

QUANTIFICAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS ESCOLARES REABILITADOS EM FUNÇÃO DAS SOLUÇÕES DA ENVOLVENTE, DO CLIMA EXTERIOR E DAS CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

DAVID EDUARDO RIBEIRO MARTINS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas

JULHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À memória do meu Avô

"O futuro dependerá daquilo que fazemos no presente"

Gandhi

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, e com ele uma etapa importante da minha vida, quero manifestar os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para a sua realização, não podendo deixar de salientar:

Em primeiro lugar, ao Professor Vasco Peixoto de Freitas pelo enorme apoio, disponibilidade, paciência e pelas muitas horas que despendeu para esclarecer todas as dúvidas que foram surgindo ao longo destes meses de trabalho.

Ao Laboratório de Física das Construções da FEUP, em particular à Maria Francisca Cavaleiro Barbosa pelo apoio, disponibilidade e por todos os esclarecimentos dados para a melhor compreensão do Caso de Estudo e pelo seu modelo geométrico da escola realizado e cordialmente disponibilizado.

À minha família por todo o apoio e motivação dada em todos os momentos.

Por fim, a todos os meus amigos que mais direta ou indiretamente me inspiraram e me motivaram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A grande maioria do parque escolar português construída até finais do século XX encontra-se profundamente degradada. Mesmo atendendo à diminuição previsível do número de alunos, e que muitos edifícios escolares possam vir a encerrar, haverá ainda centenas de escolas em serviço e que necessitam de intervenções urgentes.

Através de inúmeros estudos realizados constatou-se que melhor conforto térmico e qualidade do ar interior permitem não só garantir melhores condições de saúde aos seus ocupantes, mas também melhor desempenho e aprendizagem. Atendendo ao elevado custo da energia, as condições de qualidade do ambiente interior terão de ser garantidas ao menor custo possível, ou seja, deve ser promovida a eficiência energética da envolvente dos edifícios reabilitados.

Atualmente existem incentivos à reabilitação de edifícios escolares destinados sobretudo ao 2º e 3º ciclos do ensino básico, mas as intervenções a realizar terão de prever investimentos reduzidos, pelo que o uso de soluções da envolvente eficientes, adequadas a cada clima e tipologia de edifício, será fundamental.

Verifica-se que existem poucos estudos científicos que apoiem os projetistas, dependendo as soluções adotadas muito da experiência de cada um noutros edifícios de serviços ou habitação. Surge assim, a necessidade de simular numericamente o desempenho higratérmico em regime dinâmico das variadas tipologias de edifícios escolares e de realizar um estudo de sensibilidade que aborde várias soluções de reabilitação.

Com efeito, nesta Dissertação será possível propor um conjunto de soluções de reabilitação de âmbito energético de edifícios da tipologia Brandão do Porto ou com climas semelhantes, assegurando um bom desempenho higratérmico ao menor custo, com informação cientificamente validada por *software* de simulação avançada.

Concretamente, a otimização energética dos diversos elementos da envolvente analisados conduzirá a uma diminuição do custo do consumo energético anual de aquecimento, por sala, de cerca de 800 €, resultando num custo final de aquecimento, necessário para manutenção de condições de conforto de inverno (20°C), de pouco mais de 120 € na solução reabilitada. Para a estação de “verão” não se prevê consumo energético de arrefecimento, dado as condições climáticas amenas e maior ventilação por abertura das janelas permitirem boas condições de conforto na maior parte do tempo, dispensando portanto sistemas mecânicos de arrefecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Reabilitação, Escolas, Eficiência Energética, Conforto, Soluções de Reabilitação

ABSTRACT

The vast majority of Portuguese school buildings built by the end of the 20th century are deeply degraded. Even taking into account the predictable reduction of the pupils number and that many school buildings may close, there will be hundreds of schools in service that require urgent intervention.

