos.

Um recinto fechado é definido por uma fronteira. As fronteiras do espaço construído são as paredes, pavimento e tecto enquanto as fronteiras de uma paisagem são semelhantes, porém formados pelo solo, horizonte e

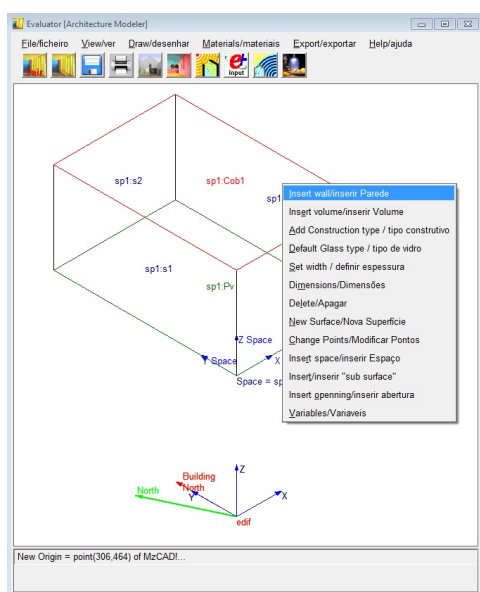


Figura 2.4: Um espaço é constituído pelas suas superfícies. Seleccionando o seu nome ou designação no Editor 3D é possível aceder a um conjunto diversificado de acções para manipular o espaço ou as superfícies. Tais como por exemplo: subdividir superfície existente em outras duas, criar novo volume no espaço a partir de uma superfície existente ou mesmo criar novo espaço adjacente ao existente

céu.

As propriedades de enclausuramento de uma fronteira são definidas pela existência de aberturas ou janelas. Uma fronteira, por exemplo uma parede, torna a estrutura espacial visível em termos de extensão contínua ou descontínua, de direcção e de ritmo.

Nestes termos entendeu-se que a entidade espaço servia, numa primeira fase, do desenvolvimento deste sistema, de forma muito satisfatória os objectivos do mesmo sistema.

Posteriormente poderão ser desenvolvidas e acrescentadas a este sistema outro tipo de sintaxes espaciais baseadas em outros paradigmas arquitectónicos.

O common_Editor tem por objectivo permitir uma conceptualização da arquitectura em fase de projecto de modo a que seja possível ao arquitecto realizar em tempo real um conjunto diversificado de simulações, verificações ou avaliações simultâneas do desempenho de um grande número de variáveis.

Assim, a partir do modelo geométrico base definido com o common_Editor será possível exportar para outros programas, os modelos geométricos de dimensões e formas equivalentes, bem como de características construtivas e de materiais correspondentes. Deste modo será possível à razão de um "clique" exportar toda uma geometria e correspondente solução construtiva para posterior rápida avaliação com outro programa mais específico.

2.1.1 Funcionalidades do programa common_Editor

O programa common_Editor permite uma visualização simplificada a 3D dos espaços de um edifício durante o seu processo de concepção. Essa visualização permite que o arquitecto tenha uma ideia da volumetria do conjunto de edifício à medida que vai organizando os seus espaços no projecto.

Cada entidade “espaço”, correspondente a um compartimento, é definida previamente como um conjunto de superfícies formando um paralelepípedo regular, definido a partir das suas 3D: comprimento, largura e altura. Porém estas superfícies podem ser manipuladas *a posteriori* através da edição (modificação) dos seus pontos, que consiste na alteração das suas cotas em X, Y, ou Z; sendo assim possível a transformação do paralelepípedo regular inicial numa qualquer forma trapezoidal.

Cada espaço criado desta forma é constituído por seis superfícies. Tanto os espaços como as superfícies são objectos, criados com base nas capacidades de XPCE. O mesmo acontecendo com os pontos que definem as superfícies. Estas partilham os objectos pontos quando estes têm os mesmos valores para as contas em X, Y e Z.

Para tal foram desenvolvidas rotinas que antes de disponibilizarem para o ambiente criado um qualquer objecto ponto verificam previamente se já existe um com as mesmas cotas de X, Y e Z.

O programa common_Editor permite também decompor as superfícies já criadas, subdividindo-as em outras superfícies que, no total, ocupam a área da superfície que lhe deu origem, como se exemplifica na figura 2.5a.

As superfícies podem possuir objectos de tipo sub-superfície, ou seja janelas ou portas associadas. Estas sub-superfícies não são definidas por pontos, mas por um conjunto de relações com a “superfície-mãe”. Os pontos a 3D necessários à sua representação e visualização pelo utilizador serão pontos dinâmicos que assumirão cotas de X, Y e Z em função da posição no espaço da superfície mãe.

Deste modo ao modificar-se os pontos de uma superfície, as suas sub-superfícies serão recalculadas de modo a serem complanares com a nova posição no espaço da superfície-mãe, conforme se pode verificar na figura 2.5b.

Porém as sub-superfícies só serão re-calculadas e visualizadas se todos os pontos da superfície-mãe forem complanares, conforme se pode verificar na figura 2.5c. Para verificação deste requisito o programa realiza o cálculo do volume de três vectores que passam pelo ponto inicial da superfície e pelos restantes 3 pontos, sendo que para que todos os pontos sejam complanares é necessário que o volume assim calculado seja nulo.

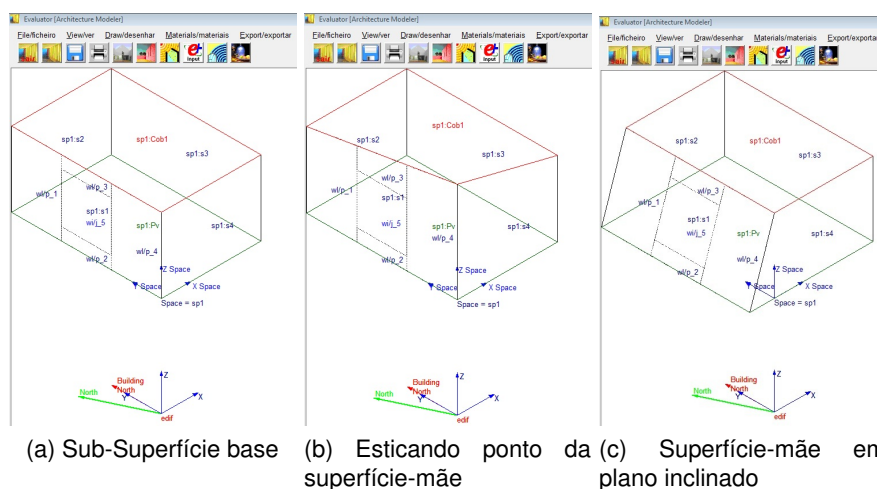


Figura 2.5: Janelas, Portas, bem como paredes circundantes são definidas como relações a partir de uma “superfície-mãe” em que se inserem. A alteração de cotas dos pontos da superfície-mãe provoca que os pontos das sub-superfícies são recalculados, devendo manter-se sempre as relações definidas

Sendo uma “superfície-mãe” definida por 4 pontos, o programa **common_Editor** recorre ao de cálculo do produto misto de 3 vectores que passam pelos seus pontos. Por exemplo $\overline{P_4P_1}$, $\overline{P_3P_1}$ e $\overline{P_2P_1}$. O produto misto de três vectores que partem do mesmo ponto é quantitativamente igual ao volume do sólido ortogonal formado pelas suas arestas. Se esse produto misto for nulo, os quatro pontos da “superfície-mãe”, são coplanares.

Para calcular os pontos dinâmicos de cada sub-superfície o programa **common_Editor** define rectas imaginárias que fazem ângulos ortogonais com a linha base da superfície-mãe e cujo afastamento lateral é definido pelo utilizador, sendo as suas intersecções, com as arestas da superfície-mãe, calculadas por um processo que usa as potencialidades da linguagem PROLOG, em termos de representação de conhecimento, para reconhecimento automático de geometrias e escolha das equações adequadas.

Assim, tratando-se da resolução de questões de geometria analítica a 3D, todas estes problemas consistem na resolução de sistemas de três equações a três incógnitas que o programa resolve de forma automática por aplicação do método da eliminação de Gauss.

2.1.2 Breve tutorial de imagens

O **common_Editor** permite que uma superfícies existente possa ser convertida em outras duas. Para tal disponibiliza-se uma caixa de diálogo conforme apresentada na figura 2.6. Na figura 2.7 apresenta-se o resultado obtido.

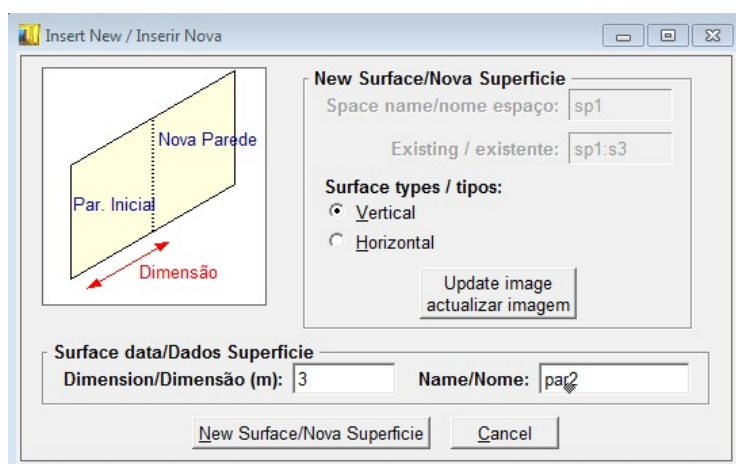


Figura 2.6: Caixa de diálogo para converter uma superfícies existente em outras duas

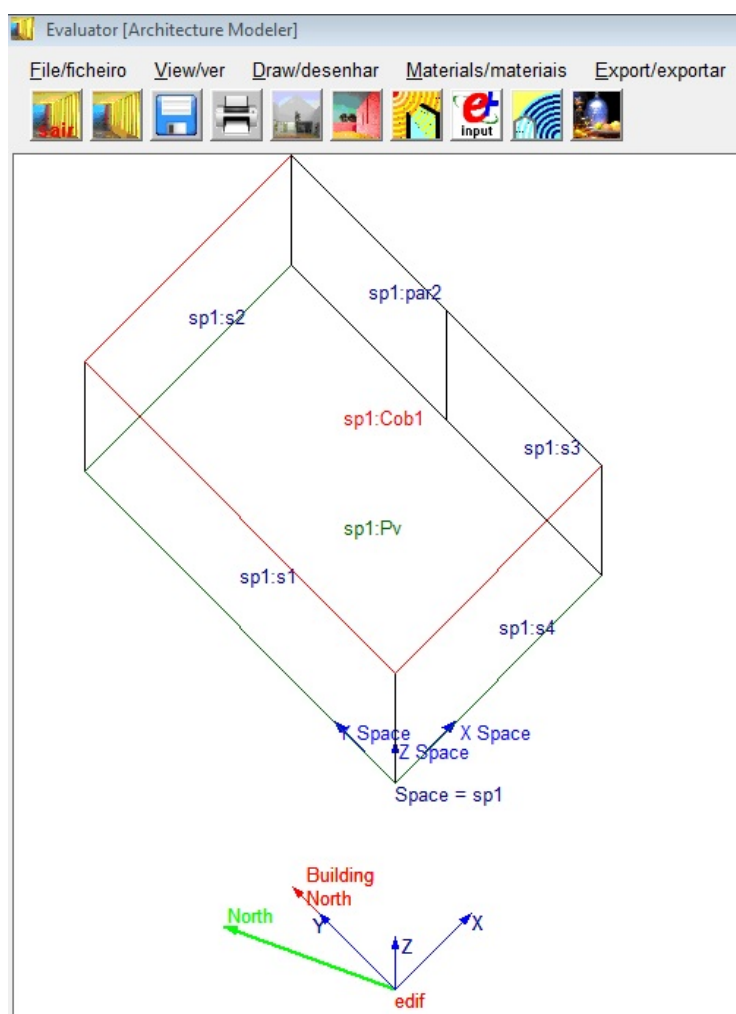


Figura 2.7: Resultado obtido depois de adicionada a nova superfície

Qualquer superfície existente pode ser apagada e substituída por um volume, o qual é constituído por 5 novas superfícies projectadas para o lado exterior do espaço em que se inserem. Para realizar esta operação o common_Editor apenas necessita de saber a dimensão do novo volume, reconhecendo de forma automática o lado exterior para onde deverão ser projectadas as novas superfícies. A superfície original que dá origem ao novo volume é automaticamente destruída. Na figura 2.8 apresenta-se uma caixa de diálogo que permite definir um novo Volume no espaço relativamente a uma superfície existente. E na figura 2.9 apresenta-se o resultado da referida operação.

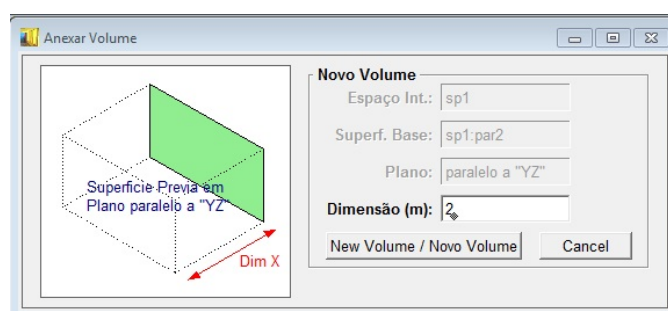


Figura 2.8: Caixa de diálogo para criar novo volume a partir de superfície existente

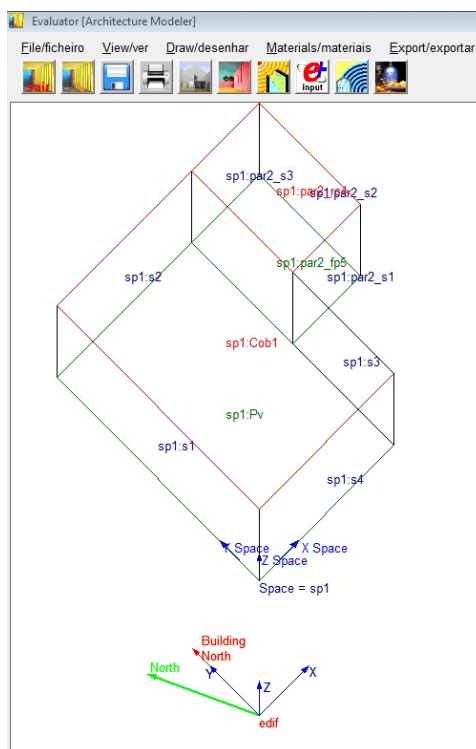


Figura 2.9: Resultado obtido pela substituição de uma superfície existente por um novo volume

É possível inserir uma janela ou porta numa superfície, seja ela uma parede, uma cobertura ou um pavimento. Apresenta-se na figura 2.10 uma imagem da caixa de diálogo que permite executar esta operação. O resultado obtido poderá ser semelhante ao que se encontra já exemplificado no conjunto de figuras 2.5.

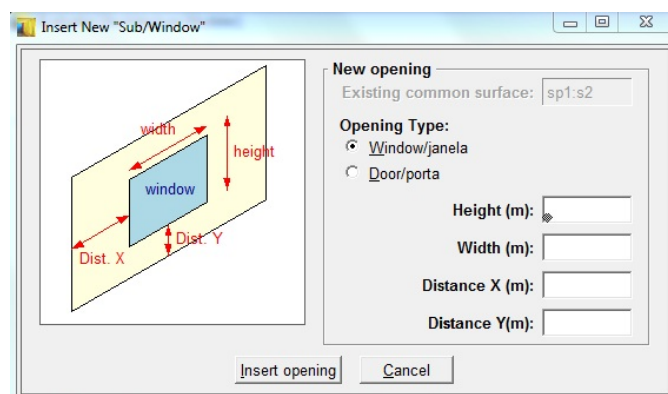


Figura 2.10: Caixa de diálogo para inserir um conjunto de sub-superfícies numa superfície existente

2.1.3 Finalidade do programa common_Editor

A finalidade do programa “**common_Editor**” é possibilitar a realização de múltiplas avaliações de diferentes parâmetros relacionados com o desempenho do conforto térmico e acústico dos edifícios.

Conforme se verificou nos capítulos anteriores é grande a complexidade destas matérias pelo que não seria possível incluí-las todas no mesmo conjunto. Sendo que nalguns casos essa tarefa seria ciclópica e injustificada uma vez que já existem programas que fazem essas tarefas de uma forma muito detalhada.

Efectivamente, o objectivo principal do módulo “**common_Editor**” é a realização de interfaces que de uma forma rápida possam permitir a realização das tais avaliações do desempenho dos respectivos parâmetros, permitindo ao arquitecto manipular o objecto de estudo de forma integrada e única enquanto o submete às diferentes avaliações de conformidade térmica e acústica.

O programa “**common_Editor**” deverá permitir a exportação dos dados geométricos para outros programas, como é o caso dos programas “**EnergyPlus**”, “**CAEd**” e “**RctCAD_v2**” que serão descritos mais adiante. Tal como referido anteriormente, prevê-se a possibilidade de, posteriormente, se vir a exportar dados geométricos para o programa “**Radiance**” e porventura para uma ferramenta de “avaliação da sustentabilidade”.

De salientar ainda que o programa “**CAEd**” permite por si a exportação para o programa “**CATT-Acoustics**” dos espaços modelados para cálculo do Tempo de Reverberação. Este programa utiliza algoritmos de traçado de raios (*ray-tracing*) para calcular parâmetros acústicos relacionados com o conforto acústico em auditórios.

No estado actual de desenvolvimento deste protótipo apenas é possível exportar os dados para a interface com o programa EnergyPlus, que se designou por “**e+_Editor**”, também em desenvolvimento.

No entanto o facto de apenas um programa de interface ter sido até ao momento desenvolvido não será relevante para as conclusões deste estudo. Efectivamente pretende-se aqui apenas demonstrar que esta ferramenta em fase de protótipo representará uma conquista metodológica para os actos próprios da concepção arquitectónica e que será possível de realizar. A conclusão do restante depende apenas de investimento em tempo para efectuar o desenvolvimento, dado que todos os pressupostos de desenvolvimento ficam demonstrados.

Apresenta-se de forma detalhada, mais à frente neste trabalho, a realização de um estudo de caso cuja modelação inicial foi realizada com o programa “**common_Editor**” e cujos dados geométricos foram posteriormente exportados de forma automática e, de forma quase instantânea, para o programa “**e+_Editor**”, que será descrito seguidamente.

2.2 Programa e+_Editor

O programa de interface com o programa “**EnergyPlus**”, designado por “**e+_editor**” [figura 2.11] possui as seguintes características principais:

- Importa a definição geométrica de um edifício representado com o “**common_Editor**” convertendo essa definição na representação a 3D (do mesmo edifício) para ambiente deste módulo;
- Caso na representação do modelo no “**common_Editor**” tenham sido dadas definições relativas aos aspectos construtivos, essas definições serão também importadas para as definições construtivas que o programa de interface “**common_Editor**” requer;
- Também permite uma definição ou representação geométrica de um edifício a partir de nenhuma definição prévia. Isto é: não é obrigatório que as definições do edifício sejam importadas do “**common_Editor**”. Este programa de interface possui funcionalidades que lhe permitem autonomia total em relação a qualquer outro módulo;
- Foram desenvolvidos certos comandos que permitem a construção de objectos próprios do programa **EnergyPlus**;

- Permite a construção de um ficheiro de formato IDF - que constitui o “Input” do programa **EnergyPlus** - de forma automática e célere que possibilitará posteriormente a realização de simulações do consumo energético e do conforto térmico para avaliação do modelo em estudo.

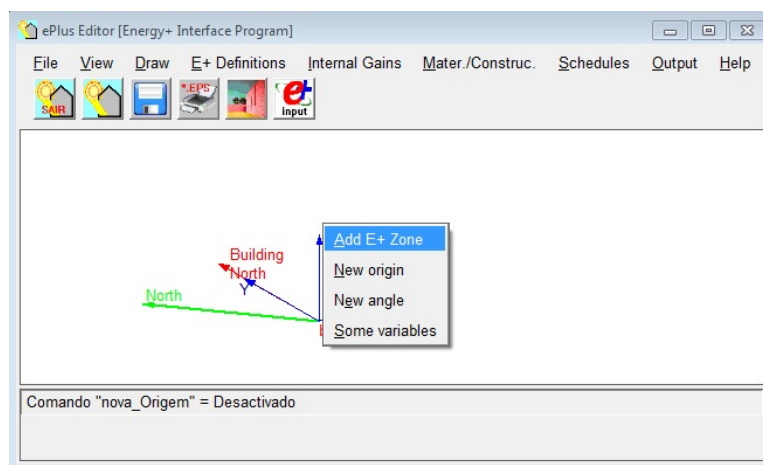


Figura 2.11: Ambiente editor_e+

2.2.1 Funcionalidades do programa e+_Editor

Este programa foi desenvolvido de forma semelhante ao “**common_Editor**”. Porém em face dos seus objectivos e funcionalidades serem diferentes, os objectos desenvolvidos também foram diferentes.

Enquanto no programa anterior a entidade base era o espaço aqui a entidade base é a zona térmica, à semelhança do que acontece no programa **EnergyPlus**.

Uma representação geométrica de um edifício, ao ser importada do programa “**common_Editor**”, verifica previamente se os espaços estão agrupados em objectos “grupo”, neste módulo. Em caso afirmativo fará corresponder a cada grupo uma zona térmica do ambiente “**e+_Editor**”. Sendo que as paredes de separação de dois espaços do mesmo grupo serão convertidas em Internal_surfaces e mais tarde exportadas para o programa **EnergyPlus** como Wall:Adiabatic, Ceiling:Adiabatic ou Floor:Adiabatic.

Caso não haja esse agrupamento de zonas então a definição importada de cada zona será equivalente às definições de espaços do “**common_Editor**”.

A entidade base é a zona térmica (ou *zone* tal como é chamada no programa EnergyPlus). A “**zone**” é constituída por diferentes superfícies, que são representadas pelo objecto eplus_surface. Cada um destes objectos terá um nome bem como vários outros atributos.

Um dos atributos das superfícies é o “tipo”, que exprime a posição no espaço dessa superfície. Os diferentes tipos de `eplus_surface` são os seguintes: *wall*, *roof*, *floor*, *ceiling*.

Cada `eplus_surface` poderá ter uma ou mais `eplus_surface_sub` associadas, e estas correspondem às aberturas que é possível incluir numa superfície, isto é janelas e portas. Assim, os tipos de `eplus_surface_sub` são: *window* ou *door*.

Apresentam-se seguidamente algumas imagens representativas da interface do programa com o utilizador [figuras 2.12 a 2.15]. Esta interface apresenta semelhanças significativas com “**common_Editor**”, efectivamente trata-se de uma outra aplicação do mesmo conceito/paradigma.

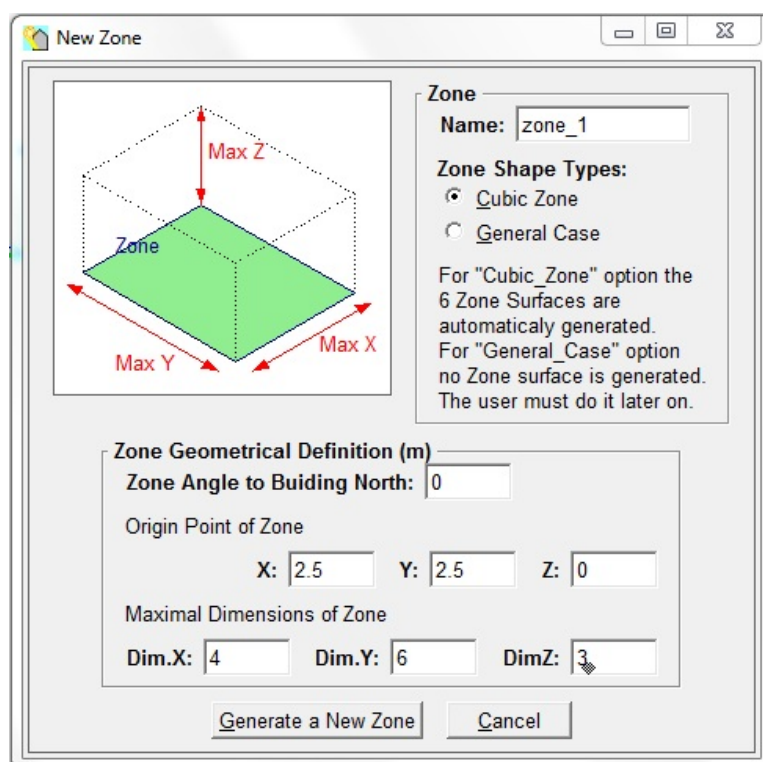


Figura 2.12: Caixa de diálogo para inicialização de uma nova zona térmica

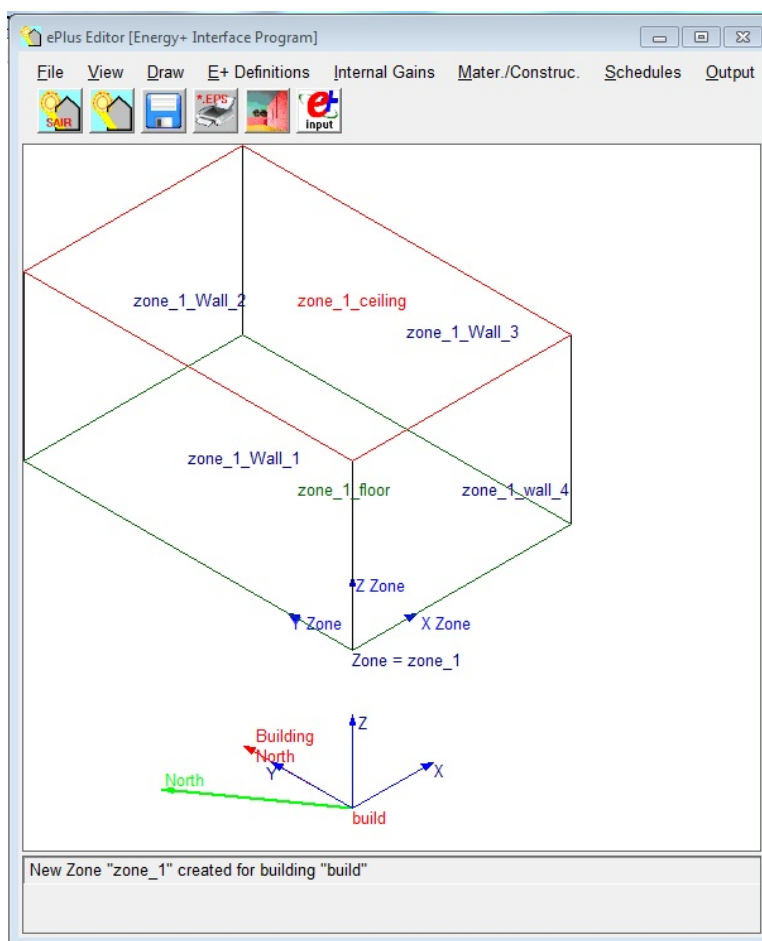


Figura 2.13: Zona térmica resultante das definições apresentadas na figura anterior

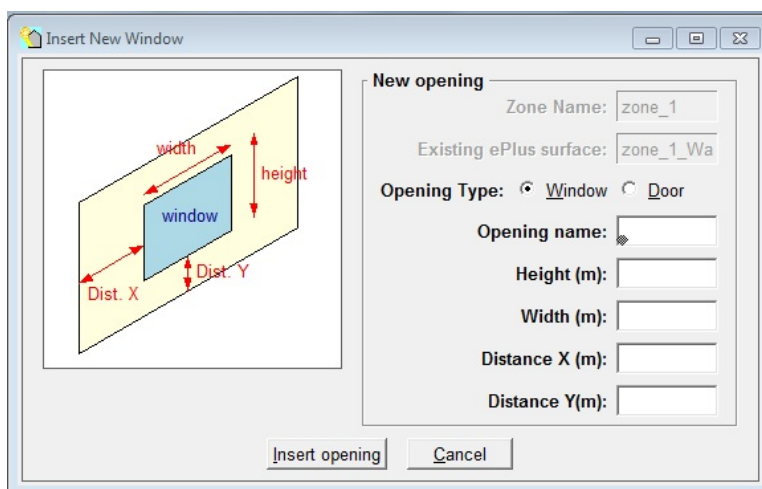


Figura 2.14: Caixa de diálogo para introdução de uma nova abertura (janela ou porta)

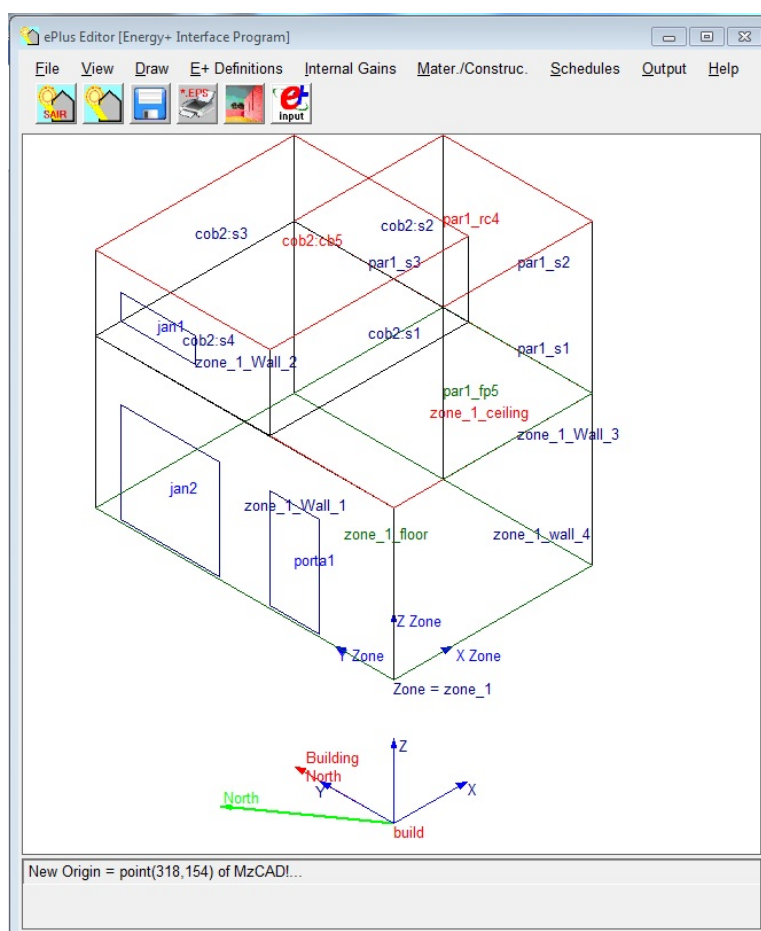


Figura 2.15: Resultado obtido após a introdução de diversos volumes e janelas na zona térmica definida inicialmente

Com base num modelo geométrico importado a partir do programa **common_Editor** ou definido de raiz no ambiente **e+_Editor** é possível construir um conjunto de definições que correspondem a requisitos específicos do programa **EnergyPlus**. São exemplos destas definições, entre outras, as seguintes:

- Definições gerais necessárias à execução das simulações tais como: “Site:Location”; “RunPeriod”; “SiteGroundTemperature:BuildingSurface”; “Site:GroundReflectance”;
- materiais para constituição de elementos construtivos. Poderão ser de tipo: “Material”; “Material:AirGap”; “WindowMaterial:Glazing”; “WindowMaterial:Gass”; “WindowMaterial:Shade”;
- Elementos construtivos: objecto “Construction” - este objecto têm ainda a particularidade de poderem ser associado às superfícies definidas e visualizadas qualquer que seja o seu tipo (Floor, Roof, Wall, Window ou Door);

- Horários (Schedules). o programa permite definir de uma forma amigável e rápida os seguintes objectos: "Schedule:TypeLimits"; "Schedule:Dayhourly", "Schedule:Week:Daily", "Schedule:Year"; "Schedule:Compact", "Schedule:Constant";
- Palas associadas a janelas: objecto "Shading:Overhang";
- Objectos para definição de elementos sombreadores e de caixilhos que poderão ser associados a objectos de tipo *sub-surfaces* tais como: "WindowProperty:ShadingControl"; "WindowProperty:FrameAndDivider".

Relativamente ao objecto "Global:GeometryRules" o programa assume como fixas as seguintes definições:

Starting Vertex Position = Lower Left Corner;

Vertex Entry Direction = Clockwise;

Coordinate System = World Coordinate System.

Optou-se por fixar estas regras geométricas dado que esse facto representava uma simplificação muito importante em termos de programação. Tendo presente os objectivos deste programa e o facto de ele proporcionar uma visualização a 3D da forma conceptual dos edifícios em estudo, não se afigurou de interesse relevante o facto dessas regras poderem ser definidas pelo utilizador.

Estas são algumas das funcionalidades que já se encontram disponibilizadas para utilização nesta fase do desenvolvimento do programa, porém espera-se futuramente ir acrescentando novas funcionalidades que permitam uma definição tão completa quanto possível da geometria e outros objectos necessários ao cálculo energético de edifícios com base no programa **EnergyPlus**, com particular destaque para as avaliações de conforto.

A interface **e+_editor** ao ser desenvolvida com ferramentas multi-plataforma poderá, por exemplo, representar uma melhoria significativa para a utilização do programa **EnergyPlus** em plataformas Linux ou Unix.

Apresentam-se nas figuras 2.16 a 2.23 alguns exemplos das caixas de diálogo desta interface que revelam as suas capacidades.

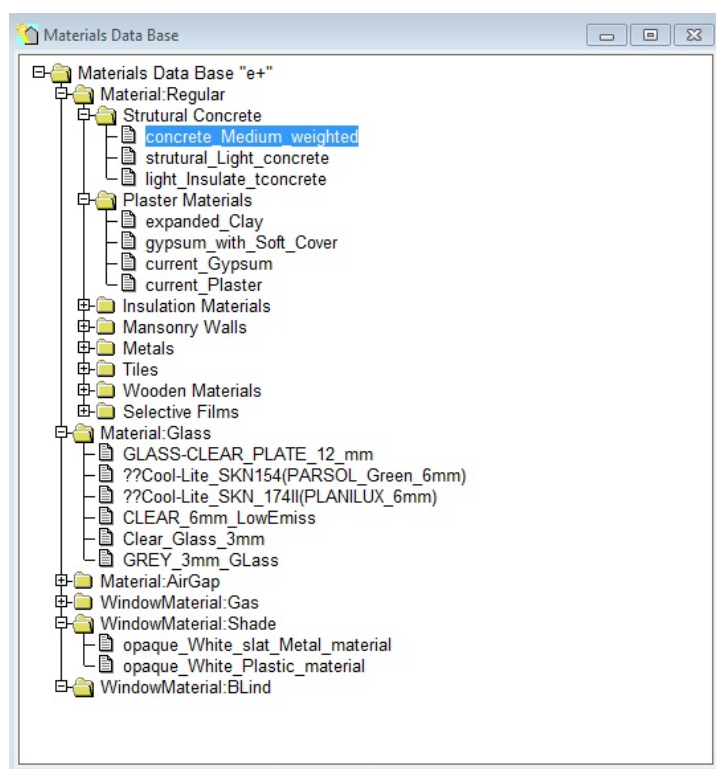


Figura 2.16: Base de dados de Materiais - Nesta fase de desenvolvimento a base de dados está reduzida ao essencial, porém em termos de programação cada novo elemento que se queira acrescentar representa apenas uma nova linha de código

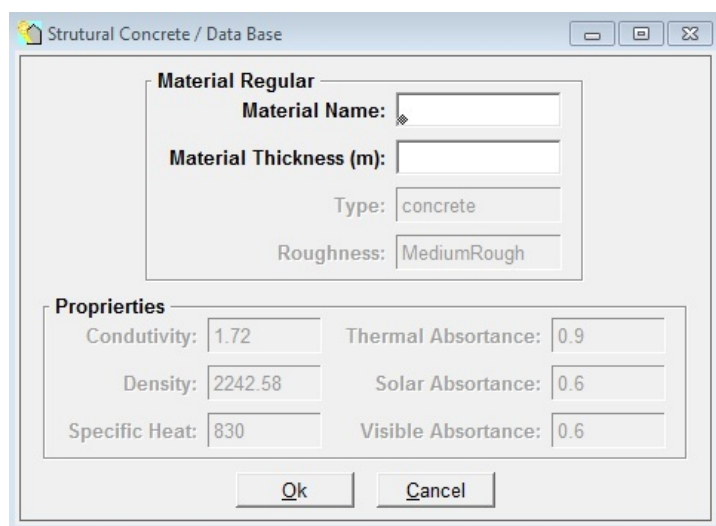


Figura 2.17: Resultado obtido após a selecção de um material de tipo “Strutural:Concrete” (betão) na árvore da figura 2.16- O utilizador apenas terá que acrescentar um nome e a espessura pretendida

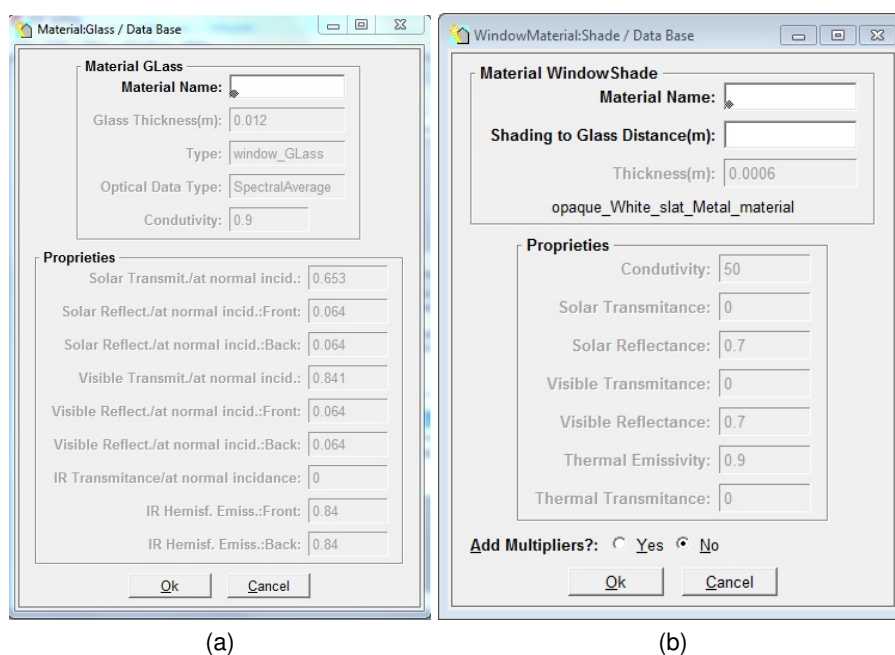


Figura 2.18: Resultado obtido após a selecção de um material de tipo “Material:Glass” (a), ou “WindowMaterial:Shade” (b), na árvore da figura 2.16. Em (a) O utilizador apenas terá que acrescentar um nome dado que a espessura é implícita nas propriedades do vidro; em (b) o utilizador apenas terá que acrescentar um nome e a distância do vidro ao sombreamento (Shading to Glass distance)

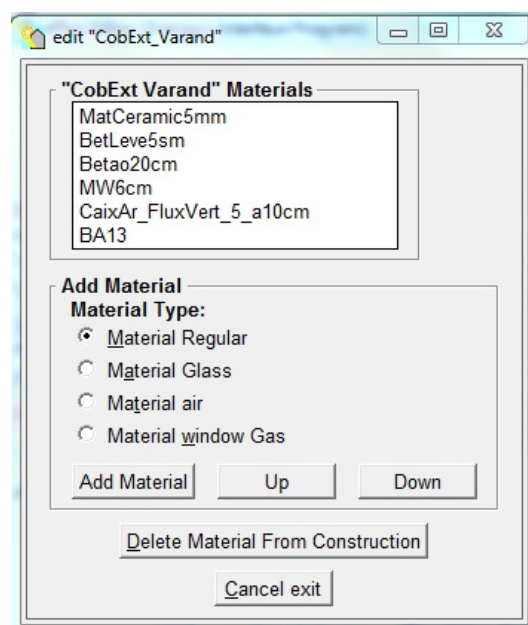


Figura 2.19: Caixa de diálogo para edição de objectos “Construction” possibilitando adicionar ou retirar materiais previamente definidos

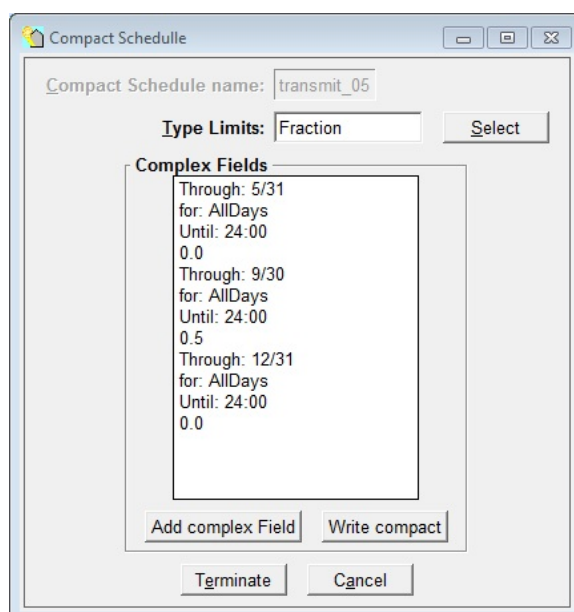


Figura 2.20: Caixa de diálogo para edição de objectos “Compact:Schedule”

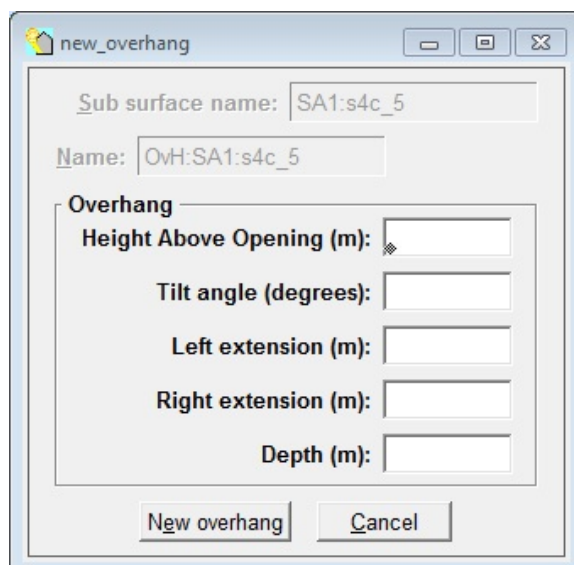


Figura 2.21: Caixa de diálogo para edição de objectos “Window:OverHang”

As caixas de diálogo apresentadas nas figuras 2.22 e 2.23 destinam-se à construção ou edição de objectos “WindowProperty:ShadingControl”. Sendo que a caixa de diálogo da figura 2.23 poderá apresentar variadas configurações as quais dependem das opções seleccionadas na caixa de diálogo da figura 2.22. Utilizam-se aqui mais uma vez as capacidades da linguagem PROLOG em termos de representação de conhecimento. Referem-se os seguintes exemplos:

- A variável “setpoint” deste objecto não se justifica quando se define a

variável “Shading Control Type” com as seguintes palavras chave AlwaysOn, AlwaysOff, OnIfScheduleAllows, OnIfHighGlare, Glare, and DaylightIlluminance;

- A variável “setpoint2” deste objecto só se justifica quando se define a variável “Shading Control Type” com uma das seguintes palavras chave: OnIfHighOutdoorAirTempAndHighSolarOnWindow, OnIfHighOutdoorAirTempAndHighHorizontalSolar, OnIfHighZoneAirTempAndHighSolarOnWindow, and OnIfHighZoneAirTempAndHighHorizontalSolar;
- A variável “Schedule Name” deve indicar o nome de um horário previamente definido se uma outra variável “Shading Control is scheduled” deste objecto tomar como valor a palavra chave “yes”. Acresce que, “Schedule Name” e “Shading Control is scheduled”= “yes” são obrigatoriamente requeridos sempre que a variável “Shading Control Type” tiver como valor a palavra chave “OnIfScheduleAllows”.

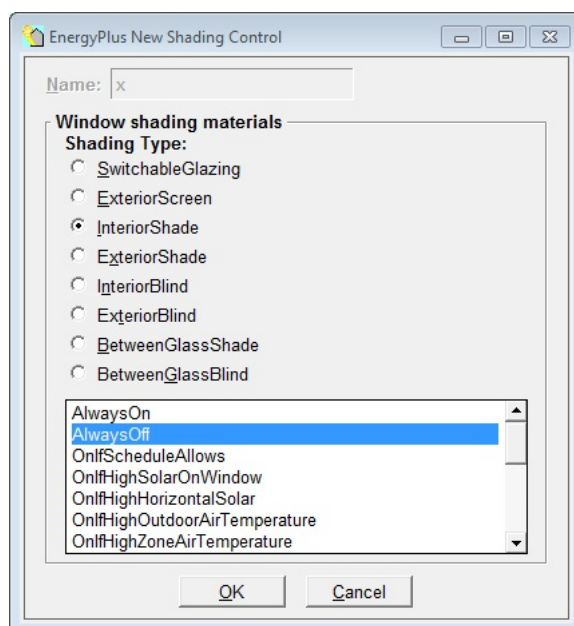


Figura 2.22: Primeira caixa de diálogo para construção/edição de objectos “WindowProperty:ShadingControl”

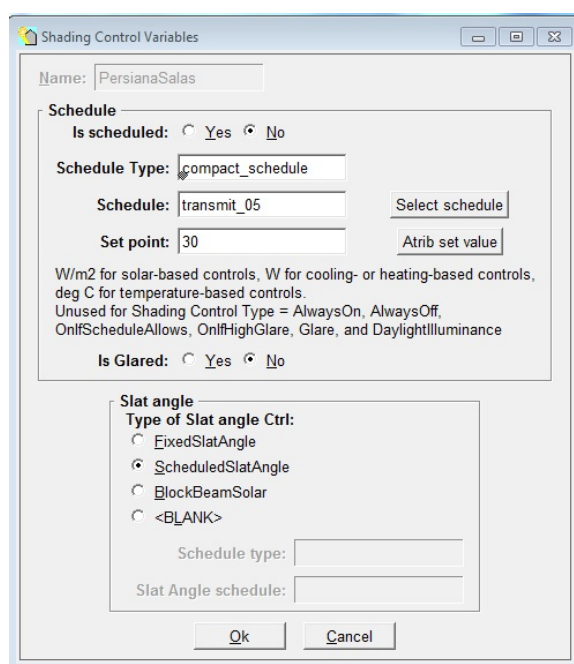


Figura 2.23: Segunda caixa de diálogo para construção/edição de objectos “WindowProperty:ShadingControl”

Rotina para avaliação do conforto

O programa **e+_Editor** permite construir de forma automática e em ambiente gráfico a definição de um qualquer edifício em fase de concepção arquitectónica.

No entanto, com o objectivo de melhorar o processo de concepção de edifícios confortáveis em termos térmicos, foi possível acrescentar algumas funcionalidades.

Assim, tirando partido das potencialidades de Swi-Prolog que possui a capacidade para manipular tabelas externas de ficheiros escritos numa base de campos separados por caracteres (ficheiro “csv” - *comma separated values*)¹ e do facto de os relatórios do programa EnergyPlus possuírem também este formato, desenvolveu-se uma rotina que completa as avaliações de conforto térmico - conforme metodologia descrita na página 28 e seguintes - realizadas com o programa EnergyPlus. O ficheiro “csv” deve conter os resultados obtidos através da simulação, designadamente:

Inverno: a lista de resultados que se obtém definindo a seguinte “Output:variable”: “ThermalComfort Operative Temperature”;

Verão: a lista de resultados que se obtém definindo as seguintes “Output:variable”: “Outdoor dry bulb” e ThermalComfort Operative Tem-

¹Managing external tables for SWI-Prolog, On-line Reference Manual - <http://www.swi-prolog.org/pldoc/package/table.html>

perature. Este ficheiro “csv” convertido em formato de folha de “excel” deverá ser posteriormente trabalhado de modo a que sejam obtidas para cálculo as seguintes variáveis:

- Temperatura exterior média cumulativa, conforme equação (1.5) (página 30);
- Temperatura operativa óptima, conforme equação (1.6) (página 30);
- diferença de temperatura ΔT_o , conforme equação (1.7) (página 31).

A rotina desenvolvida, para o caso de Inverno, executa os seguintes procedimentos:

- transforma o conjunto de todas as temperaturas (do ficheiro csv) correspondentes a todas as horas do período de funcionamento do espaço em avaliação numa lista de valores;
- conta o número total de elementos que a lista possui e calcula o valor correspondente a 5%,
- procurando sempre o menor valor dessa lista que retira da mesma executa esta operação até que os 5% de valores mais baixos sejam todos retirados;
- obtém o valor mais baixo da lista remanescente que corresponde à temperatura de conforto térmico que não é excedida inferiormente em 95% do tempo e que portanto nos permite classificar o conforto do edifício de uma forma muito rápida.

Relativamente ao Verão o procedimento é análogo com a diferença que em vez de retirar os 5% de menores valores da lista, retira os maiores valores e a lista não é a lista das temperaturas operativas verificadas no espaço, mas uma lista contendo já as diferenças de temperaturas correspondentes à equação (1.7) (página 31).

2.3 Programa CAEd

No se estado actual de desenvolvimento, o programa para **cálculo Acústico de Edifícios, CAEd** possibilita já o cálculo das seguintes grandezas:

- Isolamento sonoro a sons de condução aérea de um par emissão/recepção, relativo a compartimentos contíguos, alinhados ou não (indicadores: R'_w ; $D_{n,w}$ e $D_{nT,w}$).
- Isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas de compartimentos interiores, (indicadores: R_{45} ; $D_{2m,n,w}$ e $D_{2m,nT,w}$).

- Nível sonoro de percussão num compartimento, a partir da percussão padronizada do pavimento de um compartimento contíguo, alinhado ou não, incluindo o caso em que o compartimento emissor é subjacente ao receptor (indicadores: $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$).
- Tempo de reverberação de compartimentos, por bandas de oitava nos intervalos [125 Hz - 4 kHz] ou [500 Hz - 2 kHz].
- Nível sonoro num compartimento, devido ao ruído aéreo transmitido por um equipamento instalado noutra compartimento contíguo (indicador: L_{Ar} ou $L_{Ar,nT}$);
- Nível sonoro no interior de um compartimento com fachada, tendo em atenção o ruído ambiente exterior (indicador: L_{Aeq}).

Não se incluiu no âmbito deste trabalho o módulo de cálculo para ruído de equipamentos (indicador: L_{Ar} ou $L_{Ar,nT}$), nem o módulo de cálculo nível sonoro no interior de um compartimento com fachada (indicador: L_{Aeq}). Também a interface, com o programa CATT-Acoustics[44], desenvolvida e concebida na sua totalidade pelo autor deste trabalho, não é aqui incluída por se considerar redundante face ao objectivo central de ilustrar a importância da interacção modular nas tarefas de apoio ao projecto de arquitectura.

O módulo CAEd foi posteriormente desenvolvido até uma fase produtiva (para uso na profissão). Na fase de passagem a um produto final participaram também Jorge Patrício e Luís Santos Lopes [45].

O autor do presente trabalho teve a seu cargo a responsabilidade do desenvolvimento do software, que escreveu desde a primeira à última linha de código, bem como toda a concepção da arquitectura do sistema, designadamente os aspectos de interface com o utilizador e as opções conducentes a uma maior adequação cognitiva do sistema.

O módulo CAEd, sendo um sistema baseado em conhecimento, inclui um conjunto grande de conhecimento e experiência dos seus autores que não é aqui apresentado na sua totalidade. Restringe-se a parte aqui apresentada aos aspectos que resultam de uma aplicação da norma EN 12354 evidenciando-se o conhecimento adquirido pelo autor para o efeito e em consequência do desenvolvimento do referido software.

2.3.1 Introdução de dados em CAEd

A interface com o utilizador de CAEd desenvolve-se através de um editor gráfico que possibilita a visualização a 3D dos objectos em análise. Esta interface permite que o utilizador verifique visualmente, com rapidez e de forma adequada do ponto de vista cognitivo, se está a introduzir os dados do programa de forma correcta.

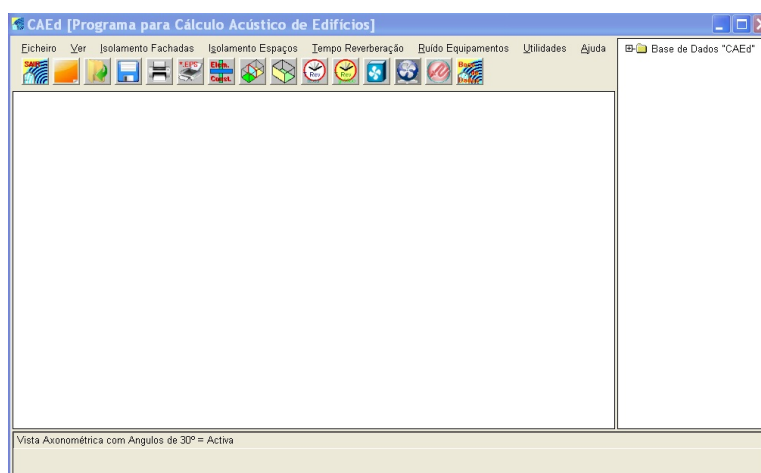


Figura 2.24: Ambiente CAEd

Muitas das caixas de diálogo para definição de espaços arquitectónicos, em processamento pelo programa, estão equipadas com pequenas imagens esclarecedoras do que deve ser introduzido nas diferentes opções integrantes dessas mesmas caixas. O ambiente CAEd [Figura 2.24] possui os seguintes elementos:

- Uma barra de menus;
- Sob essa barra de menus uma barra de icons;
- Ao centro o editor gráfico a 3 dimensões;
- Do lado direito a base de dados de elementos construtivos;
- Em baixo uma barra para relatórios de erro e outras mensagens.

Base de dados

Este programa possui uma base de dados com o seguinte tipo de elementos:

- Definições construtivas de elementos verticais (paredes) caracterizados pelo seu índice de isolamento sonoro ponderado aparente a sons de condução aérea R_w ;
- Definições construtivas de elementos verticais (lajes para pavimentos e coberturas) caracterizados pelo seu índice de isolamento sonoro ponderado aparente a sons de condução aérea R_w e ainda pelo índice de isolamento sonoro ponderado a sons de percussão $L_{n,w}$;
- Duplicações em suportes verticais ou horizontais, caracterizados pelo índice ΔR_w ;
- Revestimentos de pisos horizontais, caracterizados pelo índice ΔL_w ;

- Elementos de pequenas dimensões, caracterizados pelo índice $D_{n,e,w}$;
- Revestimentos de superfícies para cálculo do tempo de reverberação em recintos interiores, caracterizados pelos índices de absorção sonora numa gama de frequências entre 125Hz e 4000Hz.

Estes dados de desempenho acústico relativos aos materiais, componentes e sistemas construtivos constantes da base de dados foram obtidos em bibliografia de reconhecida fiabilidade, tais como o *Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB)* [46] e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [11].

Método elasto-dinâmico

Para além da base de dados, o programa CAEd possibilita que sejam estimados valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea R de elementos simples, com base no método elasto-dinâmico [47]. São calculados valores do índice de isolamento sonoro R para cada terço de oitava (entre os 125 e os 4000Hz) e posteriormente é realizada a ponderação, para obtenção de um valor único R_w , nos termos da EN ISO 717-1 [35];

Segundo Jorge Patrício [47] o método elasto-dinâmico de estimação do comportamento acústico dos elementos de compartimentação tem origem conceptual num modelo inercial que integra o efeito de rigidez (fundamentalmente de flexão) e o amortecimento interno.

Trata-se de um método simplificado, só válido para avaliação da redução sonora de elementos homogêneos simples, baseado na lei da massa, em que são introduzidas algumas correcções no sentido de se ter em consideração o efeito de coincidência.

A “lei de massa” fornece uma boa regra de trabalho para prever o isolamento de som no ar de uma partição até a região da frequência crítica e ao efeito de coincidência. O efeito coincidência ocorre quando o comprimento de onda do som no ar é o mesmo que as ondas de flexão na partição. A uma certa frequência e ângulo de incidência das ondas sonoras, a oscilação de flexão da partição será ampliada e a energia acústica será transmitida através da partição quase sem atenuação.

O efeito de coincidência não se resume especificamente a um comportamento particular na frequência crítica (equação (2.1)), mas sim a uma zona de influência mais alargada (cerca de 2 a 3 oitavas), conforme figura 2.25.

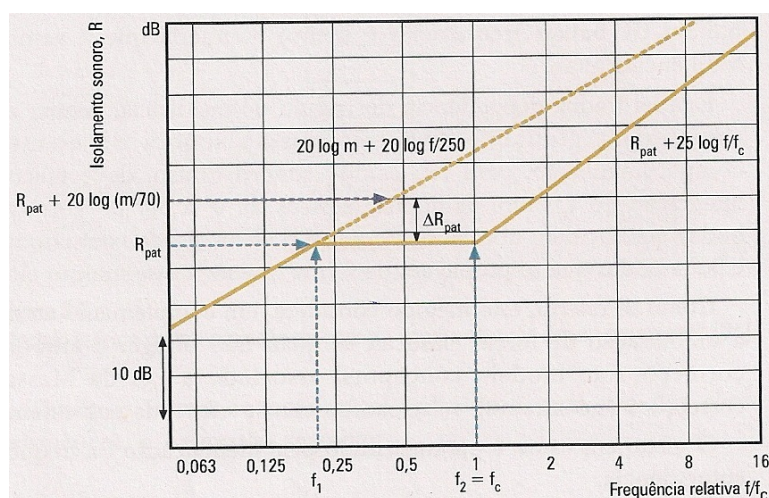


Figura 2.25: Redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogêneos, simples, em função da frequência, *in* [47], pp 76

$$f_c = \frac{c^2}{2 \cdot \pi \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)}{E}} \quad (2.1)$$

Onde:

f_c = Frequência crítica do elemento construtivo, em Hz;

c = velocidade de propagação no ar, em m/s;

h = espessura do elemento de compartimentação, em m;

ρ = Massa volúmica ou densidade do material constituinte do elemento construtivo, em kg/m³;

ν = Coeficiente de Poisson do material constituinte do elemento construtivo (adimensional);

E = Módulo de Young do material constituinte do elemento construtivo, em Pa.

O método elasto-dinâmico representa uma simplificação do comportamento de um elemento construtivo em termos do seu índice de isolamento sonoro R no domínio da frequência, configurando três tipos de comportamento:

- Uma primeira zona crescente à taxa de 6 dB/oitava (equação (2.3));
- Um patamar que é incrementado de ΔR_{pat} para elementos com massa superior a 70kg/m² (equação (2.2));
- E uma terceira zona, também, crescente à taxa de 7,5 dB/oitava (equação (2.4));

$$R_{pat} = 20 \times \lg[m] + 20 \times \lg \left[\frac{f}{250} \right] \quad (2.2)$$

Onde:

m = Massa superficial do elemento construtivo, em kg/m^2 ;

f = f toma o valor de f_1 (em Hz) para o cálculo de R_{pat} [47];

f_1 = No caso dos materiais correntes e homogêneos utilizados na compartimentação de edifícios (divisórias em betão ou alvenaria de tijolo), excluindo-se as divisórias leves e heterogêneas, pode adoptar-se $f_1 = f_c/5$;

$$R = R_{pat} + 20 \times \lg \left[\frac{m}{70} \right] \quad \text{para: } f < f_1 \quad (2.3)$$

$$R = R_{pat} + 25 \times \lg \left[\frac{f}{f_c} \right] \quad \text{para: } f > f_c \quad (2.4)$$

Depois de calculado o valor do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea R para o espectro de frequências entre 100Hz e 3150Hz o programa CAEd executa de forma automática a transformação desses valores num valor único R_w conforme procedimentos preconizados na norma EN ISO 717-1[35]. Para tal uma curva de referência é ajustada de forma a que o valor médio da diferença desfavorável entre ambos os espectros nas diferentes bandas de frequências consideradas seja o mais elevado possível, sem ultrapassar o limite de 2dB.

Após a realização deste ajustamento, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea R_w corresponde ao valor da ordenada da descrição convencional de referência para a frequência de 500Hz, sendo expresso simplesmente em dB.

Para realizar o ajustamento são utilizadas as capacidades da linguagem PROLOG, que partindo da curva de referência definida pela norma EN ISO 717-1[35], com base nos valores apresentados na tabela 2.1 vai procurar uma nova posição para a mesma de tal modo que a regra da diferença desfavorável seja cumprido.

Método de Josse

De forma semelhante ao método elasto-dinâmico, o programa CAEd também possibilita que sejam estimados valores para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão L_n de elementos simples, com base no método de Josse [48]. São calculados valores do índice de isolamento sonoro L_n para cada terço de oitava (entre os 125 e os 4000Hz) e posteriormente é realizada a ponderação, para obtenção de um valor único $L_{n,w}$, nos termos da EN ISO 717-2 [37].

Este método foi concebido para caracterizar a propagação de sons de percussão, que podem ser devidos ao choque de um objecto com o elemento

Frequências (Hz)	valores de referência (dB)
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56

Tabela 2.1: Norma EN 717-1, valores de referência iniciais para o ruído de condução aérea

de compartimentação ou resultar da transmissão de vibrações devidas a equipamentos.

Supondo que a frequência f é superior à frequência crítica de vibração, facto que deverá ser sempre verdadeiro para o caso de elementos separadores constituídos por lajes de betão correntes, o índice de isolamento sonoro L_n pode ser estimado com base na equação (2.5).

$$L_{n,f} = 92 + 10 \times \lg \left[\frac{F_{ef}^2 \times f_c}{\rho^2 \times h^2 \times f \times \eta} \right] - 10 \times \lg [A_o] \text{ dB} \quad (2.5)$$

Onde:

L_n = Índice de isolamento sonoro a sons de percussão, na frequência f , em dB;

F_{ef}^2 = Quadrado da força eficaz, na frequência f , em N²;

f_c = Frequência crítica do elemento construtivo, equação (2.1), em Hz;

ρ = Massa volúmica do elemento, em kg/m³;

h = Espessura do elemento construtivo em, m;

f = Frequência, em Hz;

η = amortecimento do elemento (para betão considera-se $\eta = 0,005$);

A_o = Área da absorção sonora equivalente do recinto receptor = 10 m².

Depois de calculado o valor de L_n para o espectro de frequências entre 100Hz e 3150Hz o programa CAEd executa de forma automática a transformação desses valores num valor único $L_{n,w}$ conforme procedimentos preconizados na norma EN ISO 717-2 [37]. Para tal uma curva de referência é ajustada de forma a que o valor médio da diferença desfavorável entre ambos os espectros nas diferentes bandas de frequências consideradas seja o mais elevado possível, sem ultrapassar o limite de 2 dB.

Após a realização deste ajustamento, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão $L_{n,w}$ corresponde ao valor da ordenada da descrição convencional de referência para a frequência de 500Hz, sendo expresso simplesmente em dB.

Para realizar o ajustamento são utilizadas as capacidades do PROLOG, que partindo da curva de referência definida pela norma EN ISO 717-2 [37], com base nos valores apresentados na tabela 2.2 vai procurar uma nova posição para a mesma de tal modo que a regra da diferença desfavorável seja cumprida.

Frequências (Hz)	Valores de referência (dB)
100	62
125	62
160	62
200	62
250	62
315	62
400	61
500	60
630	59
800	58
1000	57
1250	54
1600	51
2000	48
2500	45
3150	42

Tabela 2.2: Norma EN ISO 717-2, valores de referência iniciais para o ruído de impacto

Cálculo do isolamento sonoro de fachadas

Para efectuar o cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado ponderado $D_{2m,n,w}$ ou padronizado $D_{2m,nT,w}$ em fachadas, o programa CAEd baseia-se na norma EN 12354, parte 3. Para o efeito utiliza as equações (1.35) a (1.38) [página 45 e seguintes].

Para realizar este cálculo bastará ao utilizador definir uma fachada no Editor 3D de CAEd e atribuir-lhe os elementos construtivos das superfícies e outros elementos que constituem essa fachada, tais como:

- Elementos opacos - são caracterizados em termos dos parâmetros R'_w e C/C_{Tr} ;
- Elementos envidraçados ou portas - são caracterizados em termos dos parâmetros R'_w e C/C_{Tr} ;
- Elementos de pequenas dimensões - são caracterizados em termos do parâmetro $D_{n,e,w}$;

Apresenta-se nas figuras 2.26 a 2.30, um conjunto de imagens esclarecedoras das funcionalidades e facilidades deste programa, no que diz respeito à definição geométrica de uma fachada, para posterior realização do cálculo do isolamento de fachadas.

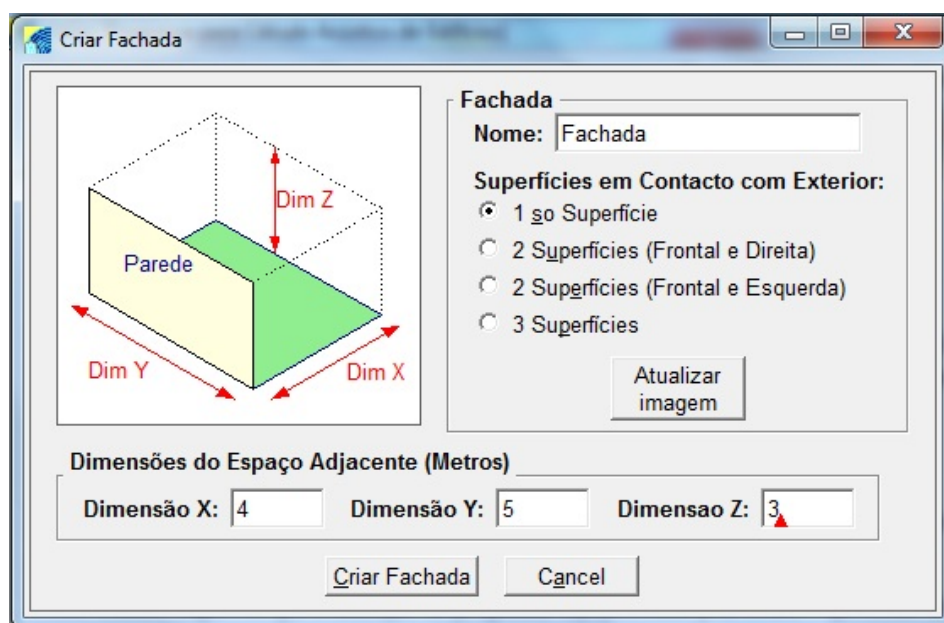


Figura 2.26: Caixa de diálogo para iniciar a definição geométrica de uma fachada e assim poder calcular o parâmetro $D_{2m,nT,w}$

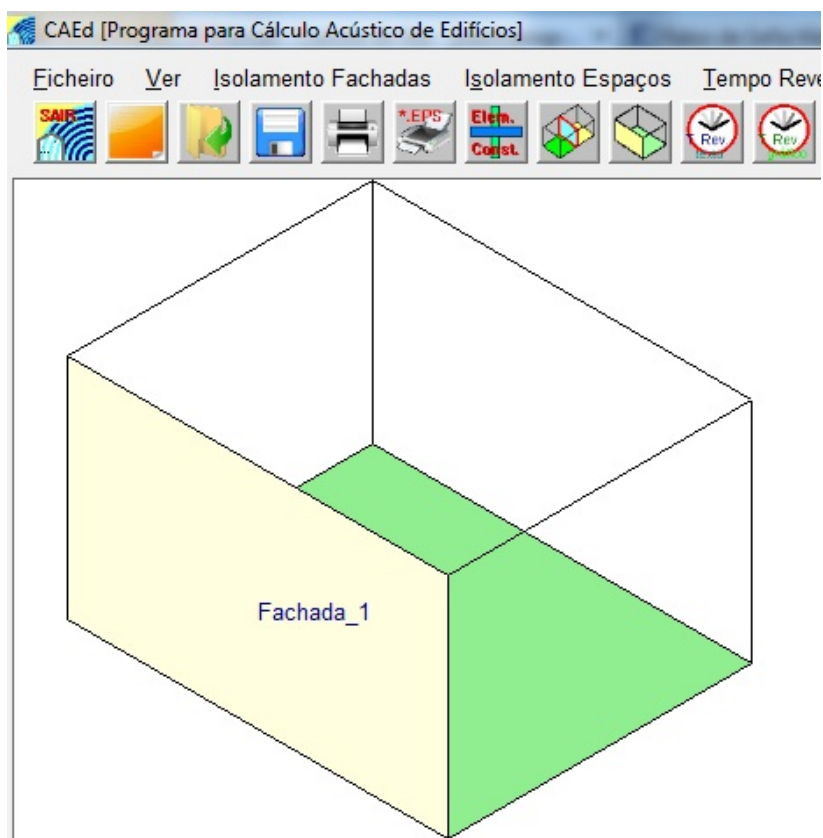


Figura 2.27: Resultado obtido com caixa de diálogo representada na figura 2.26

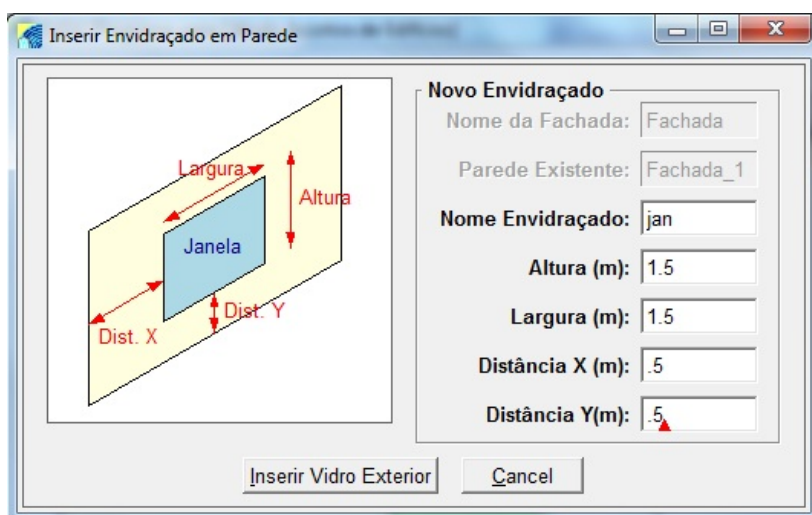


Figura 2.28: Caixa de diálogo para introduzir janelas na fachada

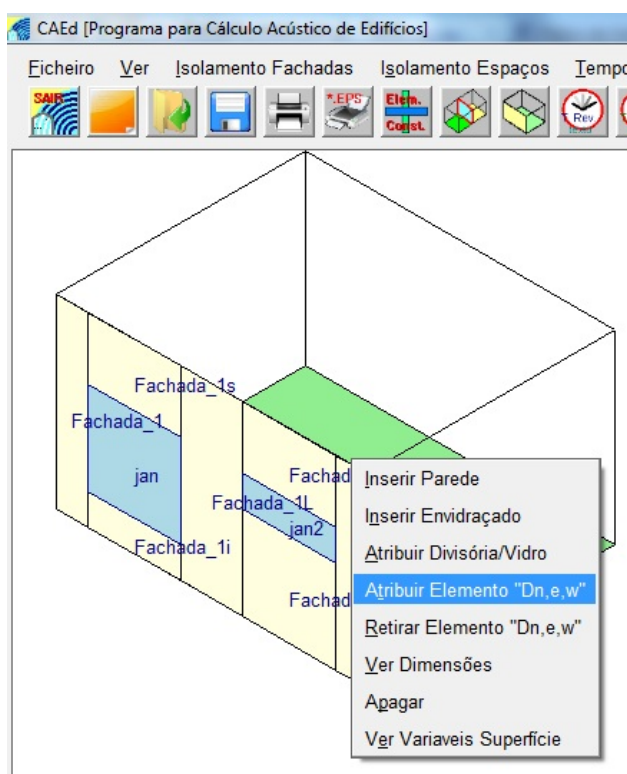


Figura 2.29: Seleccionando uma determinada superfície (Parede ou Janela) é possível aceder a um menu que permite novas acções entre as quais a introdução de elementos de pequenas dimensões $D_{n,e,w}$

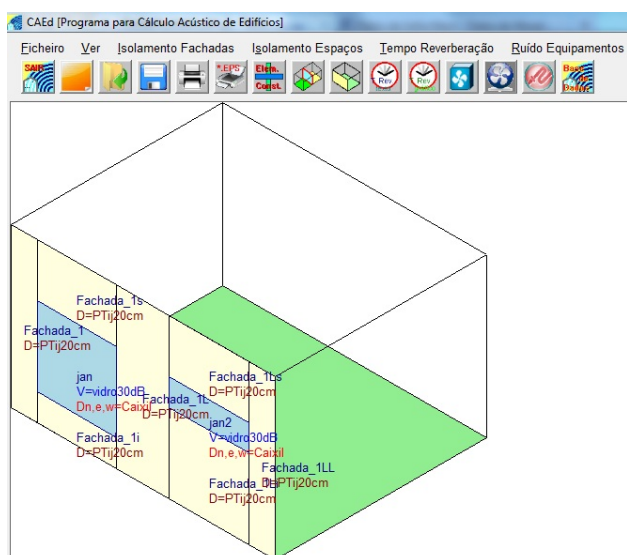


Figura 2.30: Representação de uma fachada - quando todos os elementos da fachada estão representados no ambiente CAEd é possível executar o cálculo do seu isolamento sonoro, parâmetro $D_{2m,nT,w}$

Cálculo do isolamento sonoro a sons aéreos entre espaços de um edifício

Para efectuar o cálculo do isolamento sonoro, a sons de condução aérea, entre espaços de edifícios, o programa CAEd, baseia-se na norma EN 12354, partes 1 e 2.