Through numerous studies it was found that better thermal comfort and indoor air quality ensure not only better health to its occupants but also better performance and learning quality. Given the high cost of energy in Portugal, the indoor environmental quality should be guaranteed at the lowest cost, and so means that energy efficiency should be promoted by improving buildings envelope on rehabilitation interventions.

Currently there are economic incentives to the rehabilitation of school buildings designed mainly to 2nd and 3rd cycles of basic Portuguese education, however future interventions will have to be done with less investments and will require the use of building envelope efficient solutions, suitable for every climate and building typology in Portugal.

It turns out that there are just a few scientific studies that may support the designers, which obliges the use of previous experiences regarding other service buildings and housing to apply new solutions. Thus, arises the need to simulate the hygrothermal performance in dynamic regime varied of the various types of school buildings and to conduct a sensitivity study to address various rehabilitation solutions.

In this Dissertation will be possible to propose a set of solutions as part of energy rehabilitation of Brandão buildings typology of the city of Porto or with similar climates, ensuring good hygrothermal performance at the lowest cost and with information scientifically validated by advanced simulation software.

In particular, the energetic optimization of the various envelope elements analyzed will result in a reduction in the cost of annual energy consumption for heating room about 800 €, resulting in a final cost of heating necessary for maintaining comfort conditions in winter time (20°C) around 120 € in the rehabilitated solution. For “summer” are not expected any cooling energy consumption given the mild weather conditions and increased ventilation conditions by opening the windows that allows good comfort conditions most of the time, eliminated so mechanical cooling.

KEYWORDS: rehabilitation, schools, energy efficiency, comfort, rehabilitation solutions

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	III
ABSTRACT	V

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3

2. REQUALIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS ESCOLARES	5
2.1. NOTA INTRODUTÓRIA	5
2.2. DEMOGRAFIA E POTENCIAL MERCADO DE REABILITAÇÃO	5
2.2.1. EVOLUÇÃO DEMOGRÁFICA DA POPULAÇÃO	5
2.2.2. ALUNOS E ESTABELECIMENTOS ESCOLARES	7
2.2.2.1. Previsões da evolução futura do número de alunos	7
2.2.2.2. Evolução do número de estabelecimentos escolares nos últimos anos	11
2.2.3. INCENTIVOS À REABILITAÇÃO	14
2.2.4. ANÁLISE CRÍTICA	15
2.3. ANÁLISE DAS PRINCIPAIS TIPOLOGIAS DE EDIFÍCIOS ESCOLARES	16
2.3.1. TIPIFICAÇÃO CONSTRUTIVA DOS PRINCIPAIS EDIFÍCIOS	16
2.3.2. RESPONSABILIDADES PELA GESTÃO DAS ESCOLAS	19
2.3.3. CUSTOS DE EXPLORAÇÃO E MANUTENÇÃO	19
2.3.3.1. Análise dos principais custos de exploração	19
2.3.3.2. Importância da manutenção das escolas	22
2.4. CONFORTO E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO	23
2.5. IMPORTÂNCIA DAS ZONAS CLIMÁTICAS NO ESTUDO DO CONSUMO ENERGÉTICO	26
2.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO	28