Para o cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado $D_{nT,w}$ utiliza as equações (1.13) a (1.20) [página 33 e seguintes], bem como as equações que constam das tabelas 1.7 a 1.12 [página 38 e seguintes].

No entanto convém referir que estas equações se referem ao parâmetro D_{nT} , no domínio da frequência, devendo o cálculo de $D_{nT,w}$ ser efectuado - a partir do conjunto de valores obtidos para as frequências (em bandas de oitava ou terços de oitava) - com base nos procedimentos preconizados na norma EN ISO 717-1 [35], de modo a ser obtido um valor único, ponderado "w".

Porém, é assumida aqui uma simplificação: utilizam-se nas equações (1.13) a (1.15) valores de R_w , já ponderados segundo os procedimentos da Norma EN ISO 717-1 [35], para caracterização do índice de isolamento sonoro dos elementos construtivos e não os valores de R por bandas de frequência.

Para o cálculo do isolamento sonoro a ruídos de impacto ou percussão preconizado no RRAE $L'_{nT,w}$ utilizam-se as equações (1.25) a (1.32) [página 41 e seguintes].

Para realizar estes cálculos bastará ao utilizador definir um par de espaços - sendo um de emissão e outro de recepção - no Editor 3D de CAEd e atribuir; ao elemento separador, bem como às arestas de interligação desses dois espaços; os elementos construtivos e o tipo de junção que as caracterizam.

Apresentam-se nas figuras 2.31 a 2.32 [página 83] um conjunto de caixas de diálogo que permitem a definição geométrica de um par de espaços - emissão, recepção - bem como a sua caracterização construtiva.

Numa fase posterior o programa CAEd realiza os cálculos solicitados, medindo de forma automática, o par representado no editor 3D de CAEd, e escolhendo as equações adequadas para o cálculo dos R_{ij} e dos coeficientes de redução da transmissão vibratória K_{ij} , em função das configurações geométricas encontradas, do tipo de junção definido pelo utilizador, e dos elementos construtivos atribuídos ao elemento separador e junções de superfícies.

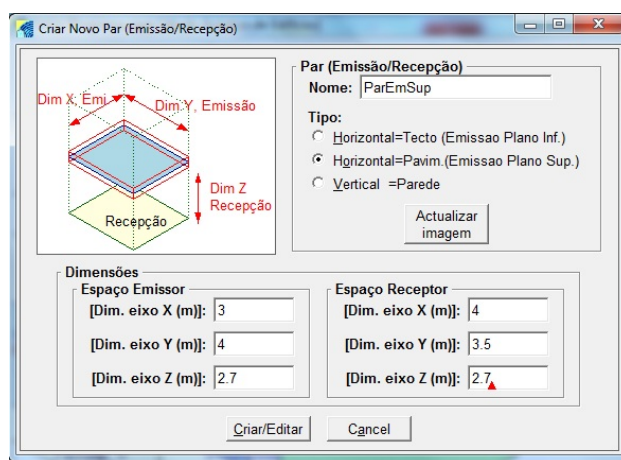


Figura 2.31: Caixa de diálogo para iniciar a definição geométrica de um par de espaços emissão recepção e assim poder calcular o parâmetro $D_{nT,w}$

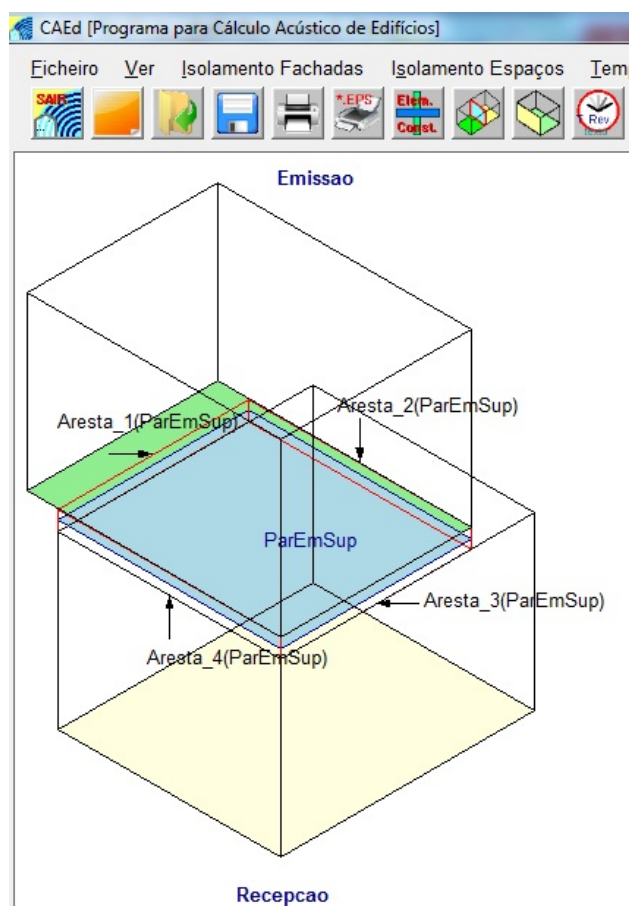
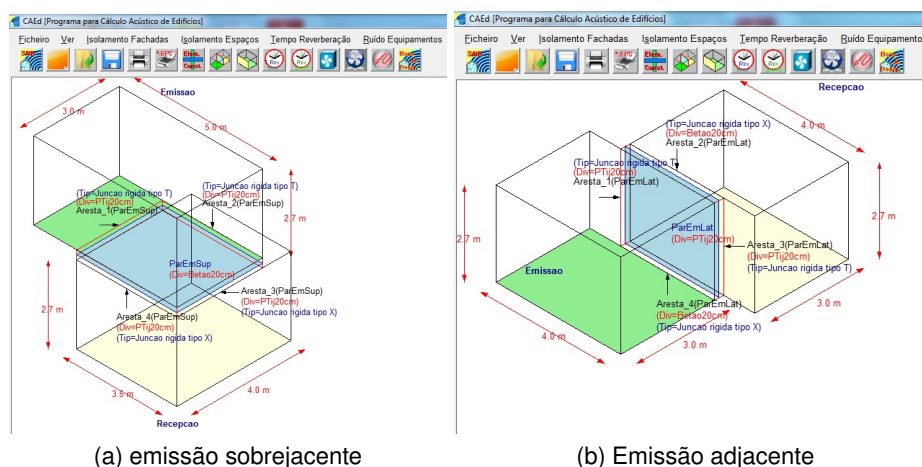


Figura 2.32: Resultado obtido



(a) emissão sobrejacente

(b) Emissão adjacente

Figura 2.33: Dois tipos de Pares de espaços (Emissão / Recepção) com um conjunto de definições atribuído

Cálculo dos índices de isolamento vibratórios K_{ij}

A escolha das equações para cálculo dos **índices de isolamento vibratório** K_{ij} dependem do tipo de junção das diferentes arestas que constituem o elemento separador dos dois espaços [tabelas 1.7 a 1.12, página 38 e seguintes]; bem como da sua configuração geométrica [tabelas 2.3 a 2.5, página 85 e seguintes].

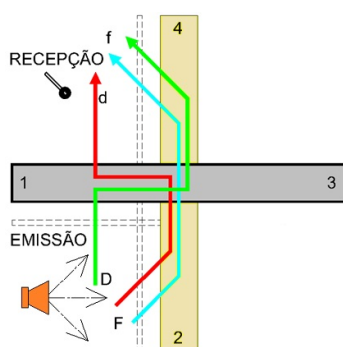
O módulo CAEd requer que o utilizador identifique o tipo de junção das arestas, mas reconhece de forma automática as configurações geométricas possíveis, escolhendo as equações apropriadas para o cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} .

De forma semelhante, relativamente aos **índices de isolamento sonoro marginais** R_{ij} o programa CAEd requer apenas que o utilizador atribua, aos elementos construtivos marginais, os elementos construtivos que os constituem - em termos de suporte construtivo e eventualmente de elementos duplicadores ΔR_w - para, na fase de cálculo, identificar de forma também automática as duplicações que devem se utilizadas [equações (1.18) a (1.20), página 36 e seguintes] para cada caminho marginal (Ff, Fd, ou Df).

Nas figuras das tabelas 2.3 a 2.5 representa-se a tracejado a eventualidade de existirem ou não duplicações. Caso os caminhos Ff, Fd ou Df intersectem ou não estes tracejados assim será ou não contabilizado o parâmetro ΔR_w nas equações de cálculo dos índices de isolamento sonoro marginais R_{ij} .

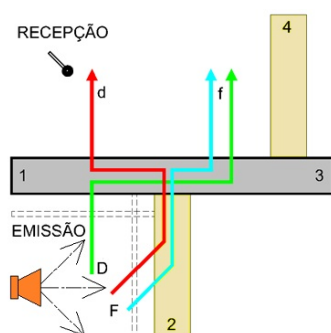
Assim, nas equações (1.18), (1.19) e (1.20) [página 36 e seguintes], os valores adoptados para $\Delta R_{Ff,w}$, $\Delta R_{Fd,w}$, ou $\Delta R_{Df,w}$ respectivamente (designados por $\Delta R_{ij,w}$), obedecem no programa CAEd ao seguinte critério:

- Caso o caminho Ff, Fd, ou Df não intersecte nenhuma duplicação: $\Delta R_{ij,w} = 0$. Por exemplo: caso de um caminho Ff, em que apenas existe uma duplicação no elemento separador;
- Caso o caminho Ff, Fd, ou Df intersecte apenas uma duplicação: $\Delta R_{ij,w} = \Delta R_{i,w}$. Por exemplo: caso do caminho Ff, em que apenas existe uma duplicação na parede marginal do lado da emissão;
- Caso o caminho Ff, Fd, ou Df intersecte duas duplicações: $\Delta R_{ij,w} = \Delta R_{i,w} + \Delta R_{j,w}$. Por exemplo: caso do caminho Ff, em que existe uma duplicação na parede marginal do lado da emissão e outra do lado da recepção.



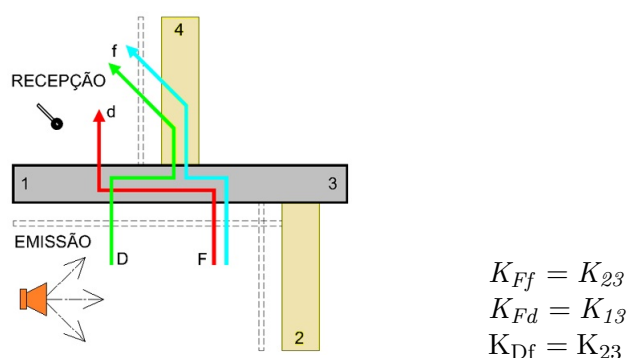
$$\begin{aligned}
 K_{Ff} &= K_{24} \\
 K_{Fd} &= K_{12} \\
 K_{Df} &= K_{14} (\equiv K_{12})
 \end{aligned}$$

Tabela 2.3: Cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} , de uma junção com as superfícies perpendiculares alinhadas



$$\begin{aligned}
 K_{Ff} &= K_{23} \\
 K_{Fd} &= K_{12} (\equiv K_{23}) \\
 K_{Df} &= K_{13}
 \end{aligned}$$

Tabela 2.4: Cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} , de uma junção com as superfícies perpendiculares desalinhadas, formando um "T" virado para a Recepção



$$K_{Ff} = K_{23}$$

$$K_{Fd} = K_{13}$$

$$K_{Df} = K_{23}$$

Tabela 2.5: Cálculo dos índices de isolamento vibratório K_{ij} , de uma junção com as superfícies perpendiculares desalinhadas, formando um "T" virado para a Emissão

Cálculo do tempo de reverberação

O módulo de cálculo do tempo de reverberação, no que diz respeito à definição geométrica das superfícies envolventes do espaço interior, apresenta algumas semelhanças com o processo de definição de um espaço no âmbito do módulo `common_Editor`, já apresentado anteriormente.

Assim, para ilustrar este módulo do programa apresentam-se apenas as imagens constantes das figuras 2.34 a 2.35.

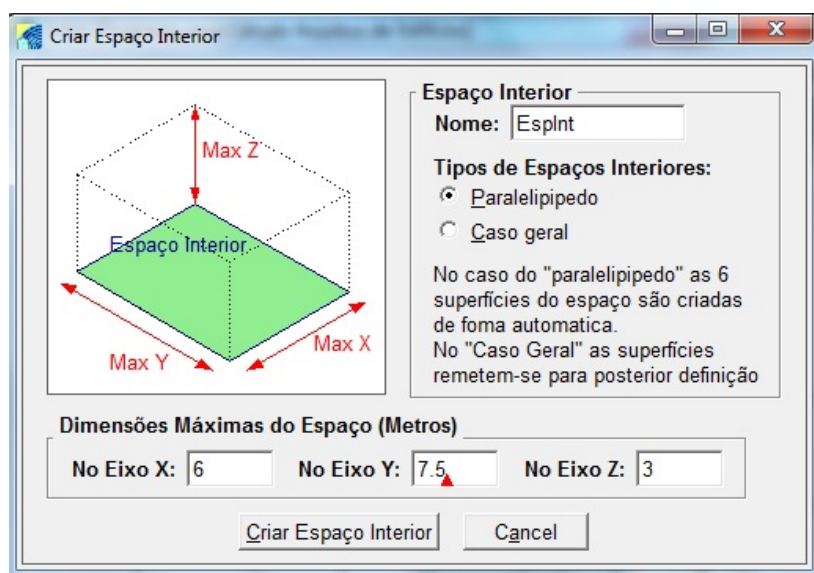


Figura 2.34: Caixa de diálogo para iniciar a representação de um espaço para cálculo do tempo de reverberação

Após efectuada a definição geométrica das superfícies envolventes de um determinado recinto ou espaço interior, deverá ser atribuído a cada superfície um revestimento, o qual é caracterizado em termos das diferentes

absorções sonoras que possui para as frequências entre 125Hz e 4000Hz.

Quando todas as superfícies estão associadas a um determinado revestimento torna-se possível realizar uma estimativa do tempo de reverberação do espaço representado no Editor 3D de CAEd.

Para definir as propriedades de um revestimento de superfície o utilizador pode recorrer à base de dados do programa CAEd, que foi maioritariamente construída com base na publicação do LNEC ITE-8 [11], ou definir revestimentos com base em dados de bibliografia ou de ensaios de que disponha, dado que o programa também o permite.

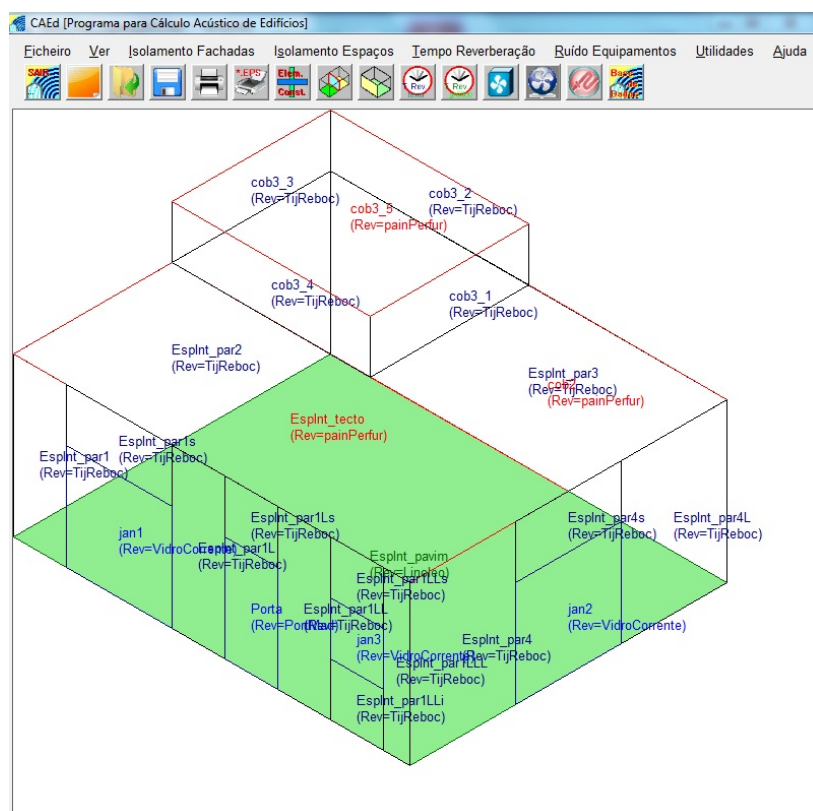


Figura 2.35: Espaço para cálculo do tempo de reverberação

Verifica-se portanto que o utilizador apenas necessita de representar o edifício no editor 3D do programa CAEd, bem como de atribuir às superfícies representadas as definições construtivas em termos de revestimentos, que pretende.

O cálculo do tempo de reverberação é realizado no programa CAEd com base nas fórmulas de Sabine (2.6) e de Eyring (2.7).

Pedro Martins da Silva [11] refere que é possível simplificar a fórmula de Eyring (2.7) nos casos em que ($\bar{\alpha} \leq 0,10$) obtendo-se a fórmula de Sabine

(2.6). Efectivamente a fórmula de Eyring é deduzida na hipótese que o campo sonoro se reduz para $(1 - \bar{\alpha})$ vezes o seu valor em cada reflexão.

$$T_R = -\frac{0,161 \times V}{S \times \bar{\alpha}} \quad (2.6)$$

$$T_R = -\frac{0,161 \times V}{S \times \text{Log}_e[1 - \bar{\alpha}]} \quad (2.7)$$

Onde:

T_R = Tempo de reverberação para uma frequência determinada, em segundos;

V = Volume do recinto ou espaço interior em m^3 ;

S = Superfície total do contorno do recinto ou espaço fechado, em m^2 ;

$\bar{\alpha}$ = Coeficiente de absorção sonora médio do contorno, para uma frequência determinada [equação (2.8)].

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_n \bar{\alpha}_n \times S_n}{S} \quad (2.8)$$

Onde:

$\bar{\alpha}_n$ = Coeficiente de absorção sonora do elemento n , para uma frequência determinada;

S_n = Área do elemento n , em m^2 .

As equações (1.39) a (1.42) (página 48 e seguintes), preconizadas na norma EN 12354-6 para o cálculo do Tempo de Reverberação, são equivalentes à fórmula de Sabine, assumindo $T = 20^\circ C$ e $HR = 55\%$.

O programa CAEd calcula o tempo de reverberação T_R com base nas equações (2.6) e (2.7), porém considera que $\bar{\alpha}_n = \frac{A}{S}$ em que A é calculado com base na equação (1.39), página 47.

As fórmulas de Sabine e de Eyring são baseadas em descrição estatística e pressupõem que o campo sonoro é difuso. Campo difuso é aquele em que se admite como uniforme o valor eficaz da pressão sonora no campo estabelecido, verificando-se a propagação de energia em todos os sentidos, com incidência do contorno em todos os ângulos possíveis [11].

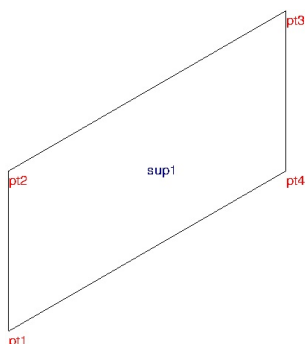
Quando a forma do recinto possui acentuadas irregularidades ou dimensões que o tornam excessivamente estreito numa das suas dimensões poder-se-ão verificar diferentes valores de pressão sonora, no mesmo instante de tempo, em diferentes localizações desse recinto ou espaço irregular. Tal ocorrência deve-se à maior perda de intensidade sonora em determinados percursos do interior do espaço em que as distâncias percorridas são maiores, quando comparados com outros percursos.

Os casos de recintos acima descritos; correspondem às situações que não

cumprem os limites de aplicação das equações (1.39) a (1.42) definidos na norma EN 12354-6 e apresentados na página 48. Nestes termos, a premissa de se tratar de campo difuso não se verifica, pelo que as fórmulas de Eyring ou Sabine não devem ser aplicadas. Para tais casos torna-se mais rigoroso utilizar metodologias baseadas no traçado geométrico de raios sonoros. O programa CATT-Acoustics, por exemplo, possui um algoritmo de cálculo do Tempo de reverberação que utiliza esta metodologia, sendo que o programa CAEd possui uma interface com este programa que permite a exportação automática do modelo geométrico representado no ambiente CAEd, para um ficheiro de texto que o CATT pode ler.

Em termos do programa CAEd, as áreas S_n que as fórmulas de Sabine e Eyring, requerem para efectuar o cálculo do tempo de reverberação T_R são obtidas do seguinte modo:

- É medida cada superfície utilizando a metodologia referenciada na tabela 2.6 - para realizar este cálculo o programa CAEd faz o reconhecimento das cotas dos quatro pontos que definem geometricamente essa superfície;
- Todas as superfícies com o mesmo revestimento superficial são agrupadas e as suas áreas somadas;
- O cálculo do tempo de reverberação é efectuado com base nas áreas agrupadas as quais partilham o mesmo valor de absorção sonora, no domínio da frequência.



Dados os pontos Pt_1 , Pt_2 , Pt_3 e Pt_4 do objecto “superfície” **sup1**, da figura ao lado, a sua área é calculada a partir da soma das áreas dos seguintes dois triângulos:

Δ_1 : formado pelos pontos Pt_1, Pt_2, Pt_3 ;

Δ_2 : formado pelos pontos Pt_1, Pt_3, Pt_4 .

$$\text{Area}_{\Delta_1} = \frac{1}{2} \cdot | \overrightarrow{Pt_1Pt_2} \wedge \overrightarrow{Pt_1Pt_3} |$$

$$\text{Area}_{\Delta_2} = \frac{1}{2} \cdot | \overrightarrow{Pt_1Pt_3} \wedge \overrightarrow{Pt_1Pt_4} |$$

Tabela 2.6: Método de medição da área de objectos “superfície”

2.4 Programa - RctCAD_v2

O módulo de cálculo para verificação do RCCTE foi designado pelo nome “**RctCAD_v2**”. Esta designação deve-se ao facto de ter sido anteriormente desenvolvido pelo, então INETI, agora LNEG², um programa de

²Laboratório Nacional de Energia e Geologia

interface entre o programa AutoCAD e a primeira versão do programa RCCTE (baseada no Decreto-Lei 40/90 de 21 de Fevereiro), no âmbito do Programa Europeu Altener [50]. Esse programa permitia a realização de um modelo tridimensional em ambiente AutoCAD e posteriormente realizava a medição das áreas desse modelo com vistas à realização de uma verificação do RCCTE. Esse programa foi descontinuado em virtude de a empresa Autodesk, responsável pelo desenvolvimento e comercialização do AutoCAD, realizar frequentemente actualizações que exigiam a utilização de novos compiladores (bem como o estabelecimento de um compromisso formal que impunha pagamentos anuais para obtenção da informação necessária à realização dessas actualizações).

Assim o programa “**RctCAD_v2**” é a recuperação da ideia que nasceu com a versão inicial, porém em modo “stand-alone”, isto é: sem estar dependente de um software comercial, qualquer que ele fosse. Utiliza-se pois um ambiente gráfico que, embora mais simples, pretende-se que esteja mais adaptado aos requisitos da última versão desta regulamentação, o RCCTE. Conforme já se referiu deverá ainda permitir a introdução de rotinas de procura, baseadas em conceitos próprios dos sistemas periciais, conforme desenvolvimentos anteriores do autor [15].

Este módulo encontra-se ainda numa fase intermédia, ainda que tenha sido desenvolvido até um estado que permitisse a sua integração na arquitectura concebida.

No conceito do `common_Editor` está implícito que os “espaços” representados são reduzidos à sua essência geométrica. Isto é, eles são representados por um conjunto de linhas que apenas define os traços gerais do seu volume no espaço a 3D. Neste contexto, é assumido que essas linhas passam nos pontos intermédios³ das superfícies, que nesta fase ainda não são dotadas de espessura, dado que se trata de uma fase de concepção onde o grau de detalhe do projecto ainda é reduzido.

Porém, o RCCTE impõe que as superfícies do edifício sejam medidas pelo interior o que implicará que seja feita uma conversão de modo a que a superfície definida geometricamente pelos pontos intermédios no **common_Editor** seja transformada numa outra superfície onde sejam descontadas as dimensões de espessuras de outras superfícies em contacto com elas.

Essa conversão deverá ser realizada através das potencialidades da linguagem PROLOG através das seguintes operações:

- Representação declarativa dos diferentes casos possíveis;
- Representação dos métodos de cálculo dos pontos das superfícies associados ;

³Por pontos intermédios entende-se aqui os pontos de separação entre dois espaços que são equidistantes de cada um dos lados da superfície se esta for dotada de uma espessura

- Implementação de rotinas de reconhecimento das situações particulares que ocorrem em cada junção de parede para posterior selecção do cálculo adequado.

O desenvolvimento desta rotina de conversão já foi iniciado porém ainda se considera haver desenvolvimentos futuros a empreender, pelo que este módulo se apresenta aqui apenas como a definição do conceito preconizado.

Apesar de as rotinas de cálculo ainda não terem sido concluídas há um conjunto grande de opções que já foram tomadas e assim transpostas para programação em XPCE/PROLOG, tais como:

- Representação declarativa dos diferentes casos possíveis;
- Representação dos métodos de cálculo dos pontos das superfícies associados ;
- Implementação de rotinas de reconhecimento das situações particulares que ocorrem em cada junção de parede para posterior selecção do cálculo adequado.

2.4.1 Funcionalidades do programa RctCAD_v2

Este programa foi desenvolvido de forma semelhante ao “**common_Editor**” e ao “**e+_Editor**”. Porém em face dos seus objectivos e funcionalidades serem diferentes, os objectos desenvolvidos também são diferentes.

Enquanto no “**common_Editor**” a entidade base é o “espaço”, e no “**e+_Editor**” é a “zona térmica” (zone), aqui a entidade base é a “Fracção Autónoma”, à semelhança do que acontece no **RCCTE**.

Uma representação geométrica de um edifício, ao ser exportada do programa “**common_Editor**” para este ambiente, verifica previamente se os espaços estão agrupados em objectos de tipo **grupo** e, em caso afirmativo, fará corresponder a cada grupo uma “Fracção Autónoma”.

Caso não haja esse agrupamento de espaços então a definição exportada pelo “**common_Editor**” do objecto edificio deste programa corresponderá no seu todo a uma “Fracção Autónoma” única, e cada espaço no “**RctCAD_v2**” não terá equivalência no “**common_Editor**” porque essa distinção não tem relevância nos termos do RCCTE, porém haverá relevância relativamente às definições das superfícies em ambiente “**RctCAD_v2**”.

Assim, caso uma determinada superfície partilhe dois espaços do mesmo grupo no “**common_Editor**” será convertida num objecto “superfície” que será designada por “interna”.

Caso uma superfície partilhe dois espaços de grupos distintos no “**common_Editor**” será convertida num objecto superfície designada por interior.

Este software prevê o mesmo tipo de filosofia de representação que os outros anteriormente descritos: “**common_Editor**”, “**e+ _Editor**” e módulo de cálculo do tempo de reverberação do programa “**CAEd**”. Isto é, representação de unidades arquitectónicas básicas (espaços, zonas térmicas, ou recintos fechados) que neste caso são objectos designados por “Fracção Autónoma” e estas constituídas por superfícies cujos atributos ou variáveis correspondem aos requisitos de propriedades que o RCCTE requer.

Porém, neste caso há que considerar o facto de ser relevante que as medições das superfícies (paredes, pavimentos ou coberturas) sejam efectuadas pelo lado interior, conforme estabelece o RCCTE.

Assim, o desenvolvimento deste componente ainda vai atingir um grau de profundidade semelhante aos restantes, anteriormente descritos, sendo que, todos os conceitos informáticos necessários já foram exemplificados nos outros módulos aqui referidos, tratando-se nesta fase apenas de uma questão de tempo para conclusão do referido desenvolvimento.

No entanto, a título de exemplo, apresentam-se de seguida, por meio de imagens ilustrativas de caixas de diálogo, algumas funcionalidades deste módulo já desenvolvidas [figuras 2.36 a 2.45]:

- nas figuras 2.36 e 2.37 apresentam-se as caixas de diálogo para as definições gerais do edifício;
- nas figuras 2.38 e 2.39 apresentam-se as caixas de diálogo para iniciar a definição geométrica de fracções autónomas;
- nas figuras 2.40 e 2.41 exemplifica-se como é possível disponibilizar um material e atribuir-lhe a respectiva espessura com vista a uma futura utilização na definição de um elemento construtivo;
- nas figuras 2.42 e 2.43 apresentam-se as caixas de diálogo para a definição de elementos construtivos opacos;
- nas figuras 2.44 a 2.45 apresentam-se as caixas de diálogo para a definição de envidraçados e respectivas protecções.

As definições de materiais constantes na árvore da base de dados da figura 2.40 foram elaboradas com base nos quadros I.1 a I.4 da publicação do LNEC ITE-50 [51]. O utilizador ao seleccionar um dos itens disponibilizados na referida árvore acciona a caixa de diálogo representada na figura 2.41 que contem já os dados de condutibilidade térmica (λ em $W/m \cdot ^\circ C$) e de massa volúmica aparente (em kg/m^3) necessários ao cálculo da resistência térmica e contribuição para a inércia do material escolhido. Para concluir o processo o utilizador terá que identificar com um nome ao material escolhido bem como atribuir-lhe uma espessura.

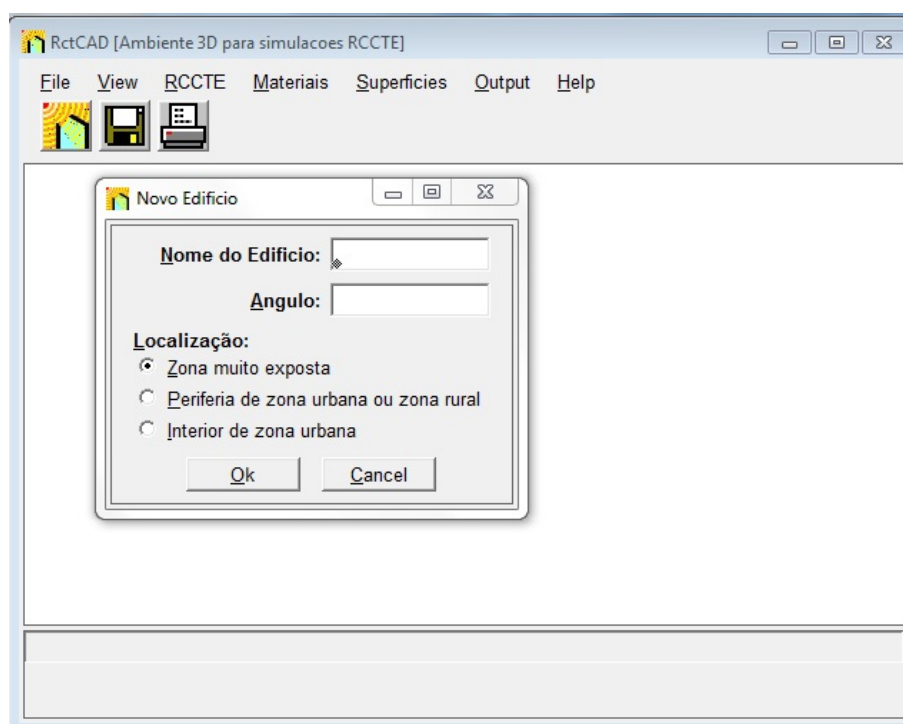


Figura 2.36: Ambiente RctCAD com caixa de diálogo para inicialização do objecto edifício (apenas um é admitido por projecto). Requer um nome definido pelo utilizador, o ângulo do eixo “Y” do sistema de eixos do edifício com o Norte geométrico, e o tipo de localização

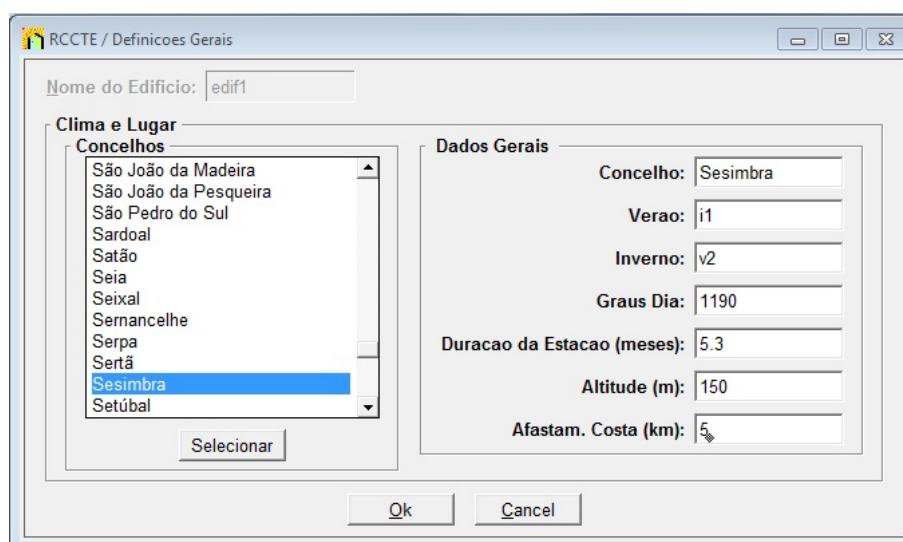


Figura 2.37: Caixa de diálogo para Definições Gerais do Edifício

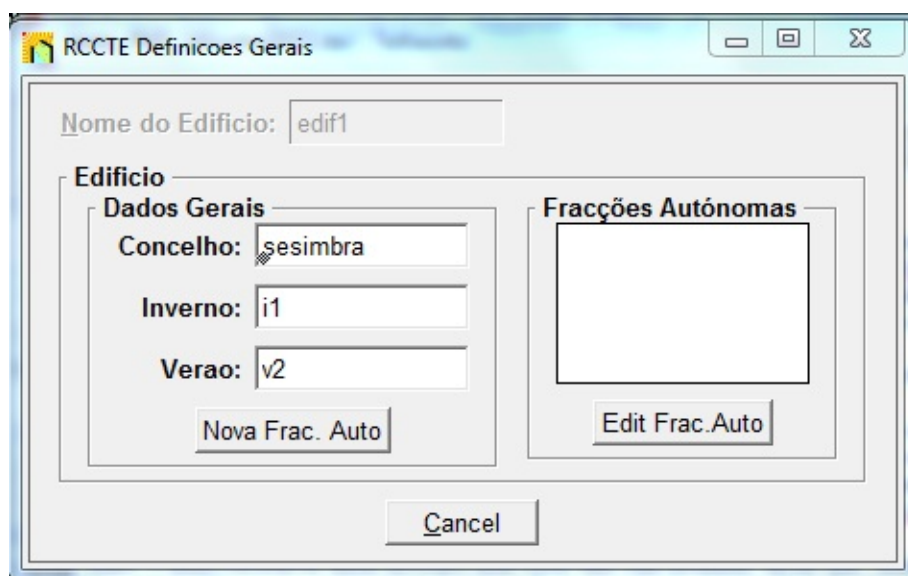


Figura 2.38: Caixa de diálogo para Definição de uma nova Fracção Autónoma

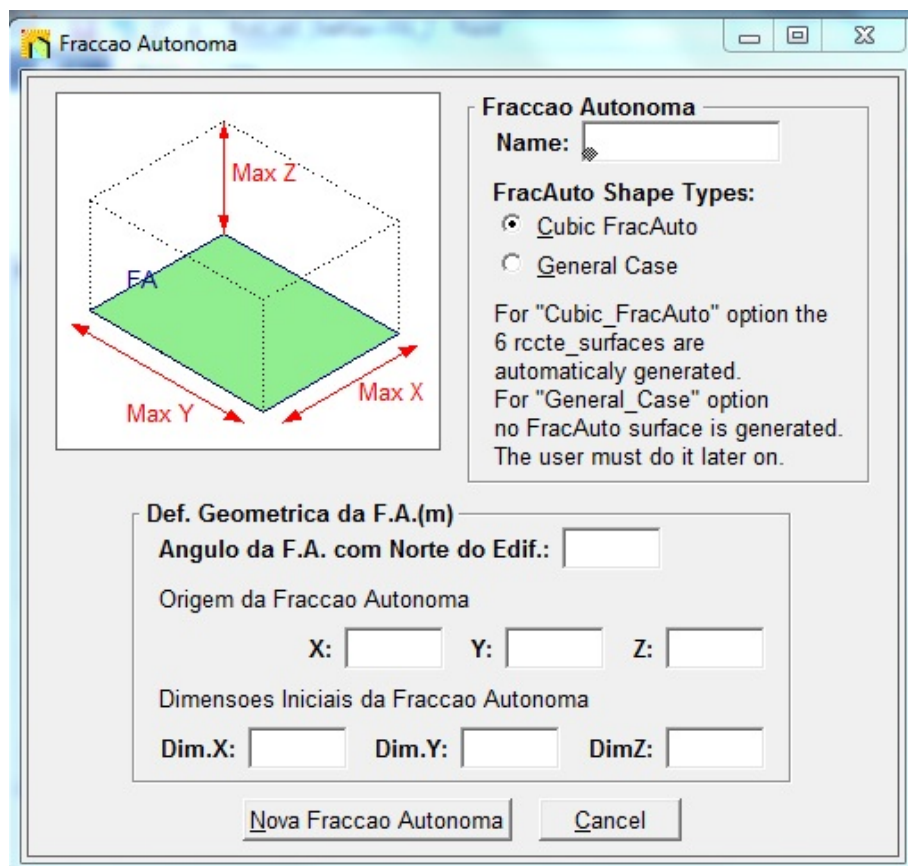


Figura 2.39: Caixa de diálogo para inicialização geométrica da nova Fracção Autónoma. O Norte do edifício representa o eixo "Y" no sistema de eixos do edifício

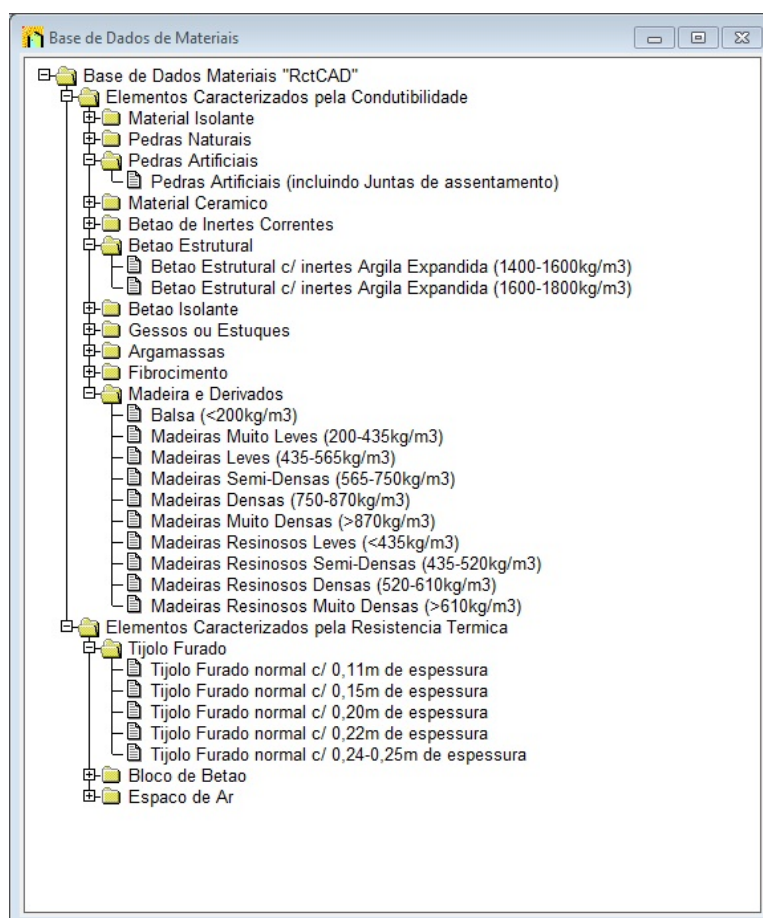


Figura 2.40: Base de Dados para definição de materiais a utilizar na definição de futuras construções

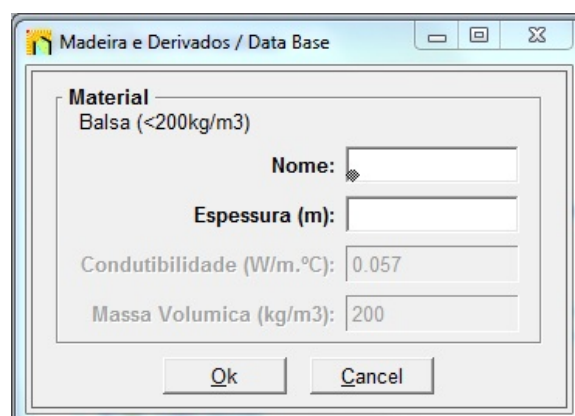


Figura 2.41: Após selecção de um item na figura 2.40

Numa segunda fase poderá ser composto um elemento construtivo com diversas camadas de materiais ou espaços de ar, utilizando-se para tal a sequência de caixas de diálogo representada nas figuras 2.42 e 2.43.

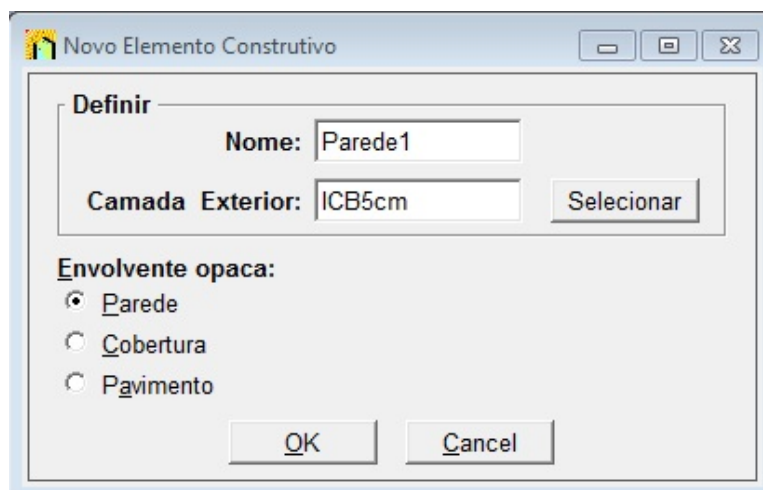


Figura 2.42: Caixa de diálogo para inicializar da definição de novo objecto “elemento construtivo” opaco

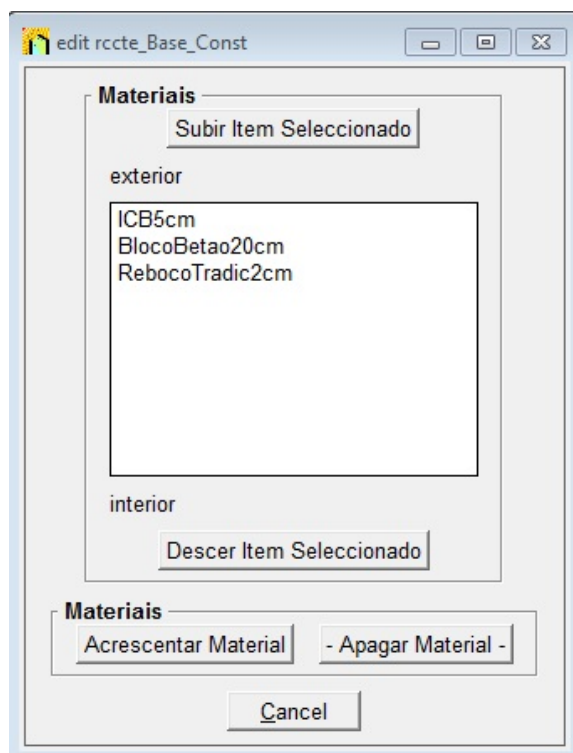


Figura 2.43: Caixa de diálogo para editar “elementos construtivos” iniciados conforme figura 2.42. Possibilita que novos materiais ou espaços de ar bem como a sua localização relativa no interior do elemento construtivo

No RCCTE um elemento construtivo poderá tomar valores diferentes para as resistências superficiais consoante se situe numa parede, pavimento,

ou cobertura, e consoante essa parede, pavimento, ou cobertura se situem numa envolvente exterior ou interior.

Para tornar esta complexidade de cálculo menos pesada para o utilizador optou-se pela utilização de dois tipos de objectos diferentes na definição dos elementos construtivos necessários para a verificação do RCCTE:

- Um objecto que é disponibilizado para ser atribuído às diferentes superfícies que compõem as fracções autónomas, e que em termos de variáveis possui uma resistência térmica atribuída, a qual corresponde à soma das resistências dos materiais e espaços de ar interiores que compõem esse elemento construtivo - designa-se aqui por objecto base de elemento construtivo;
- Um objecto que será utilizado nos cálculos de verificação do cumprimento do RCCTE e cujo coeficiente de transmissão térmica (valor "U") associado já tem em consideração as resistências superficiais exterior e interior da parede - designa-se aqui por objecto para cálculo de RCCTE.

Pretende-se com este procedimento tornar o processo de concepção arquitectónica mais próximo do processo de avaliação do desempenho das soluções em estudo. Efectivamente, o arquitecto, ao definir a sua parede, apenas está preocupado com a sua constituição construtiva (objecto base de elemento construtivo), deixando ao programa a tarefa de escolher os valores de resistências superficiais adequados ao cálculo consoante as situações identificadas de forma automática pela programação declarada (objecto para cálculo de RCCTE).

Também aqui se tira especial partido das capacidades da linguagem PROLOG em termos de representação de conhecimento.

Desenvolveram-se também metodologias para determinar a caracterização térmica de elementos construtivos associados a vãos de janelas. Isto inclui o conjunto do "vão envidraçado" e "dispositivo sombreador" a ele associado:

- Coeficiente de Transmissão Térmico do conjunto, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;
- Factor Solar do Vidro (G_{\perp});
- Factor Solar considerando o elemento sombreador activado a 100% ($G_{\perp,100\%}$).

Também aqui se utilizam as capacidades da linguagem PROLOG para representar conhecimento de forma declarativa impedindo que seja seleccionada pelo utilizador qualquer combinação de vidro e respectiva protecção cujos valores sejam incoerentes ou incompatíveis.

Apresentam-se nas figuras 2.44 a 2.45 exemplos das caixas de diálogo construídas para o efeito.

Novo Envidracado

Designacao vidro:

Tipo Envidracado

Tipo de Edificio:

Com Ocupacao Nocturna
 Sem Ocupacao Nocturna

Tipo de Vao: Janela Simples Janela Dupla

Tipo de Vidro: Vidro Simples Vidro Duplo

Com Boa Vedacao nas Frinchas:

Sim Nao

Definir Envidracado

Valor U (W/m2.°C):

Factor Solar Vidro:

Factor Solar Protec:

Figura 2.44: Caixa de diálogo para inicializar da definição de novo objecto “elemento construtivo” envidraçado

Valor "U" do Vao Envidracado

Definicoes Envidracado

Tipo de Vao: Janela Simples Janela Dupla

Tipo de Vidro: Vidro Simples Vidro Duplo

Tipo de Janela: Fixa Giratoria De correr

Espessura da Lamina de ar: 6mm 16mm 16mm baixa Emissividade

Caixilho: Madeira Metal SEM corte Termico Metal COM corte Termico Plastico

Dispositivo Oclusao Nocturna: Sem dispositivo Cortina Interior Opaca Dispositivo Permeabilidade Elevada Dispositivo Permeabilidade Baixa

Figura 2.45: Caixa de diálogo para cálculo do valor “U” de “elementos construtivos” envidraçados

Capítulo 3

Caso de Estudo

3.1 Descrição do caso de estudo

Para testar as ferramentas desenvolvidas foram efectuadas avaliações do conforto térmico e desempenho acústico aplicadas a um exemplo concreto de projecto de arquitectura.

Escolheu-se assim um projecto que corresponde a um concurso de ideias promovido pela empresa **Parque Escolar, EPE** para um Estudo Prévio relativo a uma escola localizada perto da urbanização da Quinta Do Peru, no concelho de Sesimbra, cujo projecto de arquitectura foi realizado em colaboração com o arquitecto Henrique Tavares Chicó, tendo o autor participado também, quer a nível do desenvolvimento do trabalho, quer como consultor para os assuntos relacionados com o desempenho acústico, térmico e de iluminação natural do projecto.

Para realização de simulações que pudessem servir de exemplo para o presente trabalho, escolheu-se este estudo prévio, porque sendo um edifício escolar complexo, requer o cumprimento de um conjunto diversificado de exigências de desempenho, tanto a nível da acústica, como do conforto térmico, as quais devem ser devidamente compatibilizadas. Verifica-se assim que um tal exemplo poderá tornar mais evidente a necessidade de se promover uma concepção arquitectónica integrada e rigorosa em que possam ser compatibilizadas todas as exigências de desempenho aplicáveis.

Na figura 3.1 apresenta-se uma planta do piso zero do estudo prévio realizado, na qual se distinguem por cores os diferentes grupos funcionais que constituíram o projecto. Assim, a área a vermelho corresponde à Zona das Salas de Aulas e espaço de aprendizagem informal ou “learning street”.



Figura 3.1: Planta geral - piso Térreo

Na figura 3.2 apresenta-se uma perspectiva exterior do corpo de salas de aulas voltado para a orientação Sul e na figura 3.3 apresenta-se outra perspectiva exterior do estudo prévio realizado, vista do quadrante Sudoeste, que não inclui o corpo de gimnodesportivo (representado a azul claro na figura 3.1). A figura 3.4 contém um esboço de corte e uma perspectiva exterior desenhados à mão pelo arquitecto Henrique Tavares Chicó.

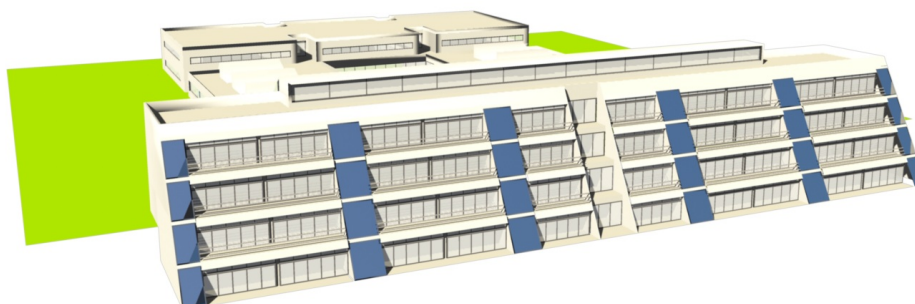


Figura 3.2: Imagem tridimensional do corpo Sul do Estudo Prévio realizado

As restantes áreas funcionais apresentadas nesta planta são as seguintes: Biblioteca (cor laranja), Zonas de Laboratórios (cor amarela), pequeno pá-

tio interior (cor verde claro), Zona de Auditórios (cor verde escuro), Zona de Serviços Administrativos (cor lilás), Zona de Cantina (cor roxo), zona de Gimno-desportivo (cor azul claro), e Zona de oficinas técnicas (cor bege).

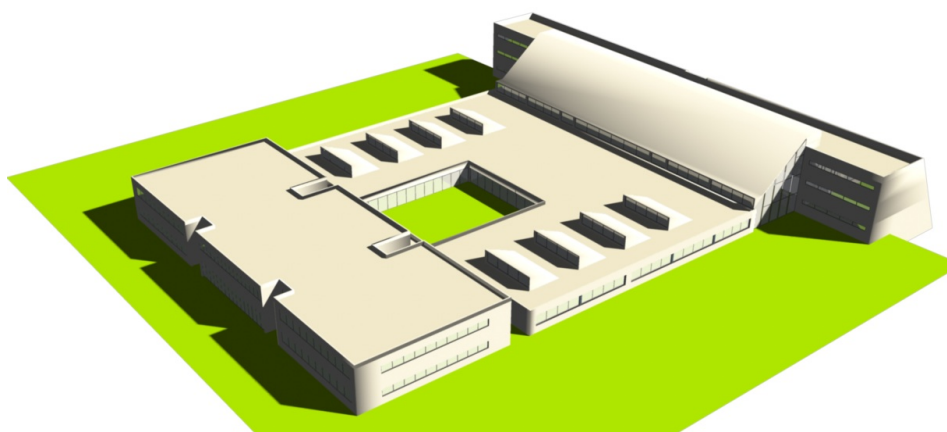


Figura 3.3: Imagem tridimensional; vista do quadrante Noroeste do Estudo Prévio realizado

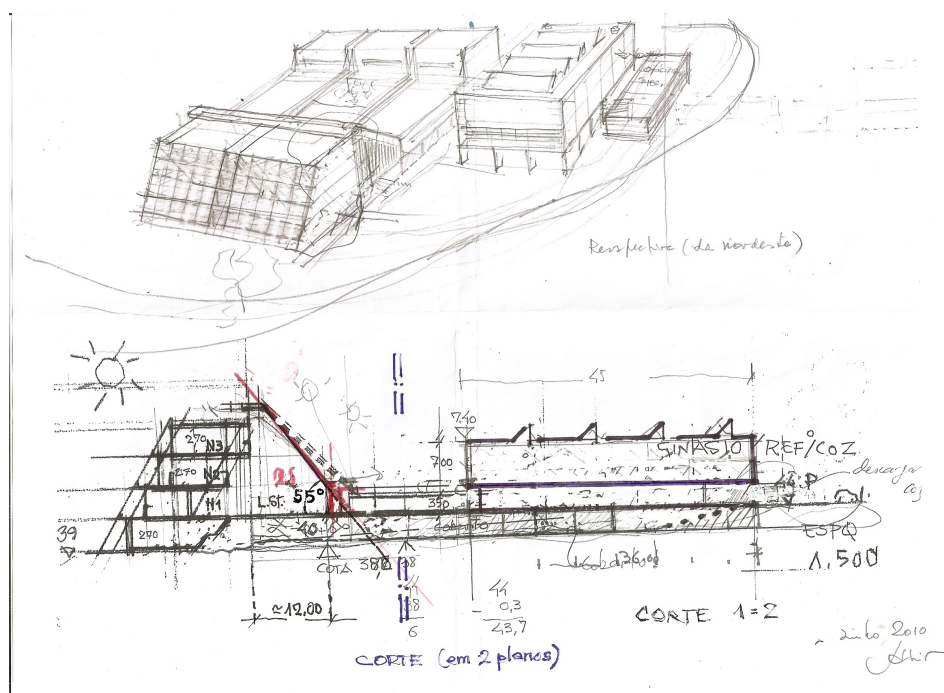


Figura 3.4: Corte do edifício - Esboço desenhado à mão para projecto. Autoria: Henrique Tavares Chicó

Sendo o programa base, definido pela entidade que promoveu o concurso - a empresa Parque Escolar EPE - extenso e complexo, optou-se, no âmbito deste trabalho, por restringir a avaliação a apenas um corpo desse edifício:

o corpo das salas de aulas. Este corpo, corresponde à área assinalada a vermelho na planta geral, apresentada na figura 3.1, e encontra-se também representado, em corte na figura 3.5 e, em perspectiva, na figura 3.6.

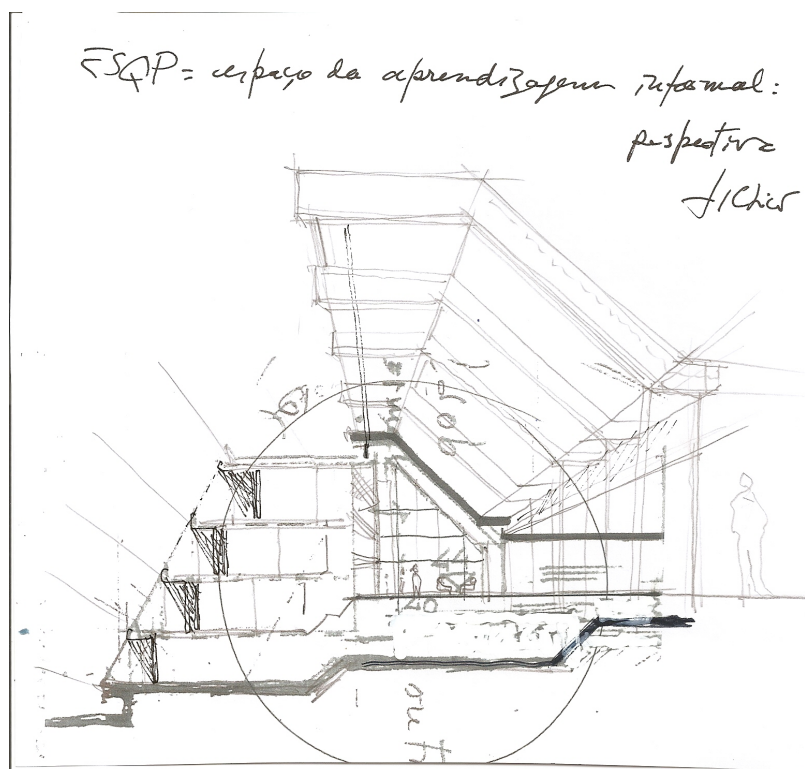


Figura 3.5: Corte perspectivado representando o espaço de aprendizagem informal (Learning Street) e salas de aulas orientadas a Sul - “Croquis” de Henrique Tavares Chicó

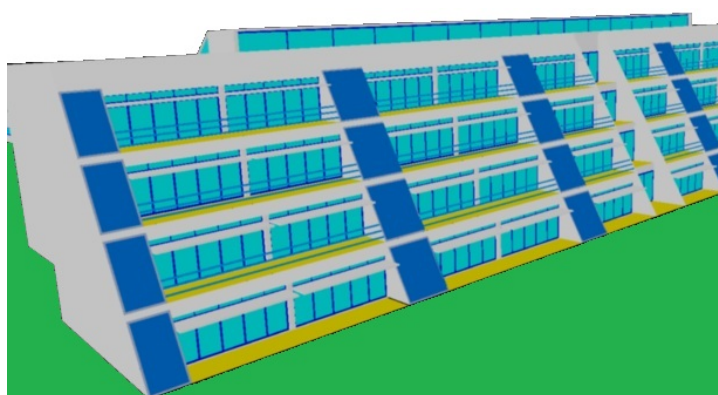


Figura 3.6: Imagem de “rendering” obtida a partir do programa AutoCAD - corpo Sul, zona de salas de aula

3.1.1 Descrição da construção

Para o caso de estudo foram definidos inicialmente os seguintes elementos construtivos:

Paredes Exteriores:

- Paredes de alvenaria simples de tijolo furado com 22cm de espessura revestidas pelo interior com camada de reboco com 1,5cm de espessura e com acabamento exterior em revestimento isolante de tipo ETICS¹ com 6cm de espessura.

Paredes Interiores

- Paredes de alvenaria simples de tijolo furado com 22cm de espessura revestidas de ambos os lados com camada de reboco com 1,5cm de espessura;
- Paredes de alvenaria dupla de tijolo furado com 11+11cm de espessura revestidas exteriormente e de ambos os lados exteriores com camada de reboco com 1,5cm de espessura. A caixa de ar deverá ser de 25cm² com preenchimento parcial em lã mineral.

Coberturas Exteriores:

- Laje maciça de betão armado com 20 cm de espessura, com revestimento superior, pelo exterior, em chapa de zinco com isolamento em Poliestireno Expandido Extrudido (XPS) com 10 cm de espessura e acabamento pelo lado inferior em camada de lã mineral com 6cm de espessura, caixa de ar de 20 cm de espessura, e gesso cartonado com 13 mm de espessura (BA13), com uma furação inferior a 15% da área total.
- Laje maciça de betão armado com 20 cm de espessura - em zona de varandas - com revestimento superior, pelo exterior, em material cerâmico com 5mm de espessura assente sobre betonilha leve de assentamento com 5cm de espessura total e acabamento pelo lado inferior em camada de lã mineral com 6cm de espessura, caixa de ar de 20cm de espessura, e gesso cartonado com 13 mm de espessura (BA13), com uma furação inferior a 15% da área total.

Coberturas e Pavimentos Interiores:

- Laje de Betão com 20cm de espessura, com revestimento superior em Linóleo ou Vinílico assente sobre betonilha leve de assentamento com 5cm de espessura total, pelo lado inferior camada de lã mineral com 6cm de espessura, caixa de ar de 20cm de espessura, e gesso cartonado com 13 mm de espessura (BA13), com uma furação inferior a 15% da área total.

¹ETICS: External Thermal Insulation Composite System

²Contendo "earth tubes"

Envidraçados:

- Vidro duplo incolor 4(6)6 - adoptou-se uma solução de dois vidros incolores de tipo Planilux da Saint-Gobain. As propriedades acústicas foram obtidas com base no Manual do Vidro [52] e as propriedades térmicas foram obtidas através do programa informático Windows-6 [53].

O caso de estudo foi modelado geometricamente com o programa “**common_Editor**”, tendo-se obtido a imagem tridimensional que se representa na figura 3.7.

Neste exemplo optou-se por modelar apenas parte dos espaços de sala de aulas dado que aqui apenas se pretendia testar/evidenciar as capacidades de interacção do programa **common_Editor** com outras interfaces, sendo que, como anteriormente referido, a única que está totalmente desenvolvida até ao momento é a interface com o programa **e+_Editor**.

Acresce que esta interface destina-se a facilitar a realização de simulações com o programa EnergyPlus, o qual permite a introdução de um factor de multiplicação (*multiplier*) para contabilização energética de conjuntos de zonas térmicas com características iguais.

Por outro lado sendo o objectivo deste estudo a avaliação do conforto térmico e este depende das características de cada espaço, optou-se por modelar apenas uma sala de aulas conforme se verá mais à frente.

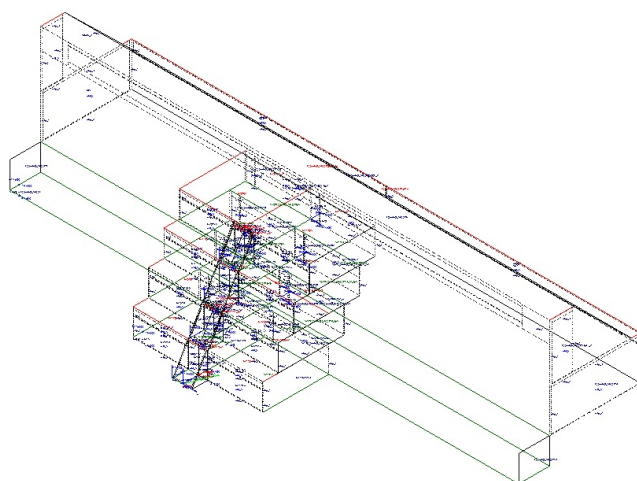


Figura 3.7: Imagem tridimensional do modelo realizado no ambiente gráfico do programa **common_Editor**

Uma representação geométrica no ambiente do programa **e+_Editor** [figura 3.8] do modelo em estudo foi obtida de forma automática e em apenas poucos segundos a partir da representação já realizada em ambiente do programa “**common_Editor**” [figura 3.7].

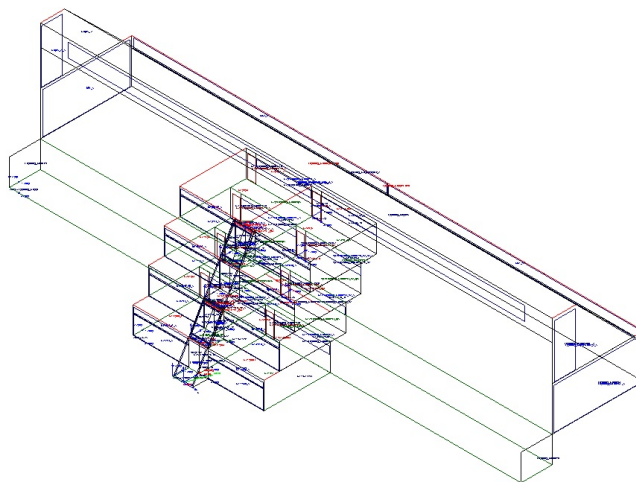


Figura 3.8: Imagem tridimensional do modelo convertido para o programa e+_Editor

Após realização de uma tentativa de simulação obteve-se a imagem da figura 3.9 em ambiente AutoCAD. Tratou-se apenas de uma tentativa, dado que nesta fase do protótipo do sistema em desenvolvimento não permite a obtenção de um modelo final pronto a simular EnergyPlus. Neste fase o programa common_Editor exporta apenas a sua definição geométrica para o e+_Editor.

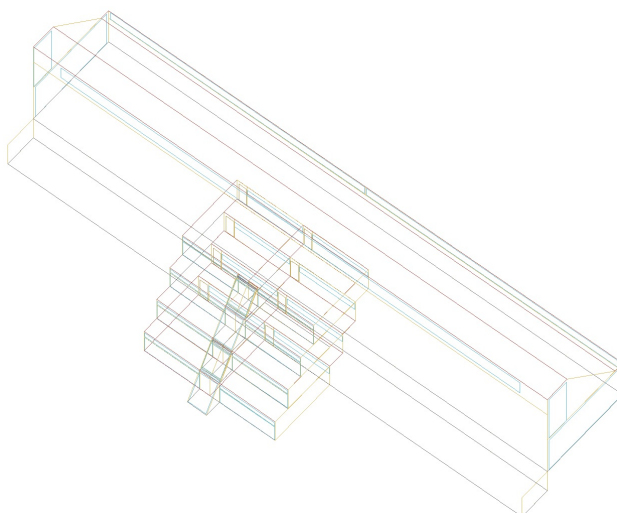


Figura 3.9: Imagem tridimensional do modelo obtido através de simulação com o programa EnergyPlus

Apresenta-se em primeiro lugar a avaliação do desempenho acústico relativamente ao caso de estudo por se ter verificado que esta impunha condi-

cionantes de desempenho mais imperativas.

3.2 Avaliação do desempenho acústico

Para avaliação do desempenho acústico do edifício escolar em análise utiliza-se o programa CAEd, para calcular o desempenho dos parâmetros acústicos aplicáveis tendo em atenção as exigências do RRAE.

Assim, identificaram-se os seguintes casos:

- Isolamento de fachadas cálculo do parâmetro $D_{2m,nT,w}$ para a fachada exterior de uma sala de aulas;
- Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aulas
 - cálculo do parâmetro $D_{nT,w}$, aplicado a três situações distintas:
 1. par de espaços com emissão sobrejacente;
 2. par de espaços constituído por salas de aula adjacentes;
 3. par de espaços constituído por uma circulação (emissão) e uma sala de aula adjacente;
- Nível do ruído de percussão entre salas de aulas - cálculo do parâmetro $L'_{nT,w}$, aplicado às situações anteriormente referidas;
- Tempo de Reverberação - verificação do tempo de reverberação no interior de uma sala de aulas.

A constituição dos diferentes elementos construtivos que delimitam os espaços arquitectónicos encontra-se já descrita na página 103 e seguintes. Para realizar o cálculo dos parâmetros regulamentares serão necessários os valores correspondentes à solução construtiva preconizada dos seguintes parâmetros:

$D_{2m,nT,w}$:

- Valores do índice de redução sonora a sons de condução aérea R_w , de cada uma das soluções construtivas, existentes na fachada em estudo;
- Valores que podem tomar os coeficientes C ou C_{Tr} ;

$D_{nT,w}$:

- Valores do índice de redução sonora, a sons de condução aérea R_w , de cada uma das soluções construtivas, existentes no par emissão/recepção, quer do elemento de separação entre os espaços quer das superfícies por onde se realiza a transmissão marginal;
- Valores do índice de melhoria de isolamento sonoro ΔR_w de eventuais duplicações.

$L'_{nT,w}$:

- Valores do índice de redução sonora, a sons de condução aérea R_w , de cada uma das soluções construtivas, existentes no par emissão/recepção, quer do elemento de separação entre os espaços, quer das superfícies por onde se realiza a transmissão marginal;
- Valores do índice de redução sonora a sons de percussão $L_{n,w}$ de cada uma das soluções construtivas horizontais, existentes no par emissão/recepção, quer do elemento de separação entre os espaços, quer das superfícies por onde se realiza a transmissão marginal;
- Valores do índice de melhoria do isolamento sonoro a sons de percussão ΔL_w de eventuais duplicações.

Tempo de Reverberação :

- Coeficientes de absorção sonora, α , dos elementos de revestimento do espaço.

No presente estudo utilizam-se valores de desempenho de elementos construtivos para os parâmetros mencionados, obtidos por meio de ensaios e devidamente referenciados através das suas fontes, bem como valores obtidos pelos métodos de cálculo mencionados.

Os valores calculados relativos ao índice de redução sonora a sons de condução aérea R_w , ou relativos ao índice de redução sonora a sons de percussão $L_{n,w}$, foram obtidos através da utilização dos métodos de cálculo elasto-dinâmico ou de Josse respectivamente.

Apresentam-se seguidamente os casos que foram calculados.

3.2.1 Cálculo do parâmetro R_w

Utilizando o programa CAEd, efectuou-se o cálculo segundo o método elasto-dinâmico (página 74 e seguintes) de dois elementos construtivos simples:

- Parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura;
- Laje de betão com 20cm de espessura;

Para efeitos do cálculo das frequências críticas, consideraram-se as propriedades físicas, para o betão e alvenaria de tijolo furado, constantes da tabela 3.1.

Por aplicação da equação 2.1 (página 75), obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 3.2.

	Parede Alvenaria c/ 22cm	Laje de betão c/ 20cm
Espessura, h (m)	0,22	0,20
Massa Volúmica, ρ (kg/m ³)	1100	2500
Coefficiente de Poisson ν	0,20 ¹	0,15 ²
Módulo de Young, E (Pa)	1,6 ^{10 3}	2,4 ^{10 3}

Tabela 3.1: Propriedades físicas consideradas para o cálculo de frequências críticas

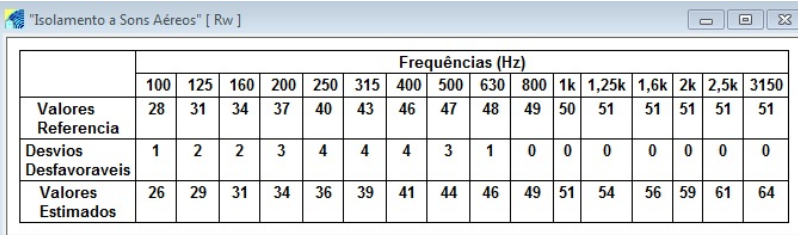
Por aplicação da equação 2.1 (página 75), obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 3.2.

	Parede Alvenaria c/ 22cm	Laje de betão c/ 20cm
Frequência Crítica (Hz)	76,19	104,09

Tabela 3.2: Resultados obtidos no cálculo das frequências críticas

Os valores do índice de redução sonora a sons de condução aérea R no domínio da frequência foram calculados pelo programa CAEd, com base no método elasto-dinâmico, conforme metodologia descrita na página 74 e seguintes. Apresentam-se seguidamente os resultados obtidos:

- Figuras 3.10 e 3.11: Resultados obtidos para a parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura.
- Figuras 3.12 e 3.13: Resultados obtidos para a laje de betão com 20cm de espessura.



	Frequências (Hz)															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3150
Valores Referencia	28	31	34	37	40	43	46	47	48	49	50	51	51	51	51	51
Desvios Desfavoraveis	1	2	2	3	4	4	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0
Valores Estimados	26	29	31	34	36	39	41	44	46	49	51	54	56	59	61	64

Figura 3.10: Tabela de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora, a sons de condução aérea, de uma parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico

¹ in [55].