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO – CASO DE ESTUDO	29
3.1. NOTA INTRODUTÓRIA	29
3.2. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO EM REGIME DINÂMICO UTILIZADO - WUFI PLUS	31
3.2.1. POTENCIALIDADES DO PROGRAMA UTILIZADO E APRESENTAÇÃO DO MODELO A SIMULAR	31
3.2.2. DADOS CLIMÁTICOS	32
3.2.3. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO	34
3.2.4. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS	36
3.3. CARATERIZAÇÃO CONSTRUTIVA DA ENVOLVENTE	38
3.3.1. COBERTURAS	38
3.3.2. PAREDES EXTERIORES	39
3.3.3. VÃOS ENVIDRAÇADOS	40
3.3.4. PAVIMENTOS	42
3.3.5. SÍNTESE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS TÉRMICOS DOS ELEMENTOS DA ENVOLVENTE A UTILIZAR	44
3.4. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DA ENVOLVENTE	44
3.4.1. SOLUÇÕES A ANALISAR	46
3.4.2. PAVIMENTO	49
3.4.2.1. Simulações	49
3.4.2.2. Análise de resultados	52
3.4.3. COBERTURA	54
3.4.3.1. Simulações	55
3.4.3.2. Análise de resultados	60
3.4.4. PAREDES EXTERIORES	64
3.4.4.1. Simulações	65
3.4.4.2. Análise de resultados	67
3.4.5. VÃOS ENVIDRAÇADOS E PROTEÇÕES SOLARES	71
3.4.5.1. Simulações	72
3.4.5.2. Análise de resultados	77
3.4.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS	82
3.4.6.1. Solução técnico-energética para a envolvente	82
3.4.6.2. Influência da orientação	86
3.5. ANÁLISE ESTRATÉGIAS VENTILAÇÃO PARA A ENVOLVENTE OTIMIZADA	88
3.5.1. PROBLEMÁTICA E SIMULAÇÕES A EFETUAR	88

3.5.2. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO	91
3.5.2.1. Simulações	91
3.5.2.2. Análise de resultados	95
3.5.3. ANÁLISE CRÍTICA	99

4. RECOMENDAÇÕES PARA A REABILITAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS ESCOLARES

101

4.1. NOTA INTRODUTÓRIA	101
4.2. PRINCÍPIOS DA REABILITAÇÃO CONSTRUTIVA E REABILITAÇÃO FUNCIONAL	101
4.3. PROPOSTAS PARA A REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS DO TIPO BRANDÃO	102
4.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO	109

5. CONCLUSÕES

111

5.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS	111
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Estimativas (até 2012) e projeções da população residente em Portugal, 1991-2060 [1]	6
Fig.2 – Estimativas (até 2012) e projeções da população residente dos 0 aos 14 anos em Portugal, 1991-2060 [1]	6
Fig.3 – Estimativas da pirâmide etária em Portugal em 2012 e projeções para 2035 [1]	7
Fig.4 – Evolução do número de nados vivos em Portugal continental por regiões em relação ao ano 2000 em % [3]	8
Fig.5 – Previsão da evolução do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório, até ao ano letivo de 2020/21, em Portugal continental (adaptado de [4])	9
Fig.6 – Previsão da evolução do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório, até ao ano letivo de 2020/21, na região Norte, a NUTS II (adaptado de [4])	10
Fig.7 – Percentagem de alunos no ensino público português por ciclo de estudos [5]	10
Fig.8 – Estabelecimentos de educação e ensino, por natureza, em Portugal [6]	11
Fig.9 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos, por ciclo de ensino ministrado em Portugal [7]	12
Fig.10 – Estimativa do parque escolar não reabilitado, do 2º e 3º CEB e ES, por tipologia construtiva, na região Norte, a NUTS II (adaptado de [2])	13
Fig.11 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos tipo “Brandão” [10]	17
Fig.12 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos tipo blocos “3x3” [10]	18
Fig.13 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos tipo monobloco [10]	18
Fig.14 – Distribuição dos custos anuais (€/m ²) de uma amostra de 23 escolas relativamente à eletricidade (à esquerda) e gás (à direita) [adaptado de 29]	21
Fig.15 - Zonas climáticas de inverno (esquerda) e verão (direita) em Portugal continental [33]	27
Fig.16 – Fotografia aérea da escola (à esquerda) [23] e bloco a estudar (à direita)	29
Fig.17 – Planta tipo do bloco de aulas com sala a analisar (à esquerda) [23] e sala de aulas a estudar (à direita)	30
Fig.18 – Modelo da escola a simular (vistas norte e poente) e respetiva sala tipo a estudar [34]	31
Fig.19 – Resultados mais relevantes obtidos através da simulação numérica com o <i>WUFI PLUS</i> [adaptado de 37]	32
Fig.20 – Temperatura e humidade relativa do ar exterior anual do Porto utilizada no <i>WUFI PLUS</i> [34]	33
Fig.21 – Soma da radiação solar por orientação e inclinação anual no Porto utilizada no <i>WUFI PLUS</i> [34]	34
Fig.22 – Total ganhos internos mensais e anuais em kWh e kWh/m ²	36
Fig.23 – Menu de edição das propriedades do isolamento térmico a utilizar (XPS) do <i>WUFI PLUS</i> [34]	37