² in [56].

³ in [57].

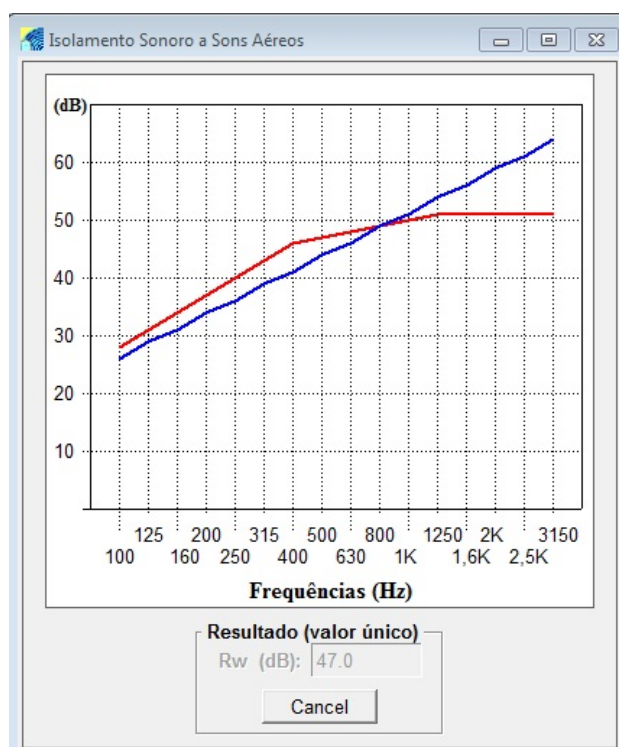


Figura 3.11: Gráfico de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora de uma parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico

	Frequências (Hz)															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3150
Valores Referencia	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56
Desvios Desfavoraveis	1	2	2	3	3	4	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0
Valores Estimados	32	34	37	39	42	44	47	49	52	55	57	59	62	64	67	69

Figura 3.12: Tabela de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora, a sons de condução aérea, de uma laje de betão armado com 20cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico

Com base nos valores obtidos para o índice de redução sonora, a sons de condução aérea R , no domínio da frequência, CAEd também calcula o valor único R_w , com base nos procedimentos da norma ISO 717-1[35], tendo-se obtido para os casos os seguintes valores:

- Parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura: $R_w = 47\text{dB}$;
- Laje de betão armado com 20cm de espessura: $R_w = 52\text{dB}$;

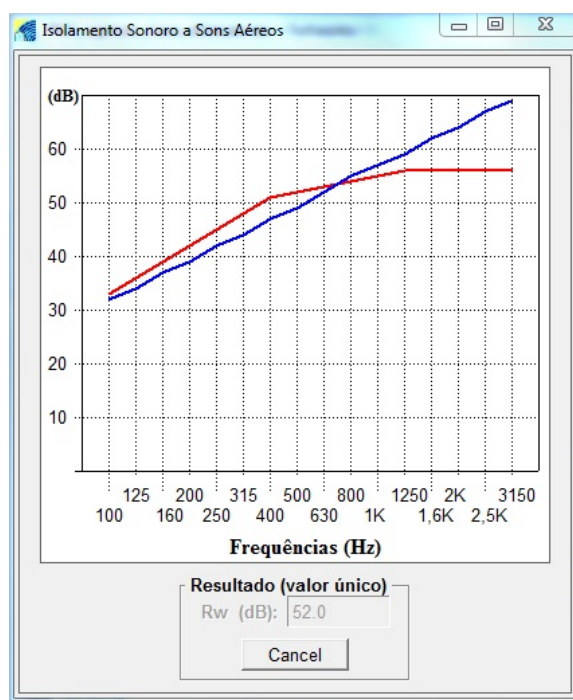


Figura 3.13: Gráfico de CAEd - Cálculo do índice de redução sonora, a sons de condução aérea, de uma laje de betão com 20cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico

3.2.2 Cálculo do parâmetro $L_{n,w}$

Efectuou-se o cálculo, do índice de isolamento sonoro a sons de percussão L_n , no domínio da frequência, segundo o método de Josse, para uma laje de betão armado com 20cm de espessura, conforme equação (2.5), página 77.

Os valores de L_n , no domínio da frequência, foram calculados pelo programa CAEd, conforme metodologia descrita na página 76 e seguintes. Apresentam-se na tabela 3.14 os resultados obtidos.

	Frequências (Hz)															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3150
Valores Referencia	78	78	78	78	78	78	77	76	75	74	73	70	67	64	61	58
Desvios Desfavoráveis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	5	7	9
Valores Estimados	72	71	70	72	71	71	71	71	71	71	71	71	70	69	68	66

Figura 3.14: Tabela de CAEd - Cálculo do nível sonoro normalizado de percussão, de uma laje de betão com 20cm de espessura, no domínio da frequência, segundo o método elasto-dinâmico

A partir dos valores obtidos para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão L_n , no domínio da frequência, CAEd também calcula o valor único $L_{n,w}$, com base nos procedimentos da norma ISO 717-2 [37], tendo-se obtido, para a laje de betão armado com 20cm de espessura, o seguinte resultado: $L_{n,w} = 76\text{dB}$.

3.2.3 Cálculo do parâmetro R'_w de um elemento composto

O programa CAEd permite também efectuar o cálculo do índice de isolamento sonoro aparente a sons de condução aérea de um elemento de fachada composto de diferentes elementos construtivos. Este cálculo é realizado com base nas equações (1.35) e (1.36). Apresenta-se na figura 3.15 a representação tridimensional em CAEd, a partir da qual se realizou o cálculo de R'_w do elemento composto.

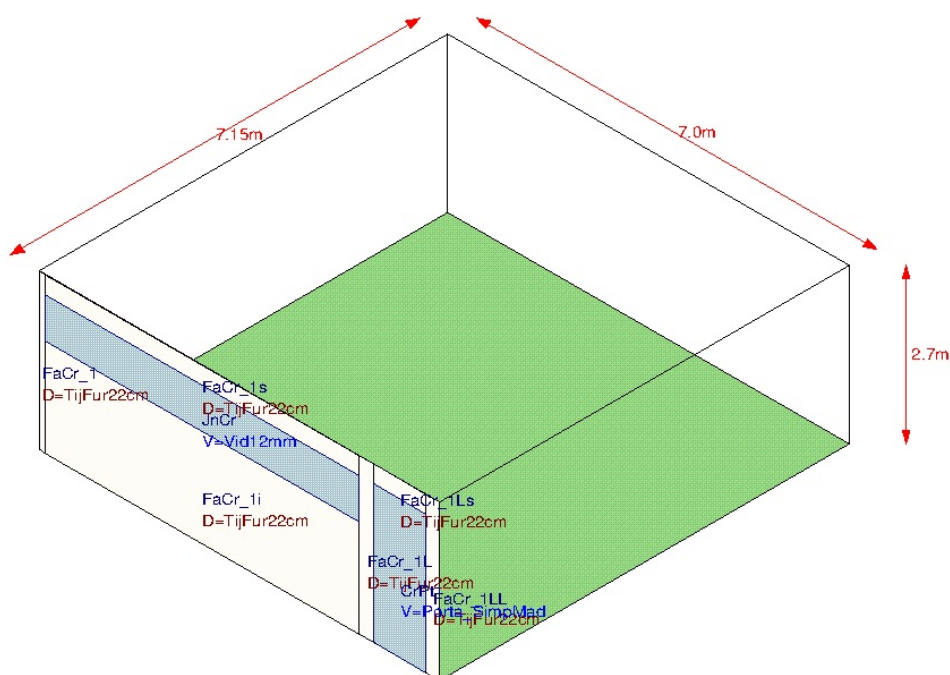


Figura 3.15: Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando a fachada interior da sala de aulas, em contacto com a zona de circulação de acesso

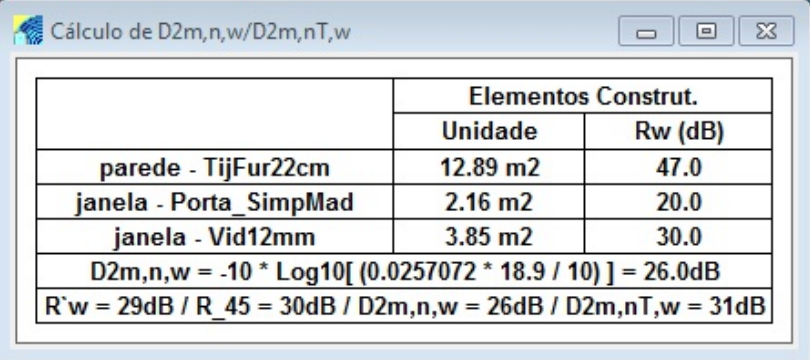
Os elementos construtivos considerados foram os seguintes:

Paredes: De alvenaria de tijolo furado $R_w = 47\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);

Envidraçados: Vidro Simples, fixo, de 12mm de espessura, $R_w = 30\text{dB}$ [52];

Porta: Em madeira com dimensões correntes [45]³.

Apresentam-se na figura 3.16 os resultados obtidos, verificando-se assim que o valor obtido para o índice de isolamento a sons de condução aérea $R'_w = 29\text{dB}$.



	Elementos Construt.	
	Unidade	Rw (dB)
parede - TijFur22cm	12.89 m2	47.0
janela - Porta_SimpMad	2.16 m2	20.0
janela - Vid12mm	3.85 m2	30.0
$D_{2m,n,w} = -10 * \text{Log}_{10} [(0.0257072 * 18.9 / 10)] = 26.0\text{dB}$		
$R'_w = 29\text{dB} / R_{45} = 30\text{dB} / D_{2m,n,w} = 26\text{dB} / D_{2m,nT,w} = 31\text{dB}$		

Figura 3.16: Tabela obtida a partir do programa CAEd, contendo a síntese do cálculo do isolamento sonoro da fachada

3.2.4 Cálculo do parâmetro $D_{2m,nT,w}$

Tendo em atenção as dimensões interiores da sala de aula bem como os elementos construtivos preconizados para os elementos da envolvente [figura 3.17], foi efectuado o cálculo do índice de isolamento padronizado $D_{2m,nT,w}$ da fachada da sala de aulas.

Os elementos construtivos considerados foram os seguintes:

Paredes: De alvenaria de tijolo furado $R_w = 47\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes) - Coeficiente $C/C_{Tr} = -1\text{dB}/-3\text{dB}$: os valores considerados referem-se a uma parede semelhante na base de dados do programa Acoubat [58];

Envidraçados: Vidro duplo, 4(6)6 com vedação de frincha, $R_w = 34\text{dB}$, Coeficiente $C/C_{Tr} = -1\text{dB}/-4\text{dB}$ [52].

O cálculo de $D_{2m,nT,w}$ é realizado, pelo programa CAEd, com base na equação (1.36), página 46, nos termos da Norma EN 12354-3. Porém, convém esclarecer que esta equação diz respeito ao parâmetro $D_{2m,nT}$ que pressupõe um cálculo no domínio da frequência, devendo a ponderação do valor único ser realizada posteriormente com base na norma ISO 717-1.

³Os valores de desempenho, de diferentes parâmetros acústicos, existentes na base de dados do programa CAEd, foram coligidos pelo Eng. Luís Santos Lopes, especialista em Acústica de reconhecida experiência. Segundo entrevista realizada com o próprio baseiam-se sempre em resultados obtidos a partir de ensaios

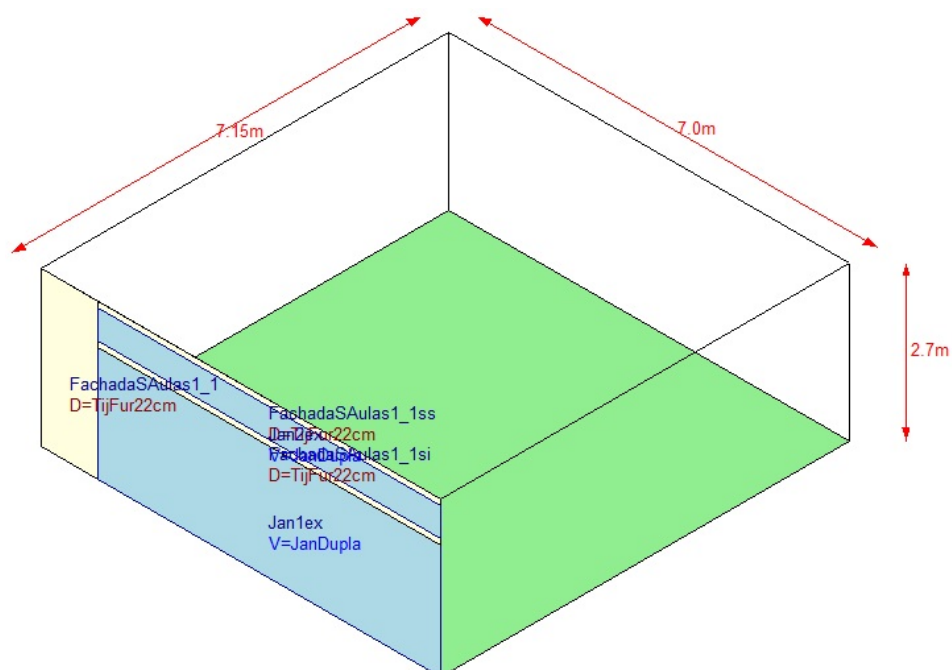


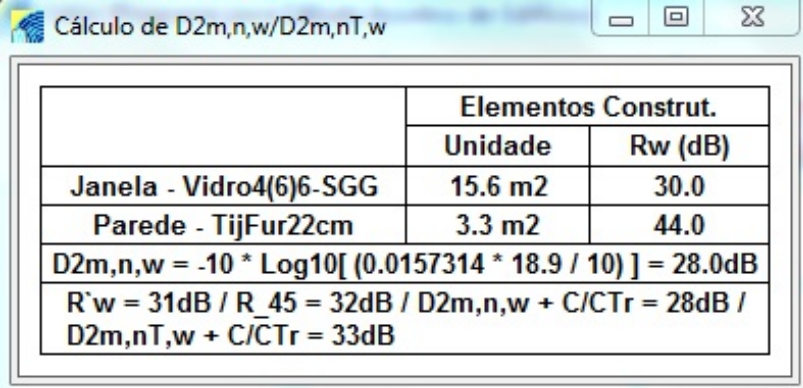
Figura 3.17: Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando a fachada exterior da sala de aulas

Para efeitos de padronização, considerou-se um tempo de reverberação de referência $T_o = 0,77$ segundos em virtude de, nos termos do RRAE, este ser o valor máximo preconizado para o tempo de reverberação T_R da sala de aulas em estudo. O valor assim obtido contribui para uma maior segurança de desempenho do parâmetro em apreço.

O cálculo de R'_w é realizado, pelo programa CAEd, com base na equação (1.35) (página 45), sendo utilizada a simplificação anteriormente referida respeitante à ponderação. Outra simplificação diz respeito ao facto de não terem sido aqui consideradas transmissões marginais dado que, nos termos da norma EN 12354-3, estas são normalmente negligenciáveis.

O programa CAEd possibilita também a introdução de elementos de fachadas (equação (1.37), página 46) e de elementos de pequenas dimensões (equação (1.38), página 46).

Apresentam-se na figura 3.18 os resultados do cálculo realizado com o programa CAEd.



	Elementos Construt.	
	Unidade	Rw (dB)
Janela - Vidro4(6)6-SGG	15.6 m2	30.0
Parede - TijFur22cm	3.3 m2	44.0
$D_{2m,n,w} = -10 * \text{Log}_{10} [(0.0157314 * 18.9 / 10)] = 28.0\text{dB}$		
$R'w = 31\text{dB} / R_{45} = 32\text{dB} / D_{2m,n,w} + C/CTr = 28\text{dB} / D_{2m,nT,w} + C/CTr = 33\text{dB}$		

Figura 3.18: Imagem obtida a partir do programa CAEd, tabela de resultados obtidos para o cálculo do isolamento sonoro padronizado entre a fachada exterior (emissão) e a sala de aulas (recepção) - $D_{2m,nT,w}$. aos valores de R_w apresentados já se encontra somado o termo de adaptação do espectro C_{Tr} , em virtude de esta fachada possuir uma percentagem de área translúcida superior a 60%

Verifica-se, assim, que a solução construtiva preconizada cumpre as exigências regulamentares aplicáveis, designadamente o artigo 7º alínea a), do número 1, do RRAE, dado que o valor obtido para $D_{2m,nT,w}$, é de 33dB, o qual é superior ao mínimo regulamentar de 28dB, admitindo que se trata de uma zona sensível⁴.

3.2.5 Cálculo do parâmetro $D_{nT,w}$

Conforme se referiu anteriormente existem três casos distintos que serão objecto de verificação regulamentar do nível de isolamento sonoro padronizado, a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, das salas de aulas:

- par de espaços (emissão/recepção), constituído por salas de aula, sendo a emissão sobrejacente à recepção;
- par de espaços (emissão/recepção), constituído por salas de aula adjacentes; e
- par de espaços (emissão/recepção) adjacentes, constituído por uma área de circulação (emissão) e uma sala de aula (recepção).

⁴Nos termos do Regulamento Geral do Ruído zona sensível é uma *área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou escolas, hospitais ou similares...* [RGR - Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de Janeiro - artigo 3º alíneas v) e x)]. Desconhecendo-se se a área, onde se localiza a escola em avaliação, está, devidamente definida em plano municipal, como zona sensível, mas partindo do facto de só existir habitação nas áreas circundantes ao edifício escolar em estudo, admitiu-se este pressuposto, porém o valor obtido de $D_{2m,nT,w} = 33\text{dB}$, é também cumpridor do RRAE para o caso de se tratar de uma zona mista [RRAE - Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho - artigo 7º, número 1, alínea a)]

Salas de aula com emissão sobrejacente

Tendo em atenção as dimensões interiores da sala de aula bem como os elementos construtivos preconizados para os elementos da envolvente [figura 3.19], foi efectuado o cálculo do índice de isolamento sonoro padronizado a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, entre um par de espaços de sala de aulas, sendo o espaço emissor, sobrejacente ao receptor.

Os elementos construtivos considerados foram os seguintes:

Laje do elemento separador:

- Laje de betão com 20cm de espessura $R_w = 52$ dB, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);
- Elemento duplicador constituído por um tecto falso inferior em gesso cartonado com lã mineral na caixa de ar entre a laje e a placa de gesso cartonado, $\Delta R_w = 8$ dB Valor obtido a partir da base de dados do programa ACOUBAT [58];

Elementos marginais (paredes):

- De alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, $R_w = 47$ dB, conforme cálculo pelo método elasto- dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);
- De alvenaria dupla tijolo furado $R_w = 52$ dB do total do elemento; $R_w = 40$ dB no elemento do pano interior. O valor de 40dB do pano interior foi obtido a partir da base de dados de do programa CAEd [45]. O valor de 52dB aqui apresentado relativo ao índice de isolamento sonoro da parede dupla tem por base em resultados de ensaios [54]. No entanto nos termos da norma EN 12354-1 o valor de $R_w = 52$ dB, relativo ao índice de isolamento da parede dupla, nunca é utilizado em virtude do elemento construtivo em causa, neste projecto, desempenhar sempre funções marginais e nunca de elemento separador;
- Elemento construtivo composto, correspondente à fachada exterior, constituído por área envidraçada e parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura. O valor de $R_w = 31$ dB corresponde ao cálculo efectuado com base em CAEd representado na figura 3.18.

O cálculo de $D_{nT,w}$ é realizado, pelo programa CAEd, nos termos da Norma EN 12354-1, com base nas equações mencionadas de seguida:

- Cálculo de $D_{nT,w}$ é realizado com base na equação (1.14) (página 33);
- Cálculo de R' , conforme requerido pela equação (1.14), é realizado com base na equação (1.16) (página 36);

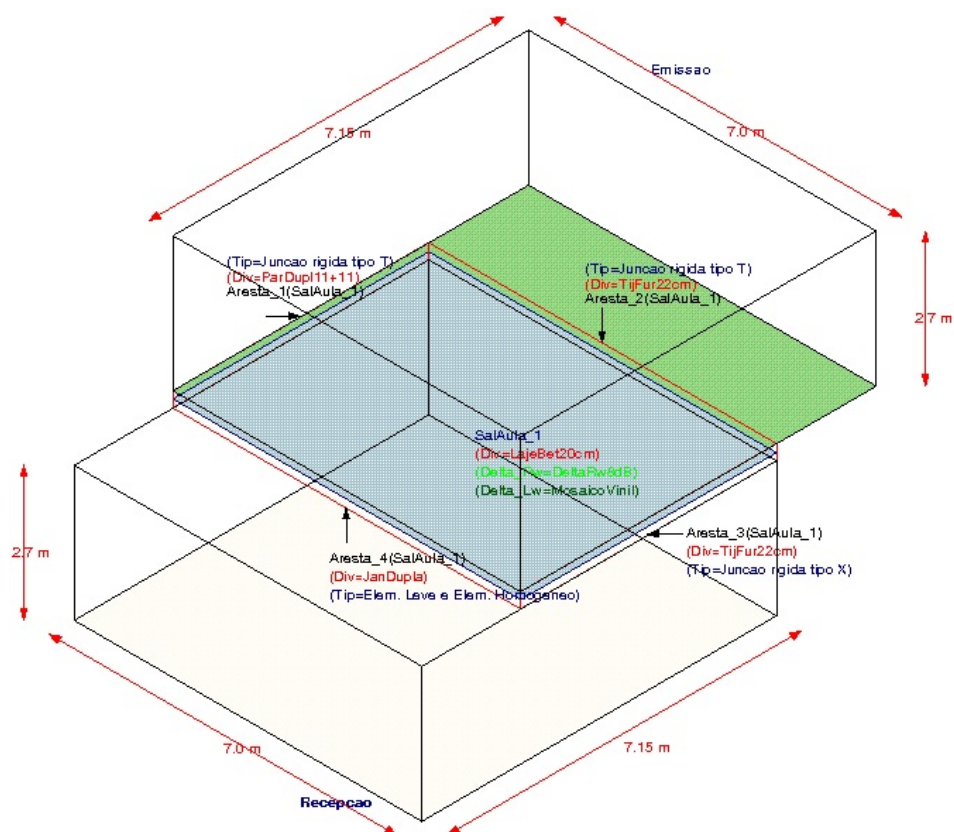


Figura 3.19: Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando um par (emissão/ recepção) de espaços de salas de aulas com emissão sobrejacente

- Cálculo dos índices de redução sonora ponderados por transmissão directa é realizado com base na equação (1.17), página 36;
- Cálculo dos índices de redução sonora ponderados R_{ij} de transmissões marginais, para cada uma das arestas, conforme requerido pela equação (1.16), é realizado com base nas equações (1.18), (1.19), (1.20), página 36);
- Cálculo dos índices de redução vibratória K_{ij} , é realizado com base nas metodologias apresentadas nas tabelas 1.7 a 1.12, página 38 e seguintes.

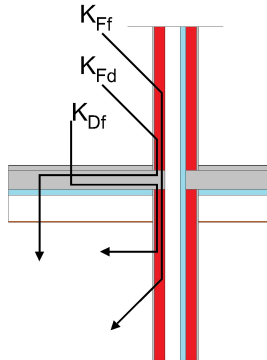
Para ilustrar o cálculo de $D_{nT,w}$ relativo ao par (emissão/recepção) de duas salas de aula com emissão sobrejacente, apresentam-se nas tabelas 3.3 a 3.6 as opções de cálculo consideradas.

Neste cálculo, baseado na Norma EN 12354-1 e realizado pelo programa CAEd, o reconhecimento dos caminhos de transmissão directa ou marginal e das equações apropriadas, bem como dos valores que tomam os diversos parâmetros, é realizado por este programa de forma automática, tirando partido das potencialidades de CAEd.

Assim, o utilizador só necessita de definir a geometria do espaço e de atribuir definições construtiva dos elementos necessários, tudo resto é processado de forma automática.

Os caminhos de transmissão marginal, bem como os respectivos cálculos, relativos à Aresta 1 [figura 3.19] encontram-se representados na tabela 3.3. Trata-se de uma ligação “alinhada” em que apenas se considera para efeitos de cálculo o contributo do pano interior da parede dupla ($R_{w,interior} = 40dB$). Considerou-se ainda tratar-se de uma ligação em “T” devido ao facto de se prever que, na caixa de ar intermédia, vão existir tubagens para arrefecimento natural (earth cooling), pelo que se verifica uma completa des-solidarização entre os dois panos que constituem a parede dupla

O cálculo de $R'_{w(aresta1)}$, realizado com base na equação (1.16), página



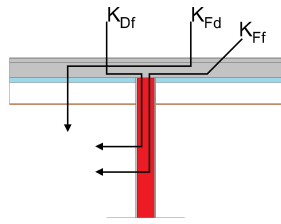
$$\begin{aligned}
 M_{(Ff)} &= \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = 0,619 \\
 K_{Ff} &= 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 = 16,629dB \\
 M_{(Df)} &= \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = -0,619 \\
 K_{Df} &= 5,7 + 5,7 \times M^2 = 7,890dB \\
 M_{(Fd)} &= \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = 0,619 \\
 K_{Fd} &= 5,7 + 5,7 \times M^2 = 7,890dB \\
 R_{Ff} &= \left(\frac{40+40}{2} \right) + 0,0 + 16,63 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{5,15} \right) = 65,08dB \\
 R_{Df} &= \left(\frac{52+40}{2} \right) + 0,0 + 7,89 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{5,15} \right) = 62,34dB \\
 R_{Fd} &= \left(\frac{40+52}{2} \right) + 8,0 + 7,89 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{5,15} \right) = 70,34dB
 \end{aligned}$$

Tabela 3.3: Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 1: Junção rígida em T com elementos homogéneos

36, é apresentado na equação (3.1), onde se realiza o cúmulo de todas as transmissões marginais desta aresta.

$$R'_{w(aresta1)} = -10 \times \lg \left[10^{-\frac{65,08}{10}} + 10^{-\frac{62,34}{10}} + 10^{-\frac{70,34}{10}} \right] = 60,06 dB \quad (3.1)$$

Os caminhos de transmissão marginal, bem como os respectivos cálculos, relativos à Aresta 2 [figura 3.19] encontram-se representados na tabela 3.4. Trata-se de uma ligação de tipo “T voltado para a recepção” em que a contribuição da duplicação $\Delta R_w = 8\text{dB}$, relativa à placa de gesso cartonado com lã mineral na caixa de ar, apenas tem efeito no caminho R_{Fd} , conforme se pode verificar na mesma tabela.



$$M_{(Ff)} = \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = -0,315$$

$$K_{Ff} = 5,7 + 5,7 \times M^2 = 6,266\text{dB}$$

$$M_{(Df)} = \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = -0,315$$

$$K_{Df} = 5,7 + 5,7 \times M^2 = 6,266\text{dB}$$

$$M_{(Fd)} = \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = -0,315$$

$$K_{Fd} = 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 = 1,822\text{dB}$$

$$R_{Ff} = \left(\frac{52+47}{2} \right) + 0,0 + 6,266 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{7} \right) = 62,884\text{dB}$$

$$R_{Df} = \left(\frac{52+47}{2} \right) + 0,0 + 6,266 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{7} \right) = 62,884\text{dB}$$

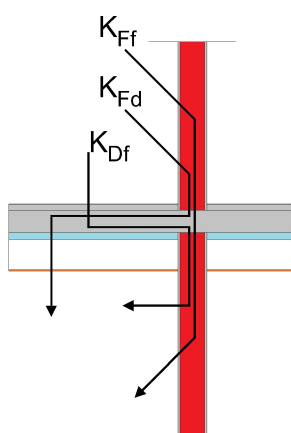
$$R_{Fd} = \left(\frac{52+52}{2} \right) + 8,0 + 1,822 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{7} \right) = 68,941\text{dB}$$

Tabela 3.4: Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 2: Junção rígida em T (voltado para a recepção) com elementos homogêneos

O cálculo de $R'_{w(\text{aresta2})}$, realizado com base na equação (1.16), página 36, é apresentado na equação (3.2), onde se realiza o cúmulo de todas as transmissões marginais desta aresta.

$$R'_{w(\text{aresta2})} = -10 \times \lg \left[10^{-\frac{62,88}{10}} + 10^{-\frac{62,88}{10}} + 10^{-\frac{68,94}{10}} \right] = 59,37\text{dB} \quad (3.2)$$

Os caminhos de transmissão marginal, bem como os respectivos cálculos, relativos à Aresta 3 [figura 3.19] encontram-se representados na tabela 3.5. Trata-se de uma ligação “alinhada” em que a contribuição da duplicação $\Delta R_w = 8\text{dB}$, relativa à placa de gesso cartonado com lã mineral na caixa de ar, apenas tem efeito nos caminhos R_{Fd} , conforme se pode verificar na mesma tabela.



$$M_{(Ff)} = \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = 0,315$$

$$70 K_{Ff} = 8,7 + 17,1 \times M \times 5,7 \times M^2 = 14,655\text{dB}$$

$$M_{(Df)} = \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = -0,315$$

$$K_{Df} = 8,7 + 5,7 \times M^2 = 9,266\text{dB}$$

$$M_{(Fd)} = \lg \left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i} \right) = 0,315$$

$$K_{Fd} = 8,7 + 5,7 \times M^2 = 9,266\text{dB}$$

$$R_{Ff} = \left(\frac{47+47}{2} \right) + 0,0 + 14,66 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{5,15} \right) = 70,11\text{dB}$$

$$R_{Df} = \left(\frac{52+47}{2} \right) + 0,0 + 9,27 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{5,15} \right) = 67,22\text{dB}$$

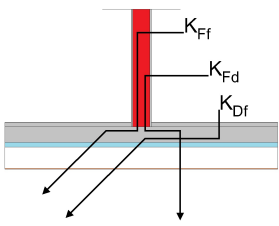
$$R_{Fd} = \left(\frac{47+52}{2} \right) + 8,0 + 9,27 + 10 \times \lg \left(\frac{36,05}{5,15} \right) = 75,22\text{dB}$$

Tabela 3.5: Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 3: Junção rígida em X com elementos homogêneos

O cálculo de $R'_{w(\text{aresta3})}$, realizado com base na equação (1.16), página 36, é apresentado na equação (3.3), onde se realiza o cúmulo de todas as transmissões marginais desta aresta.

$$R'_{w(\text{aresta3})} = -10 \times \lg \left[10^{-\frac{70,11}{10}} + 10^{-\frac{67,22}{10}} + 10^{-\frac{75,22}{10}} \right] = 64,98\text{dB} \quad (3.3)$$

Os caminhos de transmissão marginal, bem como os respectivos cálculos, relativos à Aresta 4 [figura 3.19] encontram-se representados na tabela 3.6. Trata-se de uma ligação de tipo “T voltado para a recepção” em que a contribuição da duplicação $\Delta R_w = 8dB$, relativa à placa de gesso cartonado com lã mineral na caixa de ar, tem efeito em todos os caminhos de transmissão marginal, conforme se pode verificar na mesma tabela.



$$\begin{aligned}
 M_{(Ff)} &= \lg\left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i}\right) = 0,959 \\
 K_{Ff} &= 10 + 10 \times M = 19,586 \text{ dB} \\
 M_{(Df)} &= \lg\left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i}\right) = -9,09 \\
 K_{Df} &= 0 \text{ dB} \\
 M_{(Fd)} &= \lg\left(\frac{Massa_{\perp i}}{Massa_i}\right) = 0,959 \\
 K_{Ff} &= 10 + 10 \times M = 19,586 \text{ dB} \\
 R_{Ff} &= \left(\frac{52+31}{2}\right) + 8,0 + 19,59 + 10 \times \lg\left(\frac{36,05}{7}\right) = 76,20 \text{ dB} \\
 R_{Df} &= \left(\frac{52+52}{2}\right) + 8,0 + 0,0 + 10 \times \lg\left(\frac{36,05}{7}\right) = 67,12 \text{ dB} \\
 R_{Fd} &= \left(\frac{31+52}{2}\right) + 8,0 + 19,59 + 10 \times \lg\left(\frac{36,05}{7}\right) = 76,20 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Tabela 3.6: Par de salas com emissão sobrejacente - Aresta 4: Junção em **T (voltado para a emissão)** de tipo ligação entre elemento Leve e elemento homogêneo. Considera-se que o envidraçado exterior da sala de aulas é um elemento leve

O cálculo de $R'_{w(aresta4)}$, realizado com base na equação (1.16), página 36, é apresentado na equação (3.4), onde se realiza o cúmulo de todas as transmissões marginais desta aresta.

$$R'_{w(aresta4)} = -10 \times \lg \left[10^{-\frac{76,20}{10}} + 10^{-\frac{76,20}{10}} + 10^{-\frac{67,12}{10}} \right] = 66,16 \text{ dB} \quad (3.4)$$

Finalmente, calcula-se o o valor de R'_{w} , correspondente ao cúmulo de todas as transmissões directa e marginais, das quatro arestas do elemento separador, bem como a ponderação e padronizado do índice de isolamento a sons de condução aérea que se verifica entre os dois espaços em avaliação.

Considera-se que a transmissão directa = 60dB, por aplicação da equação 1.17, página 36:

$$\begin{aligned}
 R'_{d,w} &= 52dB(R_w \text{ da laje de betão}) + \\
 &+ 8dB(\Delta R_w \text{ do elemento duplicador}) = 60dB
 \end{aligned}$$

Assim, teremos:

$$\begin{aligned}
 R'_{w} &= -10 \times \lg \left[10^{-\frac{60,0}{10}} + 10^{-\frac{60,06}{10}} + 10^{-\frac{59,37}{10}} + 10^{-\frac{64,98}{10}} + 10^{-\frac{66,16}{10}} \right] \\
 &= 54,31 \text{ dB} \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

Finalmente podemos calcular o parâmetro $D_{nT,w}$ com base na equação (1.14) [página 33], conforme se apresenta na equação (3.6).

$$\begin{aligned} D_{nT,w} &= 54,31dB + 10 \times \lg \left[\frac{0,16 \times (V = 135,14m^3)}{(T_o = 0,77s) \times (S_s = 36,05m^2)} \right] \\ &= 54 + 10 \times \lg \left[\frac{0,16 \times 135,14}{36,05 \times 0,77} \right] = 53 \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Onde:

T_o = Tempo de reverberação de referência foi obtido pela seguinte equação, $0,15 \times \sqrt[3]{Volume} = 0,77s$. Em virtude de existir uma imposição regulamentar para o tempo de reverberação do espaço de recepção utiliza-se como tempo de reverberação de referência o valor máximo imposto na mesma norma

Verifica-se, assim, que a solução construtiva preconizada cumpre as exigências regulamentares aplicáveis, designadamente o artigo 7º alínea b), do número 1, do RRAE, dado que o valor obtido para $D_{nT,w} = 53dB$, é superior ao mínimo regulamentar de 45dB, conforme definido no quadro II do anexo.

Efectuando o mesmo cálculo com o programa CAEd para o mesmo par (emissão/recepção), no entanto introduzindo a única pequena diferença de retirar o elemento duplicador horizontal $\Delta R_w = 8dB$, projectado para a face inferior do elemento separador, verifica-se que o mesmo par (emissão/recepção), continua a cumprir a legislação dado que para este caso o valor obtido para $D_{nT,w} = 48dB$, continua a ser superior ao mínimo regulamentar.

Duas salas de aulas adjacentes

Tendo em atenção as dimensões interiores da sala de aula bem como os elementos construtivos preconizados para os elementos da envolvente [figura 3.20], foi efectuado o cálculo do índice de isolamento sonoro padronizado a sons de condução aérea entre um par de espaços de sala de aulas, sendo o espaço emissor, sobrejacente ao receptor.

Os elementos construtivos considerados foram os seguintes:

Parede do elemento separador:

- De alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, $R_w = 47dB$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);

Paredes e Lajes nas arestas:

- De alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, $R_w = 47dB$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);

- De alvenaria dupla tijolo furado $R_w = 45\text{dB}$ do total do elemento; $R_w = 40\text{dB}$ no elemento do pano interior, com base em elementos de bibliografia [54];
- Elemento construtivo composto, correspondente à fachada exterior, constituído por área envidraçada e parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura. O valor de $R_w = 31\text{dB}$ corresponde ao cálculo efectuado com base em CAEd representado na figura 3.18,
- Laje de betão com 20cm de espessura $R_w = 52\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);
- Elemento duplicador constituído por um tecto falso inferior em gesso cartonado com lã mineral na caixa de ar entre a laje e a placa de gesso cartonado, $\Delta R_w = 8\text{dB}$.

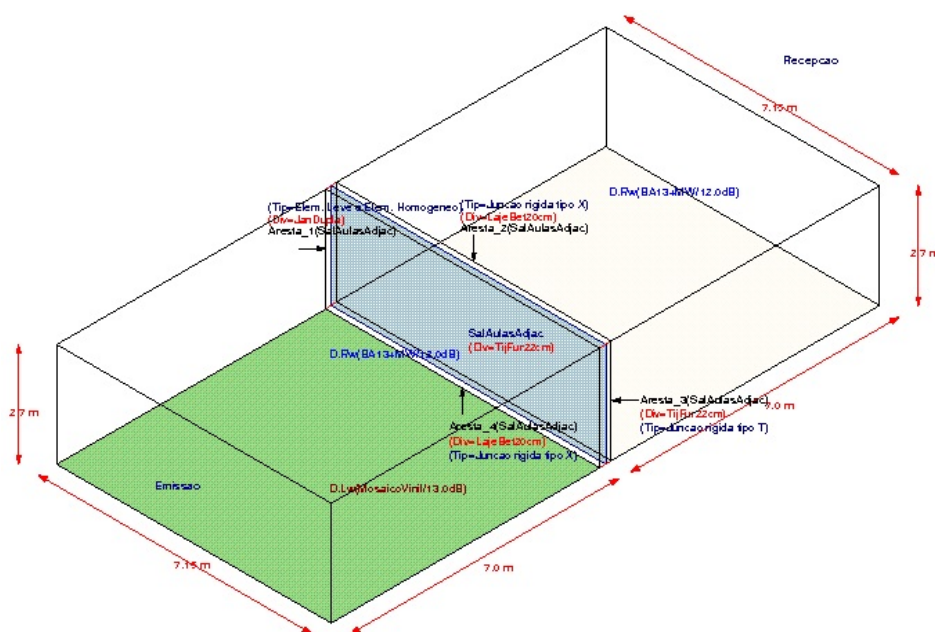


Figura 3.20: Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando um par (emissão / recepção) de espaços de salas de aulas Adjacentes

Em virtude de já se ter apresentado um exemplo que cobre todas as possibilidades de cálculo que foram utilizadas neste par de espaços, não se afigura necessário repetir tal procedimento, pelo que neste caso será apresentada uma tabela sintética com os valores dos seguintes parâmetros: índice de redução sonora ponderado R_w , coeficientes vibratórios K_{ij} e cúmulo dos coeficientes R_{ij} , ou seja $R_{w,marginal}$ de cada uma das arestas. A referida síntese de resultados encontra-se apresentada na tabela 3.7.

Designação	$R_w + [\Delta R_{w,em}; \Delta R_{w,r}]$ (dB)	$R_{w,marg.}$ (dB)	Tipo de Junção	K_{Ff} (dB)	K_{Fd} (dB)	K_{Df} (dB)
Aresta 1	31 + [0; 0]	58,62	Leve/Homog.	22,87	16,4	16,4
Aresta 2	52 + [8; 8]	67,45	J. Ríg. X	3,88	9,03	9,03
Aresta 3	48 + [0; 0]	56,47	J. Ríg. T	5,70	5,70	5,70
Aresta 4	52 + [0; 0]	57,12	J.Ríg. X	3,88	9,27	9,27

Tabela 3.7: Síntese dos resultados - de $D_{nT,w}$ relativo a um par de espaços (emissão/recepção): duas salas de aulas adjacentes

Os valores calculados por CAEd, para o par de espaços (emissão/recepção), utilizando a metodologia já descrita, foram os seguintes:

$$R'_w = 46\text{dB};$$

$$D_{n,w} = 43\text{dB};$$

$$D_{nT,w} = 48\text{dB};$$

Verifica-se, assim, que a solução construtiva preconizada cumpre as exigências regulamentares aplicáveis, designadamente o artigo 7º alínea b), do número 1, do RRAE, dado que o valor obtido para $D_{nT,w} = 48\text{dB}$, é superior ao mínimo regulamentar de 45dB, conforme definido no quadro II do anexo, para o isolamento entre duas salas de aulas. Neste caso o facto de se retirar a duplicação não produz alterações no valor de $D_{nT,w}$.

Circulação adjacente a sala de aulas

Tendo em atenção as dimensões interiores da sala de aula e as suas ligações com o corredor de circulação bem como os elementos construtivos preconizados para os elementos da envolvente [figura 3.21], foi efectuado o cálculo do índice de isolamento sonoro padronizado a sons de condução aérea entre um par de espaços de circulação comum (emissão) e uma sala de aulas (recepção), sendo estes espaços adjacentes entre si. Apresenta-se na Tabela 3.8 síntese de resultados obtidos

Os elementos construtivos considerados foram os seguintes:

Parede do elemento separador:

- Elemento composto constituído por áreas envidraçadas e áreas de parede de tijolo, cujo índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea $R_w = 29\text{dB}$, conforme cálculo realizado no sub-capítulo 3.2.3, página 111.

Paredes e lajes de elementos marginais:

- De alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, $R_w = 47\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);

- De alvenaria dupla tijolo furado (11+25+11) com lã mineral na caixa de ar $R_w = 52\text{dB}$ do total do elemento; $R_w = 40\text{dB}$ no elemento do pano interior [54];
- Laje de betão com 20cm de espessura $R_w = 52\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);
- Elemento duplicador constituído por um tecto falso inferior em gesso cartonado com lã mineral na caixa de ar entre a laje e a placa de gesso cartonado, $\Delta R_w = 8\text{dB}$, aplicado nos tectos dos compartimentos de emissão e de recepção.

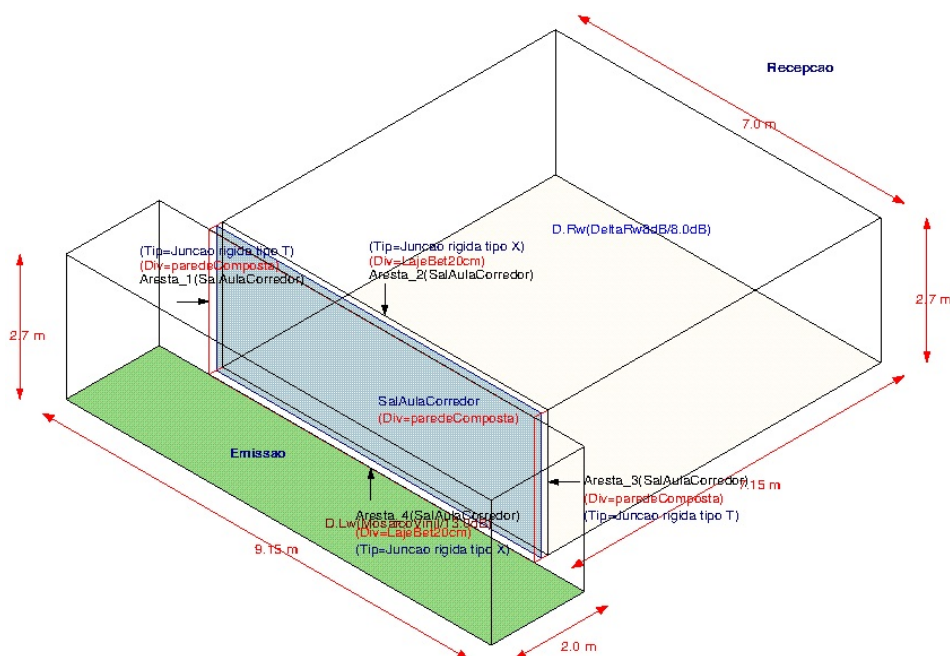


Figura 3.21: Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando um par de espaços adjacentes, constituído por uma zona de circulação (emissão) e uma sala de aulas (recepção)

Designação	$R_w + [\Delta R_{w,em}; \Delta R_{w,r}]$ (dB)	$R_{w,marg.}$ (dB)	Tipo de Junção	K_{Ff} (dB)	K_{Fd} (dB)	K_{Df} (dB)
Aresta 1	29 + [0; 0]	38,38	J. Ríg. T	5,70	5,70	5,70
Aresta 2	52 + [0; 8]	53,43	J. Ríg. X	3,33	9,42	9,42
Aresta 3	29 + [0; 0]	38,38	J. Ríg. T	5,70	5,70	5,70
Aresta 4	52 + [0; 0]	50,64	J.Ríg. X	4,35	9,15	9,15

Tabela 3.8: Síntese dos resultados de $D_{nT,w}$ relativo a um par de espaços (emissão/recepção): “zona de circulação/sala de aulas”

Os valores calculados por CAEd, para o isolamento sonoro padronizado do par de espaços (emissão/recepção) corredor de circulação/ sala de aulas,

foram os seguintes:

$$R'_w = 28\text{dB};$$

$$D_{n,w} = 25\text{dB};$$

$$D_{nT,w} = 30\text{dB};$$

Verifica-se, assim, que a solução construtiva preconizada cumpre as exigências regulamentares aplicáveis, designadamente o artigo 7º alínea b), do número 1, e Anexo II do RRAE, dado que o valor obtido para $D_{nT,w} = 30\text{dB}$, é igual ao mínimo regulamentar de 30dB para elementos de separação entre circulações e salas de aulas.

3.2.6 Cálculo do parâmetro $L'_{nT,w}$

Conforme se referiu anteriormente existem dois casos distintos que serão objecto de verificação regulamentar do nível de ruído padronizado, a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, das salas de aulas:

- par de espaços (emissão/recepção), constituído por duas salas de aula, sendo a emissão sobrejacente à recepção; e
- par de espaços (emissão/recepção), constituído por salas de aula adjacentes.

O cálculo de $L'_{nT,w}$ é realizado, pelo programa CAEd, nos termos da Norma EN 12354-2, com base nas equações mencionadas de seguida:

- Cálculo de $L'_{nT,w}$ é realizado com base na equação (1.25) (página 41). Porém, convém esclarecer que esta equação diz respeito ao parâmetro L'_{nT} que pressupõe um cálculo no domínio da frequência, devendo a ponderação para um valor único ser realizada posteriormente com base na norma ISO 717-2;
- Cálculo de L'_n , conforme requerido pela equação (1.25), é realizado com base na equação (1.26) e (1.27) (página 42 e seguintes), À semelhança do que foi referido no ponto anterior, CAEd utiliza o parâmetro $L_{n,w}$ - em vez de L_n ;
- Cálculo dos níveis de ruído por transmissão directa de sons de percussão é realizado com base na equação (1.28) (página 42);
- Cálculo dos níveis de ruído devidos a transmissões directa relativos de sons de percussão é realizado com base nas equações (1.29) a (1.32) (páginas 43 e seguintes);

Salas de aulas com emissão sobrejacente

Tendo em atenção as dimensões interiores da sala de aula bem como os elementos construtivos preconizados para os elementos da envolvente [figura 3.19], foi efectuado o cálculo do nível de ruído padronizado de sons de percussão entre dois espaços de sala de aulas, sendo o espaço emissor, sobrejacente ao emissor.

Os elementos construtivos considerados são os já apresentados quando se tratou do isolamento sonoro do mesmo par de espaços a sons de condução aérea. Sendo apenas necessário referir quais os valores considerados para o índice de redução sonora ponderado a sons de percussão $L_{n,w}$ e o índice de melhoria a sons de percussão $\Delta L_{n,w}$ do elemento resiliente ou revestimento de piso:

Laje do elemento separador:

- Laje de betão com 20cm de espessura $L_{n,w} = 76$ dB, conforme cálculo pelo Josse apresentado anteriormente (página 110 e seguintes)
- Revestimento de piso em material de tipo mosaico vinílico ou linóleo, $\Delta L_w = 13$ dB [45].

Apresenta-se na tabela 3.9, bem como na equação (3.7), os valores considerados no cálculo de $L'_{n,w}$, o qual foi realizado com base nas equações (1.28) a (1.32) (página 42 e seguintes). Os $L_{n,ij}$ de cada aresta foram calculados com base na equação (1.31), página 44.

Designação caminhos	Elementos Sons Aéreos		Elementos Transmissões Marginais		
	$[R_w + \Delta R_w]$ (dB)	K_{Df} (dB)	l_{ij} (dB)	$10 \cdot \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i}}$ (m)	$L_{n,ij}$ (dB)
Aresta 1	[45 + 0]	7,89	5,15	-9,88	51,23
Aresta 2	[47 + 0]	6,27	7,0	-8,54	50,69
Aresta 3	[47 + 0]	9,27	5,15	-9,88	46,36
Aresta 4	[31 + 0]	0,0	-7,0	-8,54	46,46

Tabela 3.9: Síntese dos resultados - cálculo de $L'_{nT,w}$ do par de espaços com emissão sobrejacente

Ainda se apresenta na equação (3.7), o cúmulo de todas as transmissões directa e marginais relativa ao ruído de percussão do par de espaços (emissão/recepção) de duas salas de aula com emissão sobrejacente à recepção.

$$L'_{n,w} = 10 \times \lg \left[10^{\frac{55}{10}} + 10^{\frac{51,23}{10}} + 10^{\frac{50,69}{10}} + 10^{\frac{46,36}{10}} + 10^{\frac{46,46}{10}} \right] = 58,15 \text{ dB} \quad (3.7)$$

O cálculo de $L'_{nT,w}$ apresenta-se na equação (3.8).

$$L'_{nT,w} = 58 - 10 \times \lg \left[\frac{0,016 \times 135,14}{0,77} \right] = 54 \text{ dB} \quad (3.8)$$

Verifica-se, assim, que a solução construtiva preconizada cumpre as exigências regulamentares aplicáveis, designadamente o artigo 7º alínea c), do número 1, parágrafo i), dado que o valor obtido para $L'_{nT,w} = 54\text{dB}$, é inferior ao máximo regulamentar de 65 dB para salas de aula como compartimentos emissores.

Efectuando o mesmo cálculo com o programa CAEd para o mesmo par (emissão/recepção), no entanto introduzindo a única pequena diferença de retirar o elemento duplicador horizontal $\Delta R_w = 8\text{dB}$, projectado para a face inferior do elemento separador, verifica-se que o mesmo par (emissão/recepção), continua a cumprir a legislação dado que para este caso o valor obtido para $L'_{nT,w} = 60\text{dB}$ que continua a ser inferior ao máximo regulamentar de 65dB.

Salas de aulas adjacentes

Tendo em atenção as dimensões interiores da sala de aula bem como os elementos construtivos preconizados para os elementos da envolvente [figura 3.20], foi efectuado o cálculo do nível de ruído padronizado de sons de percussão entre dois espaços de sala de aulas, de espaços adjacente.

Os elementos construtivos considerados foram os já apresentados quando se tratou do isolamento sonoro do mesmo par de espaços a sons de condução aérea. Sendo apenas necessário referir os valores considerados:

Parede do elemento separador:

- Parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, $R_w = 47\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);

Elementos Marginais:

- Laje de betão com 20cm de espessura $L_{n,w} = 76\text{dB}$, conforme cálculo pelo Josse apresentado anteriormente (página 110 e seguintes)
- Revestimento de piso em material de tipo mosaico vínilico ou linóleo, $\Delta L_w = 13\text{dB}$ [45];
- Parede de alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, $R_w = 47\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);
- Parede de alvenaria dupla tijolo furado (11+25+11) com lã mineral na caixa de ar $R_w = 52\text{dB}$ do total do elemento; $R_w = 40\text{dB}$ no elemento do pano interior, [54];

conforme se poderá verificar na figura 1.8 da página 42, no cálculo do nível de ruído de sons de percussão $L'_{nT,w}$ deve apenas considerar-se dois caminhos de transmissão:

- Um caminho laje/laje sendo a primeira laje a do compartimento de emissão e a segunda a do compartimento de recepção;
- Um caminho laje/parede sendo a laje a do compartimento de emissão e a parede a do elemento separador dos espaços.

O cálculo dos $L_{n,ij}$ foi realizado com base na equação (1.31) (página 44), apresentando-se nas equações 3.9 e 3.10 a sua aplicação ao caso de estudo concreto relativo ao par de espaços de salas de aulas adjacentes.

$$L_{n,(Laje/Laje)} = 76 - 13 + \left[\frac{52 - 52}{2} \right] - 3,88 + 10 \times \lg \left[\frac{7,15}{50,05} \right] = 50,67 \text{ dB} \quad (3.9)$$

$$L_{n,(Laje/Parede)} = 76 - 13 + \left[\frac{52 - 47}{2} \right] - 9,27 + 10 \times \lg \left[\frac{7,15}{50,05} \right] = 47,78 \text{ dB} \quad (3.10)$$

O cúmulo destas duas transmissões marginais obteve-se da seguinte forma:

$$L'_{n,w} = 10 \times \lg \left[10^{\frac{50,67}{10}} + 10^{\frac{47,78}{10}} \right] = 52,47 \text{ dB}$$

O cálculo de $L'_{nT,w}$ apresenta-se na equação (3.11).

$$L'_{nT,w} = 52 - 10 \times \lg \left[\frac{0,016 \times 135,14}{0,77} \right] = 47,99 \text{ dB} \quad (3.11)$$

Verifica-se, assim, que a solução construtiva preconizada cumpre as exigências regulamentares aplicáveis, designadamente o artigo 7º alínea c), do número 1, parágrafo ii), dado que o valor obtido para $L'_{nT,w} = 48\text{dB}$, é inferior ao máximo regulamentar de 65dB para salas de aulas como compartimentos emissores.

Circulação adjacente a sala de aulas

Tendo em atenção as dimensões interiores da sala de aula e as suas ligações com o corredor de circulação bem como os elementos construtivos preconizados para os elementos da envolvente [figura 3.21] foi efectuado o cálculo do nível de ruído padronizado a sons de percussão entre dois espaços adjacentes, sendo o espaço emissor uma zona de circulação, e o espaço receptor uma sala de aulas.

Os elementos construtivos considerados foram os já apresentados quando se tratou do isolamento sonoro do mesmo par de espaços a sons de condução aérea. Sendo apenas necessário referir os valores considerados:

Parede do elemento separador:

- Elemento composto constituído por áreas envidraçadas e áreas de parede de tijolo, cujo índice de redução sonora ponderado a sons de condução aérea $R_w = 29\text{dB}$, conforme cálculo realizado no sub-capítulo 3.2.3, página 111.

Elementos marginais (paredes e lajes):

- De alvenaria de tijolo furado com 22cm de espessura, $R_w = 47\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto-dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);
- De alvenaria dupla tijolo furado (11+25+11) com Lã mineral na caixa de ar $R_w = 52\text{dB}$ do total do elemento; $R_w = 40\text{dB}$ no elemento do pano interior [54];
- Laje de betão com 20cm de espessura $R_w = 52\text{dB}$, conforme cálculo pelo método elasto dinâmico apresentado anteriormente (página 107 e seguintes);
- Elemento duplicador constituído por um tecto falso inferior em gesso cartonado com lã mineral na caixa de ar entre a laje e a placa de gesso cartonado, $\Delta R_w = 8\text{dB}$, aplicado nos tectos dos compartimentos de emissão e de recepção.

conforme se poderá verificar na figura 1.8 da página 42, no cálculo do nível de ruído padronizado a sons de percussão $L'_{nT,w}$ devem apenas considerar-se dois caminhos de transmissão:

- Um caminho laje/laje sendo a primeira laje a do compartimento de emissão e a segunda a do compartimento de recepção;
- Um caminho laje/parede sendo a laje a do compartimento de emissão e a parede a do elemento separador dos espaços.

O cálculo dos $L_{n,ij}$ foi realizado com base na equação (1.31) (página 44 e seguintes), apresentando-se nas equações 3.12 e 3.13 a sua aplicação ao caso de estudo concreto relativo ao par de espaços adjacentes de circulação com sala de aulas.

$$L_{n,(Laje/Laje)} = 76 - 13 + \left[\frac{52 - 52}{2} \right] - 3,33 + 10 \times \lg \left[\frac{7}{18,3} \right] = 55,50 \text{ dB} \quad (3.12)$$

$$L_{n,(Laje/Parede)} = 76 - 13 + \left[\frac{52 - 29}{2} \right] - 9,42 + 10 \times \lg \left[\frac{7}{18,3} \right] = 60,90 \text{ dB} \quad (3.13)$$

O cúmulo destas duas transmissões marginais obteve-se da seguinte forma:

$$L'_{n,w} = 10 \times \lg \left[10^{\frac{54,50}{10}} + 10^{\frac{59,90}{10}} \right] = 62,00 \text{ dB}$$

O cálculo de $L'_{nT,w}$ apresenta-se na equação (3.14).

$$L'_{nT,w} = 62 - 10 \times \lg \left[\frac{0,016 \times 135,14}{0,77} \right] = 58 \text{ dB} \quad (3.14)$$

Verifica-se, assim, que a solução construtiva preconizada cumpre as exigências regulamentares aplicáveis, designadamente o artigo 7º alínea c), do número 1, parágrafo i), dado que o valor obtido para $L'_{nT,w} = 58\text{dB}$, é inferior ao máximo regulamentar de 60dB para corredores de circulação como compartimentos emissores.

3.2.7 Cálculo do tempo de reverberação

A sala de aulas foi também modelada para efeitos de verificação do tempo de reverberação interior, bem como da sua conformidade regulamentar. Apresenta-se na figura 3.22 uma imagem dessa modelação.

Os materiais de revestimento utilizados foram os seguintes:

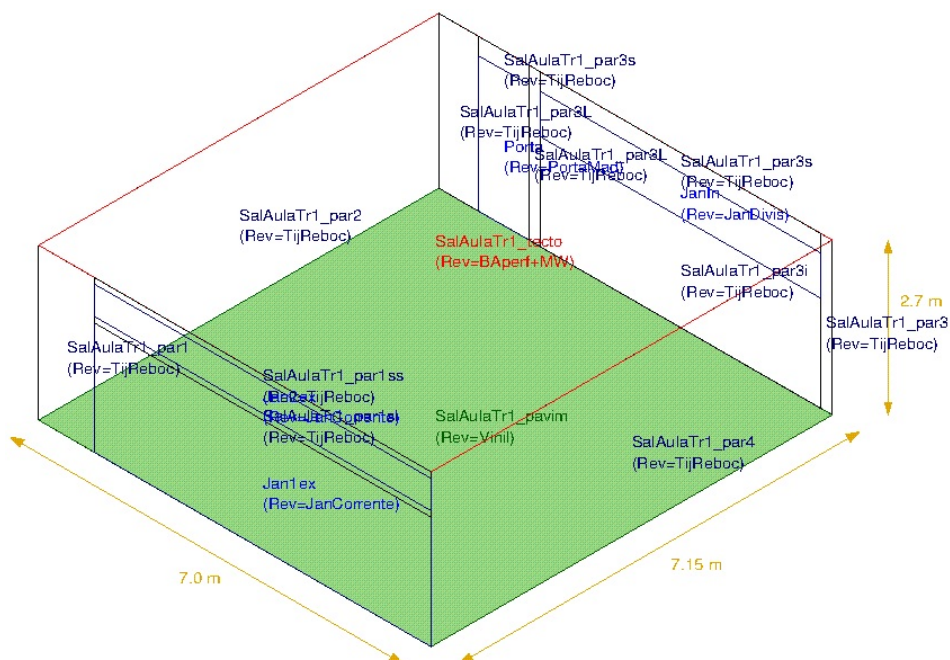


Figura 3.22: Imagem obtida a partir do programa CAEd, representando o modelo tridimensional para posterior cálculo do Tempo de reverberação

Pavimento: Ladrilhos vinílicos, borracha, linóleo, cortiça ou tacos de madeira assentes sobre suporte de betão;

Tecto: Painéis de Gesso Cartonado (BA13) com estrutura aberta de malha rectangular confinado com caixa de ar contendo lã mineral (MW);

Paredes: Rebocadas com suporte em alvenaria ou betão;

Envidraçados:

- Exteriores - Janela de vidro de dimensões correntes;
- Interiores - Pano envidraçado com funções de divisória;

Portas: Interiores de madeira maciça

Mobiliário: Carteiras escolar vazias.

Às diferentes superfícies do espaço foram atribuídos os coeficientes de absorção sonora no domínio da frequência que se apresentam na tabela 3.10 e realizado o cálculo pela fórmula de Sabine, equação (2.6), página 88. Os resultados obtidos também se encontram na tabela 3.10.

Com base numa avaliação dos coeficientes de absorção sonora apresentados na tabela 3.10 verificou-se não ser cumprida uma das condições de utilização da fórmula de Sabine referidos na página 48, dado que, no que diz respeito ao tecto e pavimento, a distribuição da absorção não cumpre a condição de uniformidade. Uma avaliação mais rigorosa poderia ser realizada com base no programa CATT-Acoustic [44], porém tal avaliação teria pouco significado em relação aos objectivos definidos para este trabalho que dizem respeito ao desenvolvimento de ferramentas que possam representar uma maior adequação cognitiva na realização de projectos de arquitectura.

Designação do revestimento	Área (m ²)	Frequências (Hz)		
		500	1000	2000
Alv. tijolo rebocado	55,75	0,01	0,02	0,02
Pavim. linóleo ou vinílico	50,05	0,03	0,03	0,03
Tecto BA13 perfor. c/ MW	50,05	0,65	0,69	0,68
Portas de madeira	2,16	0,08	0,08	0,08
Envidr. c/funções divisória	3,5	0,04	0,03	0,02
Janelas correntes	15,0	0,18	0,12	0,05
Carteira escolar vazias (Un.)	25	0,03	0,04	0,06
Tempo reverberação (s)		0,567	0,541	0,556

Tabela 3.10: Síntese dos resultados para o cálculo do tempo de reverberação da sala de aulas

De acordo com o RRAE a média aritmética do tempo de reverberação verificado para as frequências centrais (entre 500Hz e 2000Hz) do espaço de sala de aulas em estudo deve verificar a relação expressa na equação(3.15).

$$\begin{aligned}
 T_R &\leq 0,15 \times \sqrt[3]{Volume} \\
 &\leq 0,15 \times \sqrt[3]{135,135m^3} \\
 &\leq 0,77segundos
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Verifica-se assim que as soluções construtivas projectadas neste caso de estudo cumprem o RRAE dado que a média aritmética verificada de 0,55 segundos é inferior ao máximo regulamentar de 0,77 segundos.

3.2.8 Síntese de resultados do desempenho acústico

Apresenta-se na tabela 3.11 uma síntese de todos os resultados obtidos na verificação dos parâmetros aplicáveis do RRAE.

Parâmetro	Espaços	Valores Obtidos	RRAE	
			exigência	artigo 7º, nº 1
$D_{2m,nT,w} + C_{Tr}$	Fachada	33dB	≥ 28 dB	alínea a)
$D_{nT,w}$	Par sobrejacente	53dB	≥ 45 dB	alínea b) Quadro II do Anexo
	Idem sem ΔR_w	48dB	≥ 45 dB	
	Par Adjacente	48dB	≥ 45 dB	
	Circulação	30dB	≥ 30 dB	
$L'_{nT,w}$	Par sobrejacente	54dB	≤ 65 dB	alínea c); ii)
	Idem sem ΔR_w	60dB	≤ 65 dB	
	Par Adjacente	48dB	≤ 65 dB	
	Circulação	58dB	≤ 60 dB	alínea c); i)
Tempo Rev.	Sala de Aulas	0,55s	$\leq 0,77$ s	alínea d)

Tabela 3.11: Síntese dos Resultados para os parâmetros aplicáveis do RRAE

Comentário final sobre a avaliação acústica

No quadro síntese apresentado na tabela 3.11 verifica-se que todas as opções avaliadas cumprem o RRAE, sendo de salientar que a duplicação (Tecto falso inferior $\Delta R_w = 8$ dB) preconizada para o lado inferior da laje de pavimento não se afigura imprescindível dado que a sua ausência, na solução preconizada, não constitui incumprimento do RRAE. Porém, ela encontra-se avaliada, no âmbito deste trabalho, pelas seguintes razões:

- poderia ser uma boa opção de projecto, caso se pretendesse uma solução de desempenho de conforto acima dos mínimos regulamentares;
- para, no âmbito deste trabalho académico, se evidenciar as capacidades de reconhecimento automático e de conhecimento pericial que foram implementados no programa CAEd.

Outro aspecto construtivo muito importante que importa aqui salientar refere-se ao facto de os requisitos e exigências de desempenho construtivos do tecto falso com funções de duplicação não coincidirem com os requisitos e exigências do tecto falso necessário em termos de se conseguir o Tempo de Reverberação imposto pelo RRAE. Assim, a existência do tecto falso com funções de duplicação não dispensa o outro tecto falso para efeitos de promoção de uma maior absorção e de diminuição do Tempo de Reverberação, conforme se representa na tabela 3.12.

	Tecto falso	
	duplicação $\Delta R_w = 8\text{dB}$	Absorção reduzir Tempo Rev.
Perfuração	Não	Sim
caixa de ar incluindo MW	47,5mm	200mm

Tabela 3.12: Características distintas dos dois tectos falsos

Efectivamente o tecto falso com funções de duplicação perderia todo o seu efeito isolante se se tratasse de um tecto falso perfurado. De forma semelhante as propriedades de absorção, do tecto preconizado em termos do tempo de reverberação, seriam manifestamente reduzidas se o mesmo não possuísse essa perfuração. Quanto à posição da lã mineral no interior das caixas de ar ela é em ambos os casos indiferente.

Relativamente ao objectivo principal deste trabalho, o desenvolvimento de um programa que, em termos de avaliação acústica de edifícios, possa ser mais adequado do ponto de vista cognitivo, poderemos tirar as seguintes conclusões:

- Os cálculos apresentados, realizados pelo programa CAEd, foram comparados com folhas de cálculo tendo-se verificado que estavam correctos;
- O tempo despendido na realização dos cálculos em ambiente CAEd - utilizando as técnicas de representação de conhecimento desenvolvidas - para cada situação exemplificada foi de apenas alguns minutos, enquanto o tempo utilizado na construção das folhas de cálculo para verificação das correspondentes situações foi de algumas dezenas de horas;
- O módulo desenvolvido, ao utilizar as capacidades declarativas da linguagem PROLOG para escolher as equações adequadas ao cálculo acústico, introduz uma significativa melhoria cognitiva na realização destas tarefas, quer em termos de tempo, quer de garantia de qualidade.

3.3 Avaliação do conforto térmico

A avaliação do conforto térmico a realizar no âmbito do caso de estudo segue a metodologia definida no capítulo **Simulações de conforto térmico** (página 28).

Tratando-se de uma avaliação de conforto térmico e sendo o edifício em estudo, na zona de avaliação constituído por um conjunto de salas de aula que se repetem de forma regular, optou-se por simplificar o modelo de avaliação sem prejuízo do rigor dos resultados.

Assim, em vez de uma simulação da totalidade do corpo, representado nas figuras 3.5 e 3.6 (página 102) bem como na figura 3.8 (página 105), optou-se por restringir as simulações a um conjunto de duas salas de aula, partilhando um espaço de estufa ou solário conforme se apresenta na figura 3.23.

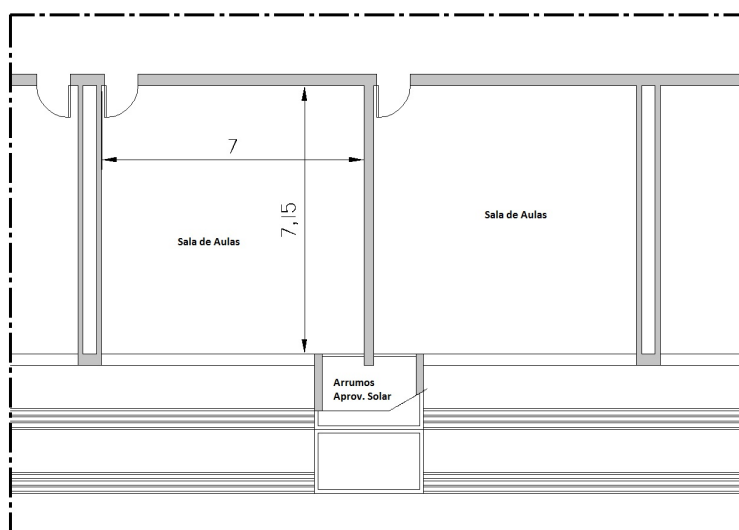


Figura 3.23: Planta de um conjunto de duas salas simuladas em termos de conforto térmico e de desempenho acústico

Para efectuar as avaliações do conforto térmico no interior dos espaços de salas de aulas do projecto em análise, utilizou-se o programa EnergyPlus. Porém, numa primeira fase, toda a representação geométrica dos espaços de salas de aulas em estudo foi elaborada a partir do programa **e+ Editor** cujo desenvolvimento é apresentado neste trabalho. Foram representados neste programa os seguintes objectos:

Definição de algoritmos: “SurfaceConvectionAlgorithm:Inside”, “SurfaceConvectionAlgorithm:Outside”, “HeatBalanceAlgorithm”, “SimulationControl”;

Definição da localização do edifício: “Building”, “Location”, “RunPeriod”;

Definição de horários: “ScheduleTypeLimits” e “Schedule:compact”;

Definições Construtivas: “Material”, “Material:AirGap”, “WindowMaterial:Glazing”, “WindowMaterial:Gas”, “WindowMaterial:Shade, Construction”;

Definições Geométricas: “GlobalGeometryRules”, “Zone”, “ZoneList”, “BuildingSurface:Detailed”, “FenestrationSurface:Detailed”, “WindowProperty:ShadingControl”, “WindowProperty:FrameAndDivider” e “Shading:Overhang”.

Após efectuada a modelação completa dos referidos objectos no ambiente gráfico do **e+ Editor**, foi realizada a escrita automática de um ficheiro de input do programa “EnergyPlus” (ficheiro de extensão “idf”).

Uma das vantagens de utilizar a interface **e+ Editor**, é o facto de os objectos ficarem previamente conectados em ambiente gráfico, reduzindo-se a probabilidade de ocorrência de erros. Por exemplo: uma superfície fica definida em termos da sua geometria (objecto “BuildingSurface:-Detailed”) e da construção (objecto “Construction”) que a ela é conectada pelo utilizador. Se se tratar de um envidraçado então deverá ser conectada - ao objecto gráfico que representa a geometria (“FenestrationSurface:-Detailed”) - a construção (objecto “Construction”) que neste caso se refere ao tipo de vidro, mas também o tipo de elemento sombreador (objecto “WindowProperty:ShadingControl”) e a definição do caixilho e respectivas divisões (objecto “WindowProperty:FrameAndDivider”).

Ao ficheiro de extensão **idf** assim obtido foram acrescentados novos objectos, que ainda não estão contemplados no programa de interface **e+ Editor**, mas que são necessários para a realização das simulações de conforto térmico dos espaços.

3.3.1 Aplicação da norma EN 15251

As simulações de conforto realizadas no programa EnergyPlus seguem os procedimentos da norma EN 15251. Em virtude de se tratar de uma área circundada de zonas verdes e cujo acesso rodoviário é caracterizado por ser uma estrada municipal secundária considerou-se que se tratava de uma zona média em termos de poluição (edifício de baixa poluição).

Nestes termos assumiram-se as seguintes definições:

Ficheiro meteorológico: Embora a localização do edifício em estudo fosse no concelho de Sesimbra, utilizou-se um ficheiro meteorológico de Lisboa, obtido no site do programa EnergyPlus. Verificou-se que no RCCTE estes dois concelhos apresentam semelhanças significativas em termos da sua caracterização climática:

- ambos são classificados como $I_2 - V_1$;
- ambos possuem como necessidades de aquecimento o valor de 1190 graus dias e têm a mesma duração da estação de aquecimento: 5,3 meses.