Fig.24 – Fachadas exteriores da sala: poente (à esquerda) e nascente retirada do pátio interior (à direita)	38
Fig.25 – Caracterização construtiva das coberturas de solução 1 utilizadas no modelo [34]	39
Fig.26 – Caracterização construtiva das coberturas de solução 2 utilizadas no modelo [34]	39
Fig.27 – Caracterização construtiva das paredes exteriores utilizadas no modelo [34]	40
Fig.28 – Caracterização dos vãos envidraçados utilizados no modelo [34]	41
Fig.29 – Fotografia do revestimento de piso do corredor de acesso à sala de aula (mosaico hidráulico) e da sala de aula propriamente dita (madeira).....	42
Fig.30 – Caracterização construtiva da solução de pavimento da sala de aula utilizada no modelo [34]	43
Fig.31 – Caracterização construtiva da solução de pavimento do corredor da sala utilizada no modelo [34].....	43
Fig.32 – Condições fronteira e resultados (resumo) da simulação com o <i>WUFI PLUS</i> [31]	45
Fig.33 – Matriz de sensibilidade das simulações principais a realizar, isolando o pavimento em 3 cm (parte 1)	47
Fig.34 – Matriz de sensibilidade das simulações principais a realizar, isolando o pavimento em 3 cm (parte 2)	47
Fig.35 – Perdas e ganhos energéticos pela envolvente exterior para a 1ª Simulação, no período de 1 ano inteiro (8760 horas), com o aquecimento normal durante o período de aulas	50
Fig.36 – Perdas e ganhos energéticos pela envolvente exterior para a 2ª Simulação, no período de 1 ano inteiro (8760 horas), com o aquecimento normal durante o período de aulas	50
Fig.37 – Perdas e ganhos energéticos pela envolvente exterior para a 3ª Simulação, no período de 1 ano inteiro (8760 horas), com o aquecimento normal durante o período de aulas	51
Fig.38 – Consumo energético anual, em kWh/m ² , de cada simulação para condições de conforto durante o período de aulas.....	52
Fig.39 – Perdas e ganhos energéticos anuais (8760 h), em kWh, pela envolvente exterior de todas as simulações apresentadas, com normal aquecimento durante o período de aulas	53
Fig.40 – Temperatura exterior e interior, em °C, para os casos de flutuação livre (aquecimento nulo) e estratégia de conforto mínimo de 20°C, para a semana completa da Tabela 20, e para a solução C6-P0-E1 da Fig.33.....	55
Fig.41 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C0-P0-E1	56
Fig.42 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C0-P0-E1	57
Fig.43 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P0-E1	57
Fig.44 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E1	58

Fig.45 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C10-P0-E1	58
Fig.46 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C10-P0-E1	59
Fig.47 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C15-P0-E1	59
Fig.48 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C20-P0-E1	60
Fig.49 – Percentis de 10% e mediana das temperaturas interiores de todas as simulações, em °C, em regime de flutuação livre e para o período de aulas (1365 h)	60
Fig.50 – Curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para todas as simulações	61
Fig.51 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h)	62
Fig.52 – Consumo energético anual, em kWh/m ² , de cada solução de isolamento da cobertura, para condições de conforto durante o período de aulas	63
Fig.53 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P4-E1	65
Fig.54 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P4-E1	66
Fig.55 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P8-E1	66
Fig.56 – Curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores, em °C, sem aquecimento, e durante o período de aulas, para todas as simulações de isolamento das paredes exteriores, mas mantendo uma espessura de 6 cm de isolamento da cobertura	67
Fig.57 – Percentis de 10% e mediana das temperaturas interiores das simulações de paredes exteriores, em °C, sem aquecimento, para o período de aulas, e adotando uma espessura de isolamento da cobertura de 6 cm	68
Fig.58 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h)	69
Fig.59 – Consumo energético anual, em kWh/m ² , de cada solução de isolamento de parede, para condições de conforto durante o período de aulas	70
Fig.60 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P0-E2/Cenário A	74
Fig.61 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E2/Cenário A	75
Fig.62 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E2/Cenário B	75