Estação de Aquecimento: Para determinação da estação de aquecimento utilizaram-se os procedimentos definidos no RCCTE, e já referidos anteriormente no capítulo **Simulações de conforto Térmico**, página 28. Na aplicação desta metodologia ao ficheiro meteorológico utilizado obteve-se uma duração para a estação de aquecimento entre o dia 11 de Novembro e o dia 16 de Abril, que corresponde a 5,2

meses, facto que é ligeiramente inferior à duração da mesma estação definida no RCCTE (5,3 meses);

Estação de Arrefecimento: Também para determinação da estação de aquecimento utilizaram-se os procedimentos definidos no RCCTE, e já referidos anteriormente no capítulo **Simulações de conforto Térmico**, página 28. Assim a estação de arrefecimento considerada corresponde ao período de Junho a Setembro;

Horários de ocupação: Tratando-se de uma escola secundária definiu-se como horário de ocupação o seguinte: das 8:00 às 13:00 e das 14:00 às 18:00, sendo o seu funcionamento apenas durante os dias da semana, obviamente seriam excluídos os fins de semana e os dias feriados. Considerou-se que em termos médios este horário seria próximo da realidade. Poderá haver estabelecimentos escolar que praticam aulas para cursos nocturnos, mas nesses casos será obrigatório a utilização de outro tipo de meios para Aquecimento Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) e isso fica fora dos objectivos deste trabalho;

Taxa metabólica: O valor para a taxa metabólica correspondente ao nível de actividade a utilizar em edifícios escolares está definida na norma EN-15251. Assim, para efeitos das simulações, definiu-se um horário constante para todos os dias de funcionamento da sala de aulas, tal que taxa metabólica por ocupante da sala de aula = $1,2 \text{ met} = 70 \text{ W/m}^2$.

Vestuário: O valor para o grau de isolamento do vestuário a utilizar em edifícios escolares está definida na norma EN-15251

Verão $0,5_{\text{clo}} = 0,078 \text{ m}^2 \cdot ^\circ \text{ C/W}$;

Inverno $1,0_{\text{clo}} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ \text{ C/W}$;

Velocidade do ar interior: Nas simulações realizadas com o programa **energy plus** foi assumido que esta variável tomava um valor constante (no tempo) de $0,2 \text{ m/s}$. Este valor corresponde ao máximo admissível conforme disposições do artigo 4º do RSECE ⁵.

Taxa de renovação de ar: Tendo sido considerado o edifício como de baixa concentração de poluentes, assumiu-se que nos termos da Tabela B.2 do anexo B da norma EN 15251 seria necessária uma renovação de $4,2 \text{ l/s, m}^2$ ou seja $756,76 \text{ m}^3/\text{hora}$ o que para um volume de $135,14 \text{ m}^3$ equivale a uma taxa de renovação horária de $R_{ph} = 5,6 \text{ h}^{-1}$.

⁵Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios - RSECE - Decreto-Lei 79/2006 de 4 de Abril

3.3.2 Modelação de espaços arquitectónicos

Na realização das simulações do conforto térmico no interior dos espaços adoptou-se uma simplificação. Atendendo ao facto de o conforto térmico depender da temperatura radiante média, torna-se necessária a realização de simulações espaço a espaço e não com uma subdivisão em zonas térmicas contendo diversos espaços. Assim a sala de aulas é um módulo que se repete de forma constante em todo o edifício.

Poderão existir algumas diferenças no desempenho das diferentes salas de aulas. Identificando-se os seguintes casos considerados mais relevantes:

- Salas de aulas no interior do corpo em estudo, em que ambas as paredes, parte do tecto e o pavimento confinam com espaços interiores;
- Salas nos topos laterais com uma parede em contacto com o exterior e outra adjacente;
- Salas no último piso com a cobertura em contacto com o exterior;
- Salas do piso térreo com o pavimento em contacto com o solo;

Tratando-se o objectivo deste trabalho apenas o de evidenciar uma metodologia de avaliação do conforto dos edifícios simulou-se apenas a primeira destas situações por se considerar que se trata da que ocorre com mais frequência no edifício em estudo.

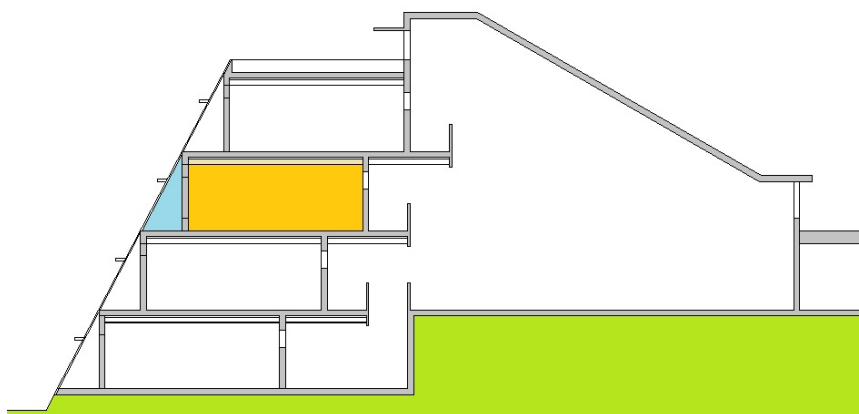


Figura 3.24: Corte transversal da zona em estudo assinalando-se a sala de aulas intermédia que foi simulada com o programa EnergyPlus

Para os espaços em avaliação, que foram simulados com o programa EnergyPlus, consideraram-se algumas variantes:

- Solução Base - compartimentos de Salas de Aulas sem sistemas solares térmicos; Inverno e Verão;

- Solução Espaço Estufa - Dois compartimentos de salas de aula adjacentes partilhando um espaço estufa em ligação simultânea com as salas de aulas; Inverno;
- Solução Colector a Ar - Dois compartimentos de salas de aula adjacentes partilhando um espaço de colector a ar em ligação simultânea com as salas de aulas; Inverno;
- Solução Tubos enterrados - Espaço com arrefecimento por tubos enterrados

3.3.3 Soluções construtivas em avaliação

As soluções construtivas dos diferentes elementos que compõem a envolvente dos espaços foram já identificadas no capítulo 3.1.1, página 103. No entanto relativamente ao elemento que serve de separação entre dois espaços de salas de aulas (par de espaços com emissão sobrejacente) convém referir as restrições impostas pelo projecto de acústica.

Representa-se na figura 3.25 uma imagem do elemento construtivo separador de duas salas de aulas com emissão sobrejacente. Este elemento construtivo - constituído pela laje maciça (20 cm de espessura), com betonilha de assentamento e regularização e acabamento na sua parte superior; estando prevista para a parte inferior da laje a existência de dois tectos falsos - está condicionado aos seguintes aspectos:

- O tecto falso em gesso cartonado superior, associado à camada de lã mineral existente no seu tardo, exerce funções de duplicação acústica para melhorar o isolamento sonoro a sons de condução aérea ΔR_w pelo que é um requisito construtivo e funcional que não exista qualquer furação na sua superfície;
- O tecto falso em gesso cartonado superior, associado à camada de lã mineral existente no seu tardo, exerce funções de redução do tempo de reverberação do espaço de salas de aulas, pelo que a existência de uma furação constitui um requisito fundamental para que seja cumprida essa função de redução do tempo de reverberação;
- Considerou-se que o espaço de ar formado por este último tecto falso teria características de um espaço de ar com fraca ventilação nos termos da norma EN ISO 6946, desde que cumpra a condição de possuir uma área de furação inferior a 15% da área total⁶.
- Os valores para as absorções sonoras, no domínio da frequência, utilizados no cálculo do tempo de reverberação do espaço [11] não especificam qual a percentagem de furação, porém encontraram-se

⁶Conforme especificado na referida norma $s/A \leq 1500\text{mm}^2/\text{m}^2$, sendo "s" a superfície total dos espaços de ar e "A" a área total do elemento que separa o espaço de ar da envolvente exterior

diversos exemplos em catálogos de fabricantes de tectos falsos que cumprem a condição de possuírem uma percentagem de furação inferior a 15% e que simultaneamente possuem valores para absorções sonoras no domínio da frequência semelhantes aos valores utilizados neste trabalho para o cálculo do Tempo de reverberação interior das salas de aulas.

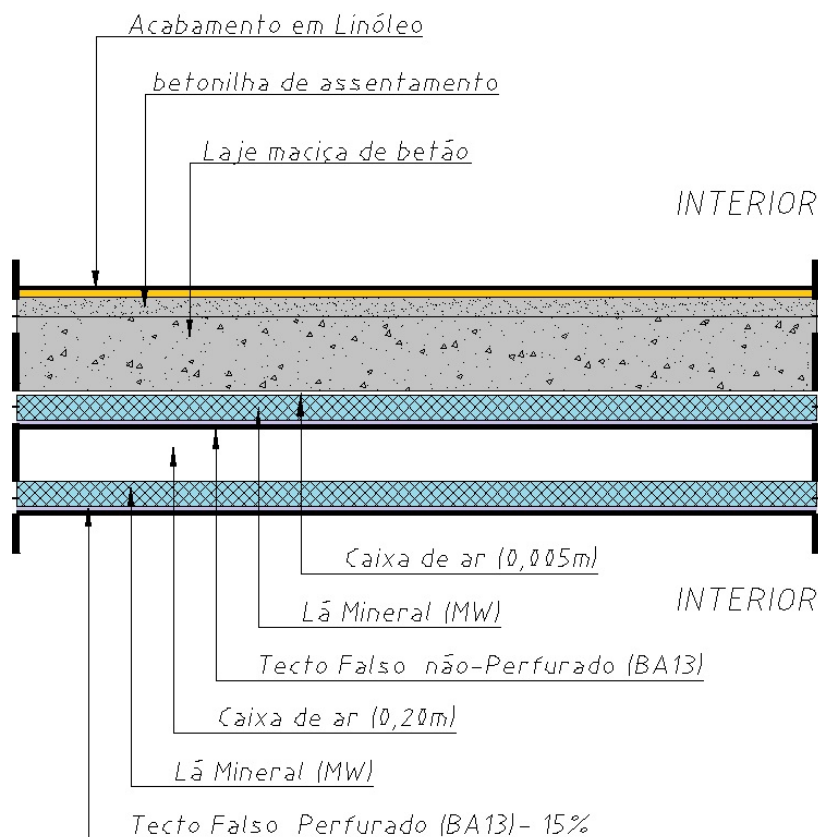


Figura 3.25: Pormenor construtivo do elemento construtivo separador de duas salas de aulas com emissão sobrejacente

As propriedades térmicas dos materiais que compõem as soluções construtivas dos elementos opacos, identificadas no capítulo 3.1.1, página 103, são as seguintes:

- Propriedades de materiais relativos a elementos construtivos opacos: Tabela 3.13. Os valores dos respectivos parâmetros foram obtidos a partir com base em [59] [60];
- Propriedades de materiais relativos a elementos construtivos envidraçados: Tabela 3.14, e foram obtidos com base no programa Windows-6 [53], desenvolvido pelo Lawrence Berkeley National Laboratory;
- Para os valores das resistências térmicas de caixas de ar foram considerados os constantes do Quadro VII do RCCTE e encontram-se

expostos na tabela 3.15. Nos casos em que o sentido do fluxo de calor era vertical, considerou-se sempre a situação de fluxo ascendente por ser a mais desfavorável.

Designação dos Materiais	Condutibilidade - λ (W/m · °C)	Densidade (Kg/m ³)	Calor Específico (J/Kg · °C)	Absor-tância Térmica	Absor-tância Solar
Reboco	1,30 ³	1800 ³	1044 ³	0,91 ⁴	0,60 ⁴
Betão estrutural	2,30 ³	2500 ³	936 ³	0,90 ⁴	0,65 ⁴
Lã Mineral	0,04 ³	60 ³	828 ³	0,90 ⁴	0,60 ⁴
XPS ¹	0,035 ³	35 ³	1260 ³	0,90 ⁴	0,30 ⁴
EPS ²	0,040 ³	15 ³	1512 ³	0,90 ⁴	0,30 ⁴
Material Cerâmico	1,10 ³	2100 ³	936 ³	0,90 ⁴	0,60 ⁴
Argila expandida	0,85 ³	1500 ³	1000 ³	0,90 ⁴	0,60 ⁴
Tijolo furado	0,45 ³	1100 ³	936 ³	0,93 ⁴	0,70 ⁴
Madeira de Pinho	0,14 ³	600 ³	2100 ³	0,90 ⁴	0,65 ⁴
Chapa de Ferro	73,0 ³	7890 ³	486 ³	0,12 ⁴	0,20 ⁴
Chapa de Zinco	110 ³	7140 ³	446 ³	0,12 ⁴	0,20 ⁴
Gesso Cartonado	0,25 ³	900 ³	1000 ³	0,91 ⁴	0,50 ⁴

Tabela 3.13: Propriedades térmicas dos materiais opacos

	Vidro "Planilux"		
	4mm	6mm	12mm
Transmit. Solar	0,825	0,0784	0,713
Reflect. Solar F	0,074	0,071	0,067
Reflect. Solar B	0,074	0,071	0,067
Transmit. Visiv.	0,896	0,885	0,866
Reflect. Vis. F	0,081	0,08	0,079
Reflect. Vis. B	0,081	0,08	0,079
Transmit. I.V.	0	0	0
Emiss. Hemisf. I.V. F.	0,837	0,837	0,837
Emiss. Hemisf. I.V. B.	0,837	0,837	0,837
Condutibilidade	1,0	1,0	1,0

Tabela 3.14: Propriedades térmicas do vidro

¹XPS - Poliestireno Expandido Extrudido²EPS - Poliestireno Expandido Moldado³in [59]⁴in [60]

Sentido do fluxo	Espessura do espaço de ar (mm)	Resistência Térmica ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)
Horizontal	≥ 15	0,17
Vertical	5	0,11
Ascendente	≥ 15	0,16

Tabela 3.15: Propriedades térmicas das caixas de ar

3.3.4 Resultados das avaliações de conforto térmico

A metodologia para realização das simulações de conforto térmico foi anteriormente descrita no sub-capítulo “Simulações de Conforto Térmico”, página 28 e complementada com o parágrafo “Rotina para avaliação do conforto”, página 70, onde são expostas algumas capacidades do programa **e+ Editor** que permitem um processamento e análise mais rápidos dos dados obtidos com o programa EnergyPlus.

Em todas as simulações foram aplicados os pressupostos da norma EN 15251 já anteriormente descritos no parágrafo com o título “**Aplicação da norma EN 15251**”, página 135 e seguintes.

Conforme se poderá verificar na figura 3.24, página 137, bem como nas imagens iniciais de representação do caso de estudo que constitui este estudo prévio (figuras 3.2 a 3.6 página 100 e seguintes), os espaços de sala de aulas em avaliação partilham uma mesma área de espaço estufa.

As avaliações de conforto térmico realizadas limitaram-se ao conjunto típico de duas salas de aula que partilham um mesmo espaço estufa, e que se encontram situadas no interior do respectivo corpo do edifício, conforme se encontra representado na planta parcial (figura 3.23 , página 134) e no corte parcial representado na figura 3.26.

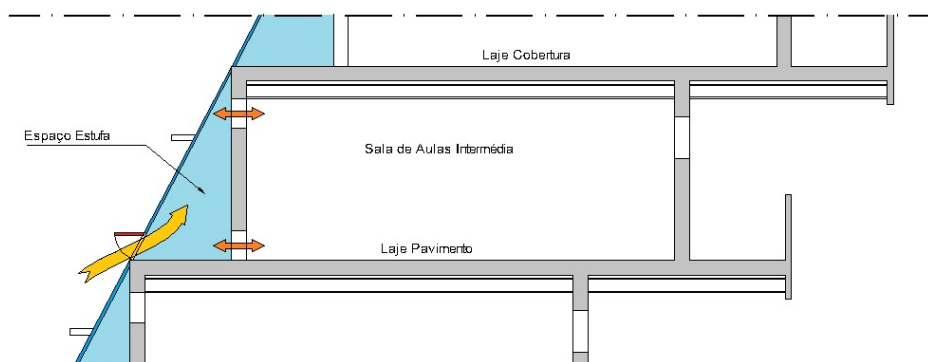


Figura 3.26: Corte, pela zona do espaço estufa, das salas de aulas em avaliação

Para esta configuração, de espaços em avaliação, assumiu-se que as perdas e ganhos de calor da cobertura interior (ou tecto) do espaço seriam os

ganhos ou perdas de calor do pavimento desse mesmo espaço. Não se trata de uma situação real, mas que em termos do comportamento térmico não deverá causar erros significativos na simulação. Igual configuração é assumida para as trocas de calor entre paredes laterais não comuns de um espaço e de outro do conjunto que partilha o mesmo espaço estufa.

Considerou-se que as salas de aula seriam ocupadas por 25 pessoas o que é consistente com as exigências do programa base definido pela empresa Parque Escolar EPE, promotora deste concurso, e compatível ainda com as disposições da norma EN 15251 que preconiza uma área de $2\text{m}^2/\text{aluno}$, sendo a área total de cada sala de aula de $50,05\text{m}^2$.

Uma particularidade importante deste conjunto é o facto de as salas de aula, nos termos da norma EN 15251, exigirem uma renovação horária de 5,6 Volumes por hora, valor que condiciona significativamente o desempenho térmico dos espaços em avaliação.

Este valor foi obtido dentro dos seguintes pressupostos:

- Considerou-se que o edifício, em avaliação e em fase de estudo prévio, se trata de um edifício com baixas emissões de poluentes nos termos dos critérios do anexo C da norma EN 15251;
- Em face de se ter adoptado esta classificação deverá ser considerada uma taxa de renovação de ar $Q_{tot} = 4,2\text{l/s, m}^2$ conforme recomendação do anexo B da mesma norma;
- A taxa de renovação de ar de $4,2\text{l/s, m}^2$ corresponde a $210,21\text{l/s}$ atendendo ao facto de que a sala de aulas possui uma área de $50,05\text{m}^2$ o que é equivalente a: $210,21\text{l/s} \equiv 756,756\text{m}^3/\text{h}$.
- Admitindo que o pé direito da sala será de $2,7\text{m}$: Volume = $135,14\text{m}^3$, obtém-se o valor de 5,6 para o número de renovações por hora (Rph) necessários a uma manutenção de uma qualidade do ar aceitável, nos termos da exigência da norma EN 15251 de $Q_{tot} = 4,2\text{l/s, m}^2$.

O facto de se ter considerado o estudo prévio de edifício em avaliação como um edifício de baixas emissões de poluentes e não um edifício de emissões muito baixas ou de emissões elevadas deve-se às seguintes considerações:

- Nesta fase do projecto ainda não se possui dados concretos sobre as emissões totais de Compostos Orgânicos Voláteis, Formaldeído, ou Amônia, nem da insatisfação ao cheiro das pessoas, atendendo a que ainda se está numa das fases do projecto;
- Admite-se que haverá um esforço de projecto no sentido de serem aplicados materiais tradicionais cujo desempenho a emissões seja conhecido, como é o caso dos materiais preconizados para as soluções construtivas em estudo;

- Hoje em dia é proibido fumar em locais públicos pelo que também seria proibido no edifício em estudo se ele fosse construído.

Solução base - Inverno

Efectuou-se uma primeira avaliação de uma solução construtiva e arquitectónica designada por solução base. Esta solução é idêntica à solução que preconiza a existência de um espaço estufa, porém sem o referido sistema solar passivo. No lugar deste sistema e em sua substituição previu-se a existência de uma parede opaca de tijolo furado de 22cm de espessura, isolada pelo exterior com Poliestireno Expandido Moldado (EPS) com 6cm de espessura.

Apresenta-se na figura 3.27 uma imagem do modelo tridimensional realizado com o programa **e+ Editor** a partir do qual foi gerado o ficheiro idf para posterior realização das simulações com o programa EnergyPlus. Apresenta-se na figura 3.28 uma imagem obtida em ambiente "AutoCAD" após simulação com o programa "EnergyPlus" o qual gerou um ficheiro em formato standard dxf.

O objectivo desta solução é o de se comparar os seus resultados com a solução que prevê a existência do espaço estufa e deste modo poder-se avaliar o contributo do referido sistema para o conforto térmico dos espaços de salas de aulas que lhe estão adjacentes.

Negligenciou-se o contributo da iluminação artificial para os ganhos de calor em virtude de se tratar de uma escola em que a maior parte do seu tempo de funcionamento é diurno. Acresce que o objectivo do sistema será o de permitir avaliações de conforto adaptativo durante fases iniciais de projecto, não estando ainda preparado para uma realização de simulações onde se procure resultados mais precisos para fases de projecto que exigem mais pormenor.

Considerou-se que, nos espaços em avaliação, existia uma taxa de infiltração ou ventilação de 5,6 renovações por hora, nos termos da norma EN 15251, conforme já exposto no sub-capítulo **Aplicação da norma EN 15251**, página 135. Para esse efeito definiu-se no ficheiro idf um objecto "ZoneInfiltration:DesignFlowRate" com as seguintes definições:

Zone: aplicado às salas de aulas;

Schedule name: Um horário que toma um valor constante de **1 unidade** equivalente a "sempre activo" para o período de ocupação das salas de aulas;

Design Flow Rate Calculation Method: keyword "AirChanges/Hour";

Air Changes per Hour: 5,6;

Coeficientes de infiltração: Constant Term Coeficient = 1; Temperature Term Coeficient= 0, Velocity Term Coeficient = 0; Velocity squared

Term Coeficient = 0. Correspondendo aos valores por defeito do programa Energy Plus [61] que exprimem uma situação de um fluxo de volume constante para qualquer que sejam as condições exteriores.

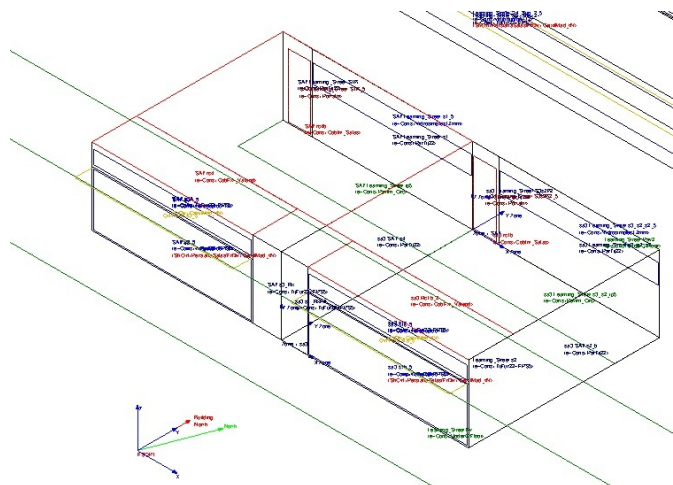


Figura 3.27: Representação tridimensional em ambiente **e+_Editor** do conjunto de duas salas de aulas referente à solução base - nesta solução não foi prevista a existência do espaço estufa partilhado

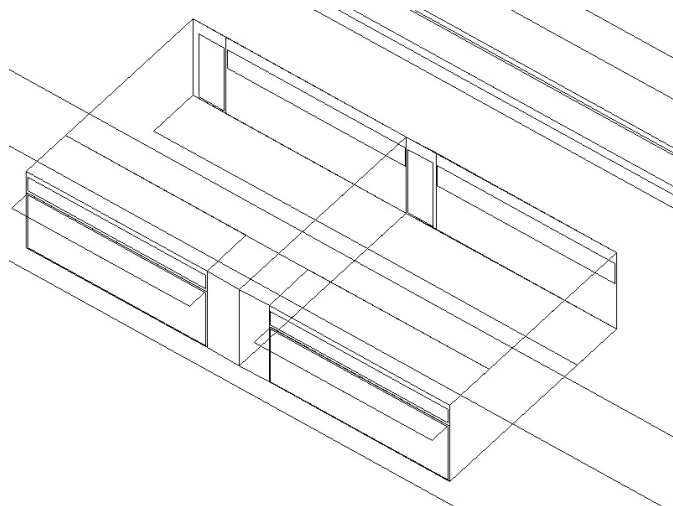


Figura 3.28: Representação tridimensional em ambiente "AutoCAD" do conjunto de duas salas de aulas referente à solução base. Imagem obtida após simulação com o programa "EnergyPlus"

Após execução da simulação, com o programa "EnergyPlus", do comportamento térmico dos espaços em avaliação obtiveram-se os valores da temperatura operativa que se verificam no interior dos espaços das salas de aulas. Finalmente com base nos valores obtidos no relatório relativo à variável "ThermalComfort: Operative Temperature", para todas as horas e dias da estação de aquecimento (definida nos termos do RCCTE - ver

página 136), calculou-se a Temperatura Operativa mínima que se verifica no interior dos referidos espaços. Assim $T_{opt,min} = 13,37^{\circ}C$. O que não cumpre as condições de conforto preconizadas na norma EN 15251 do conforto adaptativo.

Apresenta-se na figura 3.29 um gráfico contendo os resultados obtidos para temperatura operativa e temperatura exterior durante todo o período da estação de aquecimento.

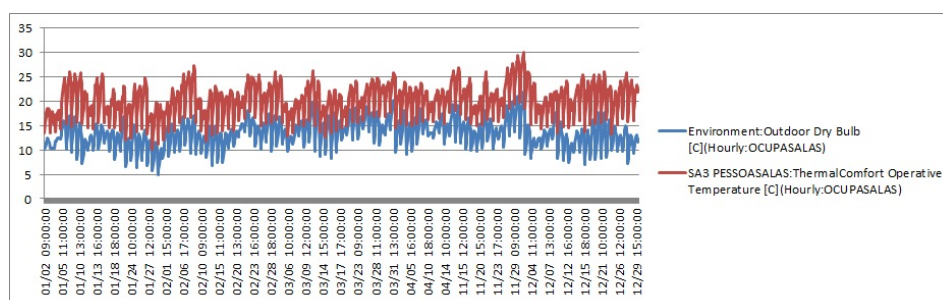


Figura 3.29: Gráfico de resultados da temperatura operativa e temperatura exterior para a estação de aquecimento

Solução espaço estufa - Inverno

Uma segunda solução arquitectónica e construtiva foi realizada. Nesta solução é simulado o conforto térmico das duas salas de aulas adjacentes, mas contando com o contributo de um espaço estufa que é partilhado por ambas as salas de aulas. Apresenta-se na figura 3.30. uma imagem do modelo tridimensional realizado com o programa **e+ Editor** a partir do qual foi gerado o ficheiro idf para posterior realização das simulações com o programa EnergyPlus. Apresenta-se na figura 3.31 uma imagem obtida em ambiente “AutoCAD” após simulação com o programa “EnergyPlus” o qual gerou um ficheiro em formato standard dxf.

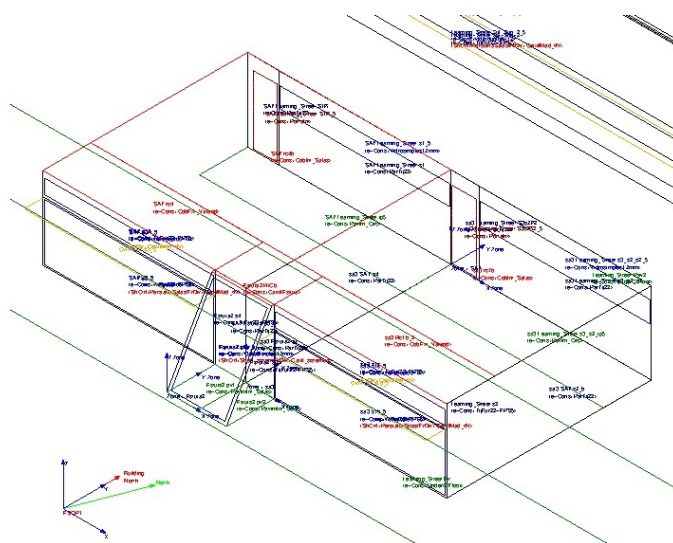


Figura 3.30: Representação tridimensional em ambiente **e+_Editor** do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando uma mesma estufa

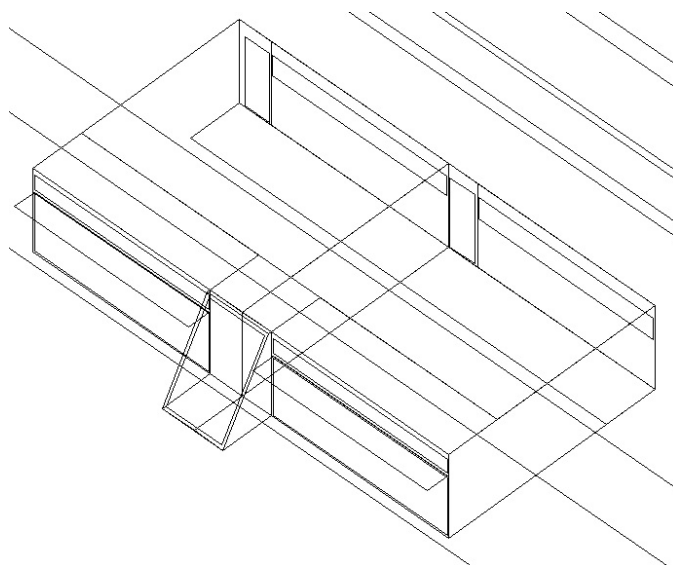


Figura 3.31: Representação tridimensional em ambiente "AutoCAD" do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando uma mesma estufa. Imagem obtida após simulação com o programa "EnergyPlus"

À semelhança do caso anterior designada por "Solução base" (página 143 e seguintes) é necessário assegurar uma taxa de ventilação de 5,6 renovações por hora, nos termos da norma EN 15251, conforme já exposto no sub-capítulo **Aplicação da norma EN 15251**, página 135.

Porém, neste caso, estabelece-se uma variante que consiste na existência de um espaço estufa (figura 3.26, página 141) através do qual se prevê

que venha a realizar-se a ventilação necessária à renovação do ar imposta pela norma EN 15251.

Para esse efeito definiram-se, no ficheiro **idf**, os seguintes objectos:

“ZoneVentilation:DesignFlowRate”: foram definidas as variáveis que caracterizam uma extracção de ar permanente e continua a partir do exterior para o espaço estufa;

“ZoneMixing”: foram definidas as variáveis que caracterizam uma mistura permanente do ar das duas zonas

Relativamente ao objecto “ZoneVentilation:DesignFlowRate” foi caracterizado do seguinte modo:

Zone: aplicado somente à Estufa;

Schedule name: Um horário que toma o valor constante de **1 unidade** equivalente a “sempre activo” em todo o período de ocupação das salas de aulas;

Design Flow Rate Calculation Method: keyword “AirChanges/Hour”;

Air Changes per Hour: 280 - A estufa tem um volume de $5,4\text{m}^3$, devendo ser realizada uma insuflação para as duas zonas adjacentes de $756,7\text{m}^3/\text{h}$ o que corresponde a 140 Volumes da estufa por hora, para cada uma das salas de aulas;

Ventilation Type: Intake;

Fan total efficiency: 1;

Coeficientes de ventilação: Constant Term Coefficient = 1; Temperature Term Coefficient= 0, Velocity Term Coefficient = 0; Velocity squared Term Coefficient = 0. Correspondendo aos valores por defeito do programa Energy Plus [61] que exprimem uma situação de um fluxo de volume constante para qualquer que sejam as condições exteriores.

Relativamente ao objecto “ZoneMixing” foi caracterizado do seguinte modo:

Zone: aplicado às salas de aulas;

Schedule name: Um horário que toma sempre o valor 1 equivalente a sempre activo em todo o período de ocupação das salas de aulas;

Design Flow Rate Calculation Method: keyword “AirChanges/Hour”;

Air Changes per Hour: 140;

Coeficientes de infiltração: Constant Term Coefficient = 1; Temperature Term Coefficient= 0, Velocity Term Coefficient = 0; Velocity squared Term Coefficient = 0. Correspondendo aos valores por defeito do programa Energy Plus [61] que exprimem uma situação de um fluxo de volume constante para qualquer que sejam as condições exteriores.

Este objecto pretende caracterizar a mistura entre o ar do espaço estufa e as salas de aula. Na realidade esta mistura deverá ser realizada com recurso a um ventilador que assegure que os caudais preconizados se verifiquem na prática.

Após execução da simulação, com o programa “EnergyPlus”, e seguindo os mesmos procedimentos descritos na simulação anteriormente descrita obteve-se o seguinte resultado: $T_{opt,min} = 21,24^{\circ}\text{C}$. Que cumpre as condições de conforto preconizadas na norma EN 15251 do conforto adaptativo, para a “categoria I”.

Apresenta-se na figura 3.32 um gráfico contendo os resultados obtidos para temperatura operativa e temperatura exterior durante todo o período da estação de aquecimento.

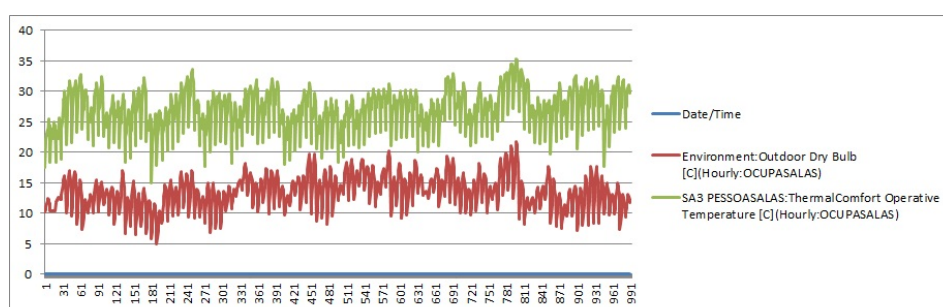


Figura 3.32: Gráfico de resultados da temperatura Operativa e temperatura exterior para a estação de aquecimento

Solução colector a Ar - Inverno

Uma terceira solução arquitectónica e construtiva foi realizada para o Inverno. Nesta solução é simulado o conforto térmico das duas salas de aulas adjacentes, mas contando com o contributo de um colector a ar que é partilhado por ambas as salas de aulas - de acordo com o esquema representado na figura 3.33.

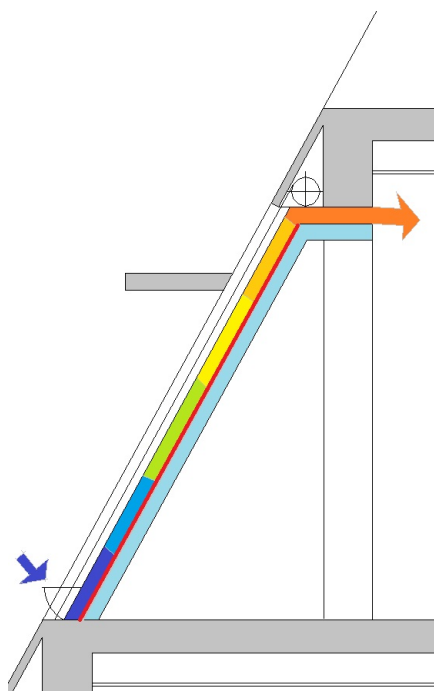


Figura 3.33: Esquema do coletor a ar

Apresenta-se na figura 3.34. uma imagem do modelo tridimensional realizada com o programa **e+_Editor** a partir do qual foi gerado o ficheiro idf para posterior realização das simulações com o programa EnergyPlus.

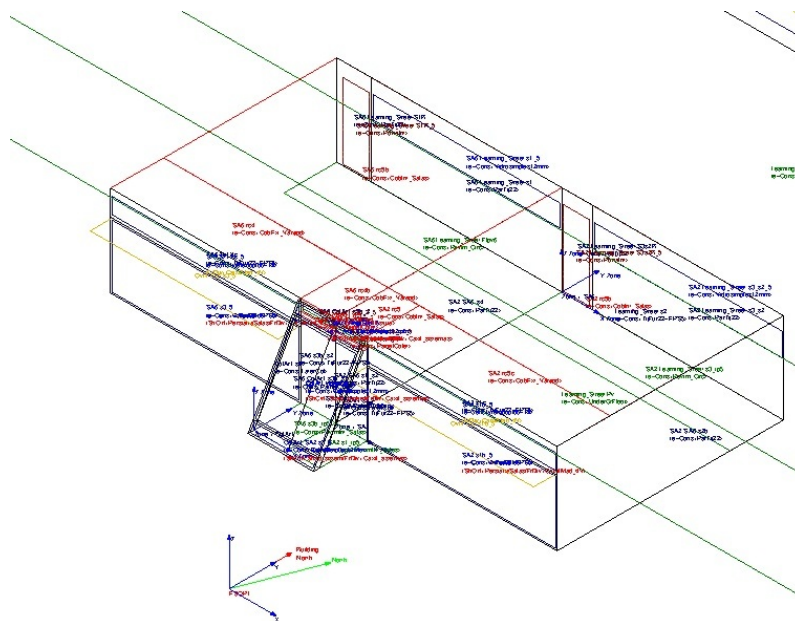


Figura 3.34: Representação tridimensional em ambiente “e+_Editor” do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando um mesmo coletor a ar

Apresenta-se na figura 3.35 uma imagem obtida em ambiente “AutoCAD” após simulação com o programa “EnergyPlus” o qual gerou um ficheiro em formato standard dxf.

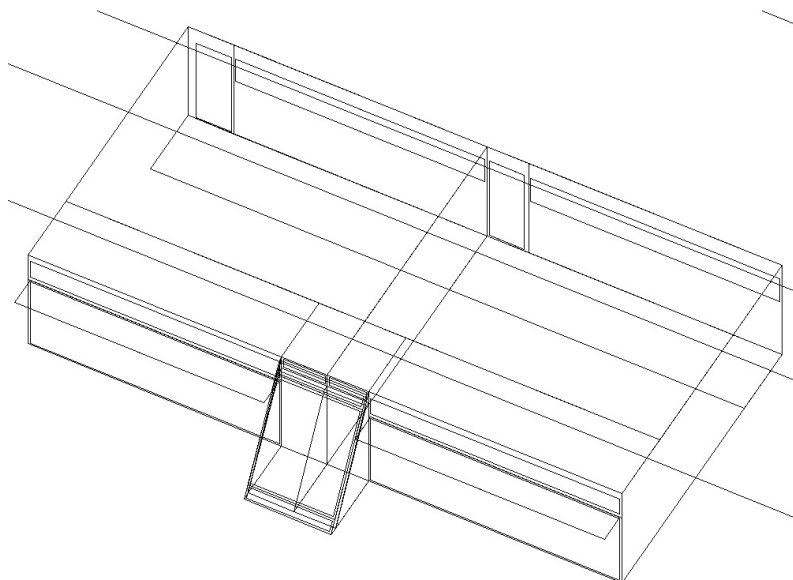


Figura 3.35: Representação tridimensional em ambiente “AutoCAD” do conjunto de duas salas de aulas referente à solução arquitectónica de dois espaços adjacentes partilhando um mesmo colector a ar. Imagem obtida após simulação com o programa “EnergyPlus”

À semelhança dos casos apresentados anteriormente é necessário assegurar uma taxa de ventilação de 5,6 renovações por hora, nos termos da norma EN 15251, conforme já exposto no sub-capítulo **Aplicação da norma EN 15251**, página 135. Porém, neste caso, utilizou-se um conjunto de objectos do programa EnergyPlus em que a ventilação no interior das salas de aula resulta da acção do vento. Assim, não é possível garantir a ventilação necessária à renovação do ar imposta pela norma EN 15251, em termos de qualidade do ar interior.

Para esse efeito definiram-se no ficheiro idf os seguintes objectos:

“**AirFlowNetwork:SimulationControl**”:

- sendo as opções mais importantes definidas para este objecto as seguintes:

“**AirflowNetwork Control**”:

- keyword = MultizoneWithoutDistribution.

Esta definição implica que qualquer definição para os objectos ZoneInfiltration:, ZoneVentilation:*, ZoneMixing and ZoneCross-Mixing não seja simulada pelo programa EnergyPlus - em face desta opção não foi possível impor uma taxa mínima de ventilação ou infiltração para o espaço;

“**Wind Pressure Coefficient Type1**”:

- keyword = SurfaceAverageCalculation. Esta opção determina que os “wind pressure coeffi-

cients” (coeficientes de pressão do vento) são calculados pelo programa com base no ficheiro meteorológico;

“**AirFlowNetwork:MultiZone:Zone**”: Neste objecto define-se que a abertura de janelas e portas depende da Temperatura, bem como um horário para abertura de janelas para cada zona. Nas salas de aulas as janelas abrem sempre que a temperatura interior $\geq 22^{\circ}\text{C}$, No espaço definido como colector a ar as janelas abrem sempre que a temperatura interior $\geq 0^{\circ}\text{C}$, isto é estão sempre abertas;

“**AirFlowNetwork:MultiZone:Surface**”

“**AirFlowNetwork:MultiZone:Reference CrackConditions**”

“**AirFlowNetwork:MultiZone:Surface:Crack**”

“**AirFlowNetwork:MultiZone:Component:DetailedOpening**”

Após execução da simulação, com o programa “EnergyPlus”, e seguindo os mesmos procedimentos descritos nas simulações anteriormente apresentadas (Inverno) obteve-se o seguinte resultado: $T_{opt,min} = 19,89^{\circ}\text{C}$. Que apenas cumpre as condições de conforto preconizadas na norma EN 15251 do conforto adaptativo, para a “categoria III”, Acresce que a taxa de renovação também nem sempre cumpre a exigência imposta pela norma EN 15251 de $5,6 \text{ Rph}$. Tendo-se verificado que, embora $R_{ph,mdia} = 5,43\text{h}^{-1}$ - valor próximo do preconizado pela EN 15251 - a condição mínima de $R_{ph} \geq 5,6\text{h}^{-1}$ ou superior, só se verifica em 44% do tempo de funcionamento dos espaços em avaliação.

Solução base - Verão

A solução base de Verão é em tudo idêntica à solução base de Inverno, diferindo apenas no período de tempo em que é realizada a simulação. Neste caso o período de tempo simulado é a estação de arrefecimento - meses de Junho a Setembro.

Salienta-se ainda o facto de se ter previsto uma solução base - do ponto de vista construtivo e arquitectónico - idêntica à que se considerou a estação de aquecimento. Considerou-se ainda que os espaços possuem uma taxa de renovação de ar de $5,6$ volumes por hora.

Para os casos em que a solução construtiva de Inverno contemplava a existência de um sistema solar passivo, considerou-se que a estufa era desactivada no Verão ficando exposta a uma grande ventilação e devidamente ensombrada.

Após execução da simulação, com o programa “EnergyPlus”, do comportamento térmico dos espaços em avaliação obtiveram-se os valores da temperatura operativa no interior dos espaços das salas de aulas. Finalmente com base nos valores obtidos no relatório relativos à variável

“ThermalComfort: Operative Temperature”, para todas as horas e dias da estação de arrefecimento, (definida nos termos do RCCTE - ver página 136), calculou-se a diferença de temperatura operativa mínima [equações (1.6), (1.7), página 30 e seguintes], que se verifica, para 95% das horas da estação de arrefecimento, no interior dos referidos espaços. Assim, $\Delta T_{opt,min} = 4,66^{\circ}\text{C}$ de acordo com a norma EN 15251, valor que **não** cumpre as condições de conforto adaptativo de Verão. dado que esta diferença de temperatura é superior a 4°C .

Solução de tubos enterrados - Verão

Uma alternativa à solução base de Verão que foi também avaliada consistiu na incorporação de um sistema de tubos enterrados que deverão fornecer ar arrefecido.

Considerou-se que, nos espaços em avaliação, existia uma taxa de infiltração ou ventilação de 5,6 renovações por hora, nos termos da norma EN 15251, conforme já exposto no sub-capítulo **Aplicação da norma EN 15251**, página 135. Para esse efeito definiu-se no ficheiro idf um objecto “ZoneEarthtube” com as seguintes definições:

Zone: aplicado às salas de aulas;

Schedule name: Um horário que toma sempre o valor 1 equivalente a sempre activo em todo o período de ocupação das salas de aulas;

Design Flow Rate: $0,2\text{m}^3/\text{s}$; equivalente a $756,76\text{m}^3/\text{h}$

Eart Tube Type: Natural;

Pipe Radius: $0,25\text{m}$;

Pipe Thickness: $0,01\text{m}$;

Pipe Length: 100m ;

Pipe condutibility: $50\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ - correspondente a um tubo de ferro fundido;

Pipe Depth under Ground Surface: 4m ;

Average Soil Surface Temperature: $19,24257^{\circ}\text{C}$ - calculada com base no programa “CalcSoilSurfTemp” (faz parte do programa EnergyPlus) e com base no ficheiro meteorológico utilizado - opções de cálculo:

Soil condition surrounding the Earth tupe: Heavy and Dry;

Condition of the ground surface above the earth tube: Covered and dry.

Amplitude of Soil Surface Temperature: $4,86694^{\circ}\text{C}$ - calculada com base no programa “CalcSoilSurfTemp” e no ficheiro meteorológico utilizado, para as mesmas opções de cálculo;

Phase constant of Soil Surface Temperature: 47°C - calculada com base no programa “CalcSoilSurfTemp” e no ficheiro meteorológico utilizado, para as mesmas opções de cálculo;

Coeficientes de infiltração: Constant Term Coeficient = 1; Temperature Term Coeficient= 0, Velocity Term Coeficient = 0; Velocity squared Term Coeficient = 0. Correspondendo aos valores por defeito do programa Energy Plus [61] que exprimem uma situação de um fluxo de volume constante para qualquer que sejam as condições exteriores.

Após execução da simulação, com o programa “EnergyPlus”, e seguindo os mesmos procedimentos descritos na simulação anteriormente descrita (Verão) obteve-se o seguinte resultado: $\Delta T_{opt,min} = 3,08^{\circ}\text{C}$ que cumpre as condições de conforto preconizadas na norma EN 15251, dado que esta diferença de temperatura é inferior a 3°C, valor que cumpre as condições de conforto adaptativo para a categoria III de Verão.

3.3.5 Síntese de resultados do conforto térmico

Apresenta-se na tabela 3.16 uma síntese de todos os resultados obtidos na avaliação de conforto térmico realizada com o programa EnergyPlus, para a estação de aquecimento e na tabela 3.17 uma síntese de todos os resultados obtidos na avaliação de conforto térmico realizada com o programa EnergyPlus, para a estação de arrefecimento.

Solução construtiva	Temperatura operativa mínima em 95% do tempo (°C)	Categoria de conforto
Solução base	13,37	Categoria IV
Solução espaço estufa	21,24	Categoria I
Solução colector a ar	19,89	Não cumpre taxa renovação

Tabela 3.16: Síntese dos resultados das avaliações de conforto térmico de Inverno realizadas com o programa EnergyPlus

Solução construtiva	Diferença de temperatura operativa máxima em 95% do tempo - ΔT_o (°C)	Categoria de conforto
Solução base	4,66	Não cumpre
Solução “earth tubes”	3,08	Categoria III

Tabela 3.17: Síntese dos resultados das avaliações de conforto térmico de Verão realizadas com o programa EnergyPlus

Comentário final sobre a avaliação do conforto térmico

Convém sublinhar de novo, que em todas as simulações realizadas se assumiu que a temperatura flutua livremente sendo os contributos para o aquecimento apenas devidos a ganhos solares através dos envidraçados e a ocupantes. Não existe qualquer contribuição adicional, quer de sistemas de aquecimento, quer de equipamentos, quer devidos a iluminação.

A condicionante mais importante para os resultados obtidos resulta das necessidades de renovação de ar que nos termos da norma EN 15251 foram estimadas em 5,6 Rph.

Dos resultados apresentados na tabela 3.16, relativos à estação de aquecimento, apresentam-se as seguintes conclusões:

- A Solução Base não cumpre as condições de conforto - nos termos da norma EN 15251;
- A solução de Espaço Estufa requer a existência de um ventilador que promova a mistura do ar de modo a que esse ar entre do exterior para a estufa e seja aquecido nela, para depois ser injectado no espaço da sala de aulas - sendo a taxa de renovação do ar de 5,6 Rph. Considerou-se que em face da pressão produzida pelo ventilador a infiltração através das janelas, das salas de aulas, não se realizava no sentido exterior para o interior;
- A solução de colector a ar em que a circulação do ar no interior das salas de aulas depende da acção do vento, embora próxima de apresentar valores de conforto - nos termos da norma EN 15251 - não oferece garantias de que a taxa de renovação horária do ar assegura condições de qualidade do ar interior em todo o período de ocupação dos espaços em estudo;
- De acordo com as simulações realizadas estabeleceu-se que as janelas eram abertas quando a temperatura interior das salas de aulas $\geq 22^{\circ}\text{C}$. Valores mais elevados da taxa de renovação de ar interior seriam obtidos se esse controlo fosse realizado a uma temperatura mais baixa. Porém tal disposição implicaria uma descida dos valores da Temperatura Operativa Mínima que se verifica em 95% do tempo de funcionamento das salas de aulas;
- Este tipo de avaliação embora não se revelasse eficaz no caso de estudo de um edifício escolar, onde as exigências de renovação de ar são elevadas, poderá ser utilizado com mais sucesso em edifícios de habitação.

Dos resultados apresentados na tabela 3.17, relativos à estação de arrefecimento, apresentam-se as seguintes conclusões:

- A Solução Base **não** cumpre as condições mínimas de conforto - nos termos da norma EN 15251;
- A solução com tubos enterrados também introduz melhorias de conforto térmico - considerando os fenómenos de adaptação do ser humano - passando os espaços avaliados da categoria IV (incumprimento) para a categoria III, nos termos da norma EN 15251.

Relativamente ao objectivo principal deste trabalho, o desenvolvimento de um programa que, em termos de avaliação do conforto térmico dos edifícios, possa ser mais adequado do ponto de vista cognitivo, poderemos tirar as seguintes conclusões:

- A utilização do conjunto de programas interligados, *common_Editor*, *e+_Editor* e *EnergyPlus*, revelou que avaliações de conforto térmico podem ser realizadas de forma muito rápida e “amigável” enquanto o arquitecto esboça a forma e a construção de edifícios em fase de projecto;
- Os mecanismos de interface entre estes módulos exportam as geometrias de forma fiável, sempre que estes módulos e programa são utilizados, também, de forma correcta;
- No decurso das simulações realizadas verificou-se ainda que - pese embora o facto de o conhecimento científico sobre o conforto térmico em condições variáveis estar ainda pouco estudado, como refere Hensen [6] - o impacto das condições térmicas de espaços adjacentes no conforto dos espaços avaliados pode ser elevado, pelo que se poderá concluir ainda que:
- Uma abordagem de concepção arquitectónica em que a organização das funções e a distribuição em planta, tenham em consideração um esforço de optimização das condições de conforto dos edifícios em estudo, poderá contribuir para um melhor desempenho energético e ambiental dos mesmos edifícios.

Capítulo 4

Conclusões

Foi desenvolvido o protótipo de um sistema computacional constituído, até ao momento, por quatro módulos, que se interligam entre si através de um ambiente de interacção comum designado por `common_Editor` (ver figura 2.1, página 51). Para além deste programa (página 51 e seguintes) - que faz a interligação do módulo comum com os restantes programas - foram desenvolvidos os seguintes módulos:

programa `e+_Editor`: Página 60 e seguintes;

programa `CAEd`: Página 71 e seguintes;

programa `RctCAD_v2`: Página 89 e seguintes;

O programa `common_Editor` permite organizar, num ambiente tridimensional, espaços arquitectónicos representados por esboços iniciais de uma volumetria em estudo.

Esta arquitectura do sistema desenvolvido visa permitir a utilização das definições geométricas e topológicas originalmente definidas para os outros módulos de avaliação térmica e acústica. Tendo sido já concluída essa capacidade de exportação para o caso do programa `e+_Editor`. Este programa, que pode também ser utilizado de forma independente do `common_Editor`, permite gerar de forma automática ficheiros de formato “idf”, que constitui o input do programa `EnergyPlus`, o qual por sua vez permite a realização de avaliações detalhadas do comportamento térmico de edifícios, designadamente avaliações de conforto térmico com base nos princípios adaptativos.

O programa desenvolvido para cálculo acústico de edifícios: com a designação de `CAEd`, permite realizar o cálculo de todos os parâmetros exigidos pelo `RRAE` e ainda tem a capacidade de exportar definições geométricas para o programa `CATT-Acoustics`, dado que com base no modelo tridimensional para realização do cálculo do tempo de reverberação num recinto fechado é possível gerar de forma automática o ficheiro (de formato “geo”) requerido pelo `CATT-Acoustics` para a mesma definição geométrica. Os cálculos acústicos realizados por este programa têm por base a norma

EN12354, partes 1, 2, 3, e 6.

O programa RctCAD_v2 - para verificação do RCCTE - desenvolvimento até uma fase de protótipo, estando contudo, todos os conceitos inerentes ao seu funcionamento resolvidos, importando aprofundar a sua aplicação a casos concretos.

Todos estes módulos estão desenvolvidos em linguagem Swi-PROLOG, que sendo uma linguagem de programação híbrida, permitiu a implementação das seguintes funcionalidades:

- desenvolvimento de rotinas segundo princípios de programação orientada por objectos (módulo XPCE), destinadas a execução de tarefas gráficas necessárias à visualização e percepção tri-dimensionais;
- desenvolvimento de rotinas segundo os princípios próprios dos sistemas baseados em conhecimento, com inclusão de automatismos que asseguram a consistência de algumas opções do utilizador, evitando incoerências de definições contraditórias, e simplificando a interface com o utilizador;
- desenvolvimento de rotinas de procura e outras tarefas recorrendo a estratégias do domínio da inteligência artificial que poderão ser utilizadas quer na procura de soluções construtivas de qualidade optimizada, quer na implementação de agentes que realizem tarefas de verificação de conformidades - regulamentares e outras.

A utilização prática dos protótipos e programa desenvolvidos permitiu demonstrar que:

- as avaliações realizam-se com grande rapidez permitindo que ocorram durante as fases de concepção arquitectónica enquanto o arquitecto estuda diferentes soluções formais:

Programa CAEd: a utilização dos princípios dos sistemas baseados em conhecimento, simplifica muito o trabalho, dado que o reconhecimento automático dos caminhos de transmissão marginal e a correspondente selecção das equações adequadas, para cada caso de arestas com ou sem desfasamentos, já se encontram devidamente declaradas no interior do programa.

Programa e+_Editor: o programa EnergyPlus impõe que para modelar um edifício sejam representadas as cotas a três dimensões de cada ponto de cada superfície. Trata-se de uma tarefa complexa e morosa. A transformação desta tarefa num exercício acessível para o projectista-utilizador, realiza-se através de um conjunto de comandos gráficos que geram volumes e superfícies tri-dimensionais, de forma muito rápida e apropriada do ponto de vista cognitivo, representando uma extraordinária poupança em termos do tempo e do esforço que pode ser colocado;

Programa RctCAD_v2: constitui uma versão estável mas ainda em desenvolvimento do que poderá vir a constituir um módulo completo do do sistema concebido, porém uma rotina baseada em técnicas de inteligência artificial para identificar de forma automática as formas a medir tendo presente a complexidade desta tarefa imposta pelo RCCTE é sem dúvida uma mais valia em termos da execução de projectos;

- Revelou-se evidente que a ocorrência de erros de projecto deverá reduzida de forma significativa uma vez que se partilha uma definição geométrica comum;
- Em face dos ensaios e simulações cuja avaliação se apresenta mais adiante revelou-se também muito importante a partilha de uma definição construtiva comum, a qual ainda não está totalmente implementada;
- Poderão ser encontradas soluções mais optimizadas em termos de todas as variáveis que é necessário cumprir, dado que será possível obter avaliações de desempenho ainda numa fase em que realizam os primeiros esboços geométricos. Assim a qualidade global das soluções arquitectónicas concebidas poderá melhorar significativamente.

4.1 Exemplo estudado

O caso de estudo apresentado revela bem as potencialidades associadas à disponibilidade de uma ferramenta como a que se apresenta, como forma de melhorar significativamente a forma de projectar tendo em conta as questões de conforto térmico e acústico em arquitectura. Considera-se, assim, que a abordagem proposta e o ambiente desenvolvido podem contribuir de forma significativa para melhorar a sustentabilidade dos edifícios em estudo.

Efectivamente, o desempenho térmico segundo o modelo do RCCTE e o desempenho Acústico segundo o modelo do RRAE, bem como o conforto térmico nos termos da norma EN 15251 são parâmetros de avaliação do nível de sustentabilidade dos edifícios pelo método do SBTool_Pt [33].

Com o objectivo de exemplificar as potencialidades e características do software desenvolvido foram realizadas avaliações acústicas e térmicas para um caso de estudo concreto.

O caso de estudo em apreço foi o de um “estudo prévio” realizado no âmbito de um concurso público internacional, para uma Escola Secundária a construir num terreno no concelho de Sesimbra, localizado perto do Loteamento da Quinta do Peru, sendo a designação da referida escola a de Escola Secundária da Quinta do Peru.

Escolheu-se um edifício escolar devido ao facto de se tratar de um problema arquitectónico em que é necessário conciliar elevadas exigências de desempenho acústico, com também elevadas exigências de desempenho em termos do conforto térmico.

4.1.1 Avaliação acústica

Uma síntese de todos os resultados das avaliações acústicas realizadas com o programa CAEd foi já apresentada na tabela 3.11, página 132.

Nestas avaliações torna-se patente que as soluções construtivas definidas cumprem sempre as condições mínimas de conforto definidas no RRAE.

A solução inicial contemplou a existência de uma duplicação constituída por um tecto falso em gesso cartonado (sem perfurações) formando uma caixa de ar de 50mm, contendo mantas em lã mineral no seu interior com 45mm de espessura sendo a melhoria de isolamento sonoro a sons de condução aérea $\Delta R_w = 8\text{dB}$ - figura 3.25, página 139.

Esta opção resultou num índice sonoro padronizado de isolamento sonoro $D_{nT,w} = 52\text{dB}$, sendo o valor obtido para o mesmo índice de um elemento construtivo sem a referida duplicação de $D_{nT,w} = 48\text{dB}$. Tendo em atenção que o RRAE preconiza que $D_{nT,w} \geq 45\text{dB}$ para o isolamento sonoro.

4.1.2 Avaliação de conforto térmico

Foram realizadas simulações com o programa EnergyPlus, tendo sido a envolvente do modelo realizada com base no programa e+_Editor.

Nas simulações seguiu-se uma metodologia de análise baseada na norma EN 15251 que diz respeito ao conforto adaptativo para edifícios ventilados de forma natural, conforme se apresentou no capítulo “Simulações de conforto térmico”, página 28.

Assim o parâmetro em avaliação para o Inverno é a temperatura operativa mínima que se verifica (ou lhe é superior) em 95% do tempo de ocupação dos espaços; sendo o parâmetro em avaliação para o Verão a diferença de temperatura operativa máxima que se verifica (ou lhe é inferior) em 95% do tempo de ocupação dos espaços (numa base horária).

As sínteses dos resultados das avaliações de conforto térmico foram já apresentadas: na tabela 3.16, página 153, para o conforto térmico no Inverno; e na tabela 3.17, página 153, para o conforto térmico no Verão.

Relativamente ao conforto térmico no Inverno, avaliaram-se três soluções arquitectónicas diferentes:

Solução base: conforme descrição em página 143 e seguintes;

Solução com espaço estufa: conforme descrição em página 145 e seguintes;

Solução com colectores a ar: conforme descrição em página 148 e seguintes.

Relativamente ao conforto térmico no Verão, avaliaram-se duas soluções arquitectónicas diferentes:

Solução base: Conforme descrição em página 151 e seguintes;

Solução com tubos enterrados: Conforme descrição em página 152 e seguintes.

Dos resultados obtidos com as simulações poder-se-á ainda concluir que:

- Apesar das complexas exigências de desempenho acústico e dos exigentes requisitos de renovação de ar foi possível conceber espaços arquitectónicos cujo desempenho real deverá permitir uma redução significativa das necessidades de utilização de meios mecânicos nos edifícios, bem como poderá permitir importantes poupanças energéticas nos edifícios que se venham a construir no futuro;
- Em muitos outros casos deverá ser possível conceber edifícios que atinjam níveis de conforto satisfatórios - nos termos da norma EN 15251 - e onde simultaneamente esses níveis de conforto sejam atingidos de forma natural e sem excesso de consumo de energia.

Como referido anteriormente, o caso de estudo apresentado revela bem o impacto da disponibilidade de um ambiente de projecto único em que o projectista é apoiado nas diversas tarefas de concepção e verificação de conformidade de edifícios, tendo em conta os principais elementos de conforto, em particular nas vertentes térmica e acústica.

Considera-se alcançado o principal objectivo da presente tese, ficando muito patente que, não só o apoio muito aprofundado ao dimensionamento e verificação em cada uma destas disciplinas pode ser significativamente melhorado por um ambiente como o proposto e concretizado experimentalmente, como a integração de cada um desses módulos num ambiente central permite elevar significativamente a disponibilidade do projectista para se concentrar nas tarefas mais nobres e de maior valor criativo.

4.2 Desenvolvimentos futuros

Para além de completar o desenvolvimento dos protótipos concebidos poderão ainda existir os seguintes desenvolvimentos:

- O programa e+_Editor de interface com o programa EnergyPlus atingiu um nível de desenvolvimento bastante satisfatório em termos dos objectos que permitem definir a envolvente, dos edifícios para estudo, em termos geométricos e construtivos. Porém, outros objectos que automatizem de forma mais rápida a construção de sistemas passivos, como o caso de tubos enterrados e de estufas ou permitam uma utilização do módulo AirFlowNetwork, representaria sem dúvida uma melhoria em termos de concepção de edifícios passivos;
- Outras interfaces com outros programas poderão ser desenvolvidas com o objectivo de partilharem, definições geométricas e construtivas com os desenvolvimentos do programa common_Editor, como por exemplo: o programa Radiance - que permite avaliações das condições de iluminação - ou um sistema para avaliação de ciclo de vida (SBTool_Pt ou Lider_A);
- Introdução de rotinas a jusante do sistema desenvolvido que procurem soluções construtivas ou introdução de agentes que percorram os ambientes representados e executem tarefas de revisão de projecto, verificando de forma automática - e com recurso a técnicas de Inteligência Artificial - a conformidade Regulamentar das soluções arquitectónicas em estudo;
- Introdução de rotinas a montante deste sistema que organizem os espaços em função do programa base definido e de restrições impostas pelo utilizador.

4.3 Benefícios do ambiente de programação adoptado

Bjarne Stroustrup [62], autor da linguagem C++ afirmou que cada nova linguagem de programação seguiu um dado paradigma . Assim esclarece que para diferentes objectivos e tarefas que queiramos representar através de programas informáticos deveremos escolher a linguagem cujo paradigma se adapte melhor a essa representação.

Se considerarmos a arquitectura uma disciplina que requer uma maior percentagem de raciocínios de síntese do que de análise, então uma linguagem de programação cujo paradigma seja declarativo e não imperativo, poderá estar mais próxima das necessidades do arquitecto, uma vez que permite escolher diferentes caminhos ou soluções perante um conjunto de premissas previamente representadas.

É precisamente pela facilidade de representação desse conhecimento e no facto de, uma vez representado usando o ambiente declarativo adoptado, se dispor automaticamente de um mecanismo de inferência (que permite tirar conclusões a partir do conhecimento representado), que a abordagem adoptada se revela muito adequada.

Uma linguagem como o PROLOG que permita “back-tracking” e não exclusivamente “forward-tracking”, está mais próxima de representar tarefas de avaliação qualitativa de diferentes soluções.

O ambiente desenvolvido introduz ainda uma novidade adicional - conforme referido na página 155 - na medida em que passa a permitir uma abordagem de concepção arquitectónica em que a organização das funções e a distribuição em planta, têm em consideração um esforço de optimização das condições de conforto térmico e acústico dos edifícios em estudo. Tal facto deriva também do esforço de adequação cognitiva que foi colocado na escolha criteriosa do tipo de objecto base que é definido no `common_Editor`: o “espaço”, o qual mais tarde se poderá agrupar em zonas térmicas, pares de espaços de emissão e recepção sonora, ou fracções autónomas, para dar resposta às necessidades dos diferentes módulos de avaliação.

O “espaço” foi escolhido porque ele é também a base a partir da qual o arquitecto organiza as funções e vai “esquiçando” diversas possibilidades para a forma final do edifício em projecto. Com este sistema o “esquiço” não é em papel, mas electrónico, permitindo adicionalmente a realização de avaliações de desempenho das formas em estudo.

Bibliografia

- [1] Christian Norberg-Shultz, 1976. *The Phenomenon of Place*, Architectural Association Quarterly 8, no. 4 (3-10)
- [2] Juhani Pallasmaa, 2005. *The eyes of the skin - Architecture and senses*, John Wiley & sons, West Sussex
- [3] Peter Zumthor, 2006. *Atmosferas*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona
- [4] Leo Beranek, 2003, *Concert Halls and Opera Houses - Music Acoustics and Architecture*
- [5] Susana Silva Pereira, 2010. *Tornar sensível a forma como somos tocados pelo mundo - Recensão crítica de "The eyes of the skin"*.
- [6] J. L. M. Hensen, 1990. *Literature review on thermal comfort in transient conditions*, Building and Environment, vol.25, no 4 pp.309-316.
- [7] P. O. Fanger, 1972. *Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill, New York.
- [8] D. A. McIntyre 1980. *Indoor climate*, Applied Science Publishers Ltd, London.
- [9] A.P. Gagge, A. P. Fobelets, L. G. Berglund, 1986. *A standard predictive index of human response to thermal environment* ASHRAE Transactions, vol 92:2B, pp 709-731, Atlanta GA
- [10] H. Hensel, 1981. *Thermoreception and temperature regulation*, Academic Press, London. Monographs of the physiological society, nr. 38
- [11] Pedro Martins da Silva, 1978. *Acústica de Edifícios*, LNEC - Informação Técnica de Edifício n.8, Lisboa.
- [12] Lawrence E. Kinsley, Austin R. Frey, Alan B. Coopers, James V. Sanders, 1982. *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, Monterey, California

- [13] P. O. Fanger, 1973. *Thermal Comfort*. McGraw-Hill Book Company.
- [14] Brian Lawson, 2001. *The Language of Space*. Architectural Press, Kent, Great-Britain 2005.
- [15] João Mariz Graça, 1999 *Desenvolvimento de um sistema pericial para o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Construção, Instituto Superior Técnico.
- [16] Empresa Autodesk; url: <http://usa.autodesk.com>
Programa AutoCAD,
url:<http://usa.autodesk.com/autocad/>
- [17] Programa ArchiCAD da empresa ArchiSoft.
url: <http://www.graphisoft.com/products/archicad/>
- [18] Programa Google sketchup.
url: <http://sketchup.google.com/>
- [19] Programa EnergyPlus.
url: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [20] Programa “Autodesk Ecotect Analysis”.
url: <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=12602821&siteID=123112>
<http://micrgraf.pt/comercial>
- [21] Programa Design Builder.
url: <http://www.designbuilder.co.uk/>
- [22] url: <http://www.swi-prolog.org>
- [23] Norme internationale ISO 7730. *Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique*. Organisation International de Normalization, Première édition, 1984.
- [24] European Standard EN 15251. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings - addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. CEN/TC 156, 2006.
- [25] Fergus Nicol, Mike Wilson, 2010. *An overview of the European Standard EN 15251*. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April 2010. London.

- [26] ASHRAE Standard 55 - *Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc. 1992, Atlanta.
- [27] C. E. A. Winslow, L. P. Herrington, A. P. Gagge, 1937. *Physiological reactions to environmental temperature*, Am J of Physiology, 120:1-22.
- [28] J. Fergus Nicol, M. A. Humphreys, 1973. *Thermal comfort as a part of a self regulatory system*, Building Research and Practice (Journal of CIB) 6 (3) págs. 191-197.
- [29] Richard J. de Dear, Gail S. Brager, 2002. *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to the ASHRAE standard 55*. Energy and Buildings, número 34 (2002), páginas 549-561.
- [30] J. Fergus Nicol, M. A. Humphreys, 2002. *Adaptive Thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. Energy and Buildings 34 pags. 563-572.
- [31] N. V. Baker, M. A. Standeven, 1995. *A behavioural approach to thermal comfort assessments in natural ventilated buildings*. Proceedings of CIBSE National Conference, Eastbourne. Chartered Institute of Building Service Engineers. Londres, pp 76-84.
- [32] M. A. Humphreys, James Fergus Nicol, 1973. *Clothing and comfort of secondary school children in summertime, Thermal comfort and moderate heat stress*. In Proceedings of the CIB commission WP45 (Human Requirements), HMSO págs 43-45.
- [33] Luís Bragança, Ricardo Mateus, 2009. *SBTOOL Pt, Ferramenta para a construção sustentável, Guia de Avaliação*. Edições iiSBE Portugal, Guimarães.
- [34] Norme Européenne 12354:2000. *Calcul de la performance acoustique de bâtiments à partir de la performance des éléments*, parties 1, 2, 3, et 6.
- [35] International Standard ISO 717-1. *Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation in buildings and of interior elements*. 1982.
- [36] International Standard ISO 140-7. *Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation*. 1978.

- [37] International Standard ISO 717-2. *Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation*. 1982.
- [38] International Standard ISO 140-8. *Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 8: Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a standard floor*. 1978.
- [39] International Standard ISO 3382. *Measurement of reverberation time in Auditoria*. 1975.
- [40] International Standard ISO 140-4. *Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms*. 1998.
- [41] Jan Wielemaker, Ango Anjewierden, 2001. *Programming in XPCE/PROLOG*,
url: <http://www.swi-prolog.org/download/XPCE/doc/userguide/userguide.pdf>
- [42] Luís Roriz e R. S. Duarte. *Redução energética através da climatização por efeito radiativo associada a sistemas de climatização a 2 tubos utilizando ventilo-convectores*. Url: http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/crad_2t.pdf
- [43] Martin Heidegger, 1977. *A origem da Obra de Arte*, Edições 70, Lisboa 2004.
- [44] Bengt-Inge Dalenbäck, 1998-2012. *CATT-Acoustic* - <http://www.catt.se>
- [45] João Mariz Graça, Jorge Viçoso Patrício e Luís Santos Lopes. 2011 *CAEd v1.04 - Cálculo Acústico de Edifícios. Manual de Utilização*.
url: http://www.caed.pt/Manual_CAEd/CAEd_UserManual.pdf
url do site de CAEd: <http://www.caed.pt/>
- [46] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. 2006. *Base de données du programme Acoubat v4.0.0*
- [47] Jorge Patrício, 2004, *A Acústica nos Edifícios*, 2ª Edição, Lisboa.
- [48] R. Josse, 1977. *Notions d'Acoustique: à l'usage des architectes, ingénieurs et urbanistes*, Eyrolles, Paris
- [49] Pedro Martins da Silva, 1998. *A componente acústica na reabilitação de edifícios de habitação*, Lisboa. LNEC - colecção Edifícios

- [50] João Mariz Graça, 1996. *Manual de Utilização do Programa RctCAD*. Lisboa, INETI - ITE. Ministério da Economia.
- [51] Carlos Pina dos Santos e Luís M. Cordeiro Matias, 2006, *Coefficientes de Transmissão Térmica da Envolvente dos Edifícios*, Lisboa. LNEC - ICT Informação Técnica de Edifícios - ITE 50.
- [52] Saint-Gobain Glass, 2008. *Manual do Vidro*. Editado por Saint-Gobain-Glass Portugal, Vidro Plano S.A.
- [53] Lawrence Berkeley National Laboratory. *programa informático Windows-6*. url:<http://windows.lbl.gov/software/>
- [54] Júlio Braga Correia da Silva, 1994. *Desenvolvimento de modelo de previsão do comportamento de uma parede em relação ao isolamento a sons aéreos* FEUP - Dissertação para obtenção do grau de mestre em Construção de Edifícios.
- [55] Paulo Mendonça. *Propriedades dos Materiais e sistemas de Fachadas, Anexo 1*. url:<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/4250/14/TeseDoutMendonca14.pdf>, acedido em 1 de Setembro de 2011.
- [56] Dinara Xavier da Paixão, Samir Nagi Yousri Gerges. *Influência de propriedades físico-mecânicas para a determinação da frequência de coincidência no isolamento sonoro de paredes de alvenaria*. url: <http://sumarios.org/sites/default/files/pdfs/3747-12624-1-pb.pdf>, acedido em 1 de Setembro de 2011.
- [57] Templeton, Duncan, 1993. *Acoustics in the Built Environment, Advice for the design team*, Butterworth, Oxford.
- [58] Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), 2002. *Acoubat sound software*. Url: http://dae.cstb.fr/en/fiches/preview.asp?id_fiche=28
- [59] Francisco Moita, 2011. *Energia Solar Passiva*, Argumentum, 2ª Edição. Lisboa.
- [60] J. A. Clarke, 1985. *Energy Simulation in Building Design*, Adam Hilger Lda.. Bristol.
- [61] Programa EnergyPlus, versão 6.0 - *Input Output Reference Manual*. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [62] Bjarne Stroustrup, 2001 *The C++ Programming Language*. Special Edition, AT&T, Addison-Wesley Longman Inc. Reading - Massachusetts