Fig.63 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P0-E3/Cenário A	76
Fig.64 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E3/Cenário A	76
Fig.65 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E3/Cenário B	77
Fig.66 – Percentis de 10% e mediana das temperaturas interiores das soluções da Tabela 28 e cenário A, em °C, sem aquecimento, para o período de aulas, e adotando uma espessura de isolamento da cobertura de 6 cm	77
Fig.67 – Curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores, em °C, sem aquecimento, e durante o período de aulas, para todas as simulações da Tabela 28 e cenário A, adotando uma espessura de 6 cm de isolamento da cobertura	78
Fig.68 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h).....	79
Fig.69 – Ganhos energéticos anuais apenas durante o período de aulas, em kWh/m ² , de cada solução de envidraçados e proteções solares e cenários A e B, para aquecimento durante o inverno	80
Fig.70 – Consumo energético anual, em kWh/m ² , de cada solução de envidraçados e proteções solares para os cenários A e B de utilização, com condições de conforto durante o período de aulas.....	81
Fig.71 – Matriz de sensibilidade das simulações realizadas (parte 1, incluindo seleção solução mais adequada).....	82
Fig.72 – Matriz de sensibilidade das simulações realizadas (parte 2)	82
Fig.73 – Perdas pelos vários elementos da envolvente exterior para a solução apenas de pavimento isolado (gráfico superior) e para a solução otimizada (gráfico inferior), no decurso de 1 ano inteiro (8760 h) e em kWh	85
Fig.74 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução de reabilitação otimizada (C6-P4-E3/Cenário A)	86
Fig.75 – Ganhos solares mensais durante o período de aulas (1365 h), em kWh, para cada orientação e utilizando a solução técnico-energética otimizada, com aquecimento durante o inverno	87
Fig.76 – Matriz de sensibilidade das simulações possíveis e aceitáveis do ponto de vista energético ou económico, incluindo solução de intervenção na envolvente mais adequada a verde	88
Fig.77 – Curvas de probabilidades acumuladas da HR interior durante as aulas, variando a ventilação	89
Fig.78 – Curvas de probabilidades acumuladas da concentração de CO ₂ interior durante as aulas, variando os caudais de ventilação	90
Fig.79 – Consumos energéticos mensal e anual “fixos” para manter condições de conforto durante as aulas	91

Fig.80 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)	92
Fig.81 – Perdas e ganhos mensais e anuais por ventilação (em kWh e kWh/m ²), durante o período de aulas (1365 h), e para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)	92
Fig.82 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)	93
Fig.83 – Perdas e ganhos mensais e anuais por ventilação (em kWh e kWh/m ²), durante o período de aulas (1365 h), e para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)	93
Fig.84 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m ²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)	94
Fig.85 – Perdas e ganhos mensais e anuais por ventilação (em kWh e kWh/m ²), durante o período de aulas (1365 h), e para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)	94
Fig.86 – Consumo energético anual, em kWh/m ² , de cada estratégia e cenário de ventilação, para condições de conforto durante o período de aulas	96
Fig.87 – Perdas e ganhos anuais por ventilação, em kWh/m ² , com condições de conforto durante o período de aulas, para as estratégias e cenários de ventilação estabelecidos	97
Fig.88 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h)	98
Fig.89 – Matriz de sensibilidade das simulações possíveis e aceitáveis do ponto de vista energético ou económico e resultados das estratégias de ventilação analisadas	99
Fig.90 – Caraterização construtiva da cobertura reabilitada sobre a sala de aula [34]	103
Fig.91 – Caraterização construtiva da cobertura invertida reabilitada sobre o corredor sala de aula [34]	104
Fig.92 – Vista geral da cobertura intervencionada da sala de aula e respetivo corredor (à esquerda), e pormenor da impermeabilização, isolamento térmico e respetiva proteção da cobertura invertida (à direita)	104
Fig.93 – Caraterização construtiva da parede exterior reabilitada, com aplicação de uma contra fachada [34]	105
Fig.94 – Exemplo de solução de envidraçados com vidro duplo existente na escola do Caso de Estudo	106
Fig.95 – Exemplos de soluções de proteções solares pelo exterior	106
Fig.96 – Corredor de circulação da sala em estudo, onde é visível a ligação física entre este e a sala de aula, bem como a necessidade de atravessar outras salas para se chegar à entrada	109

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Previsão do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório até ao ano letivo de 2020/21 em Portugal continental (adaptado de [4])	8
Tabela 2 – Previsão do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório até ao ano letivo de 2020/21 na região Norte a NUTS II (adaptado de [4])	9
Tabela 3 – Número de estabelecimentos de ensino público em Portugal e na região Norte a NUTS II, por ciclo de ensino, em 2015 (adaptado de [7])	12
Tabela 4 – Custos anuais de energia (€/m ²) para edifícios escolares do tipo Brandão [22], [23]	20
Tabela 5 – Custos anuais de energia (€/m ²) para edifícios escolares do tipo Blocos 3x3 [24],[25],[26]	20
Tabela 6 – Custos anuais de energia (€/m ²) para edifícios escolares do tipo monobloco [27], [28]	21
Tabela 7 – Intervalo de temperaturas operativas recomendadas com uma previsão de conforto térmico para 90% dos ocupantes [2]	24
Tabela 8 – Exigências de QAI em salas de aula segundo vária regulamentação [adaptado de 2]	25
Tabela 9 – Principais parâmetros e zonamento climático de cidades da região Norte [adaptado de 33]	27
Tabela 10 – Principais propriedades climáticas presentes nos ficheiros provenientes do TRY	33
Tabela 11 – Calendário escolar para 2018 estabelecido no modelo	35
Tabela 12 – Propriedades básicas dos materiais necessárias pelo <i>WUFI PLUS</i> (adaptado de [38]) ..	36
Tabela 13 – Propriedades complementares dos materiais necessárias pelo <i>WUFI PLUS</i> (adaptado de [38])	37
Tabela 14 – Caraterização construtiva das coberturas dos blocos de aulas (adaptado de [23])	38
Tabela 15 – Caraterização construtiva das paredes exteriores dos blocos de aulas (adaptado de [22] e [23])	40
Tabela 16 – Caraterização construtiva dos vãos envidraçados dos blocos de aulas (adaptado de [23])	41
Tabela 17 – Caraterização térmica (simplificada) dos elementos utilizados no modelo em estudo	44
Tabela 18 – Simulações a realizar para o estudo do pavimento	49
Tabela 19 – Poupança energética associada a cada simulação apresentada na Tabela 18 em relação ao modelo inicial do <i>WUFI</i>	52
Tabela 20 – Ocupação e dias de semana na 1ª semana completa do mês de janeiro de 2018	54
Tabela 21 – Simulações a realizar para o estudo da cobertura	56
Tabela 22 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno	61
Tabela 23 – Poupança energética associada a cada solução de isolamento da cobertura	63
Tabela 24 – Simulações a realizar para o estudo das paredes exteriores poente e nascente	64

Tabela 25 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno	68
Tabela 26 – Poupança energética associada a cada solução de isolamento e para cada tipologia de parede.....	70
Tabela 27 – Simulações a realizar para o estudo dos envidraçados e proteções solares	73
Tabela 28 – Cumprimento regulamentar das soluções de envidraçados e proteções solares utilizadas	73
Tabela 29 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno	78
Tabela 30 – Melhoria do “conforto de verão” associada a cada solução de envidraçados e proteções solares	80
Tabela 31 – Poupança energética associada a cada solução de envidraçados e proteções solares, incluindo-se a azul os cenários de utilização das proteções solares mais favoráveis.....	81
Tabela 32 – Consumo anual e poupança energética acumulada associada a cada solução de reabilitação dos elementos construtivos da envolvente exterior	84
Tabela 33 – Perdas de energia através da envolvente e poupança associada a cada solução de intervenção nos elementos construtivos da envolvente exterior, entre a solução base e otimizada....	84
Tabela 34 – Simulações a realizar para o estudo de estratégias de ventilação	91
Tabela 35 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno	98
Tabela 36 – Solução energeticamente otimizada da envolvente para cada elemento construtivo e respetivo cumprimento regulamentar	102
Tabela 37 – Custos anuais de aquecimento (€) de escolas Brandão para o clima do Porto ou semelhantes consoante o número de blocos de aulas, antes e após a intervenção de reabilitação, e a poupança anual obtida	108

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CO₂ – Dióxido de Carbono [ppm]

F_f – Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado

F_o – Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado

GD – Graus-Dias [°C]

g_T – Fator solar global do vão envidraçado com os dispositivos de proteção 100% ativados

g_{Tvc} – Fator solar global do vão envidraçado, constituído por vidro corrente, com os dispositivos de proteção 100% ativados

g_{⊥,vi} – Fator solar do vidro para uma incidência normal ao vão

HR – Humidade Relativa [%]

IDT – Indicador de Desconforto Térmico [°C.h]

R_{ph} – Renovações horárias (h⁻¹)

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [(m².K)/W]

R_{si} – Resistência térmica superficial interior [(m².K)/W]

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/m².K]

U_{bf} – Coeficiente de transmissão térmica médio de pavimentos em contato com o terreno [W/m².K]

U_{ref} – coeficiente de transmissão térmica de referência [W/m².K]

U_w – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado [W/m².K]

U_{wdn} – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado médio dia-noite [W/m².K]

λ – Condutividade térmica do material [W/m.°C]

AVAC – Equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CCDRn – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte

CEB – Ciclo do Ensino Básico

DGEEC – Direção Geral de Estatísticas da Educação e Ciência

DGEstE – Direção Geral dos Estabelecimentos Escolares

EPE – Empresa Parque Escolar

EPI – Indicador de Performance Energética

ES – Ensino Secundário

IEA – Agência Internacional da Energia

LFC – Laboratório de Física das Construções

ME – Ministério da Educação

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

ppmv – partes por milhão por volume

PTPC – Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção

QAI – Qualidade do Ar Interior

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH – Regulamento de Desempenho Térmico dos Edifícios de Habitação

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização nos Edifícios

TRY – Test Reference Year

XPS – Poliestireno Expandido Extrudido

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Em meados da década passada constatou-se que a grande maioria do parque escolar português construída até ao final do século XX se encontrava profundamente degradada e não estava adaptada às exigências da sociedade atual, principalmente a nível de conforto e das condições adequadas para uma boa qualidade de aprendizagem. Com a preocupação de tentar solucionar o problema e permitir que os nossos jovens possam aprender num ambiente atrativo e confortável foi criada em 2007 a EPE – Empresa Parque Escolar que se destinou ao apoio à concretização de muitas intervenções nos edifícios escolares destinados sobretudo ao ensino secundário.

No entanto, no passado recente uma forte crise económica e financeira levou a que o trabalho até então realizado tivesse de sofrer restrições na quantidade das intervenções realizadas e no respetivo custo, tendo a certa altura o programa sido interrompido. Por outro lado, as soluções aplicadas não conduziram aos melhores resultados. Ainda assim, muito trabalho há a ser feito, e mesmo atendendo à diminuição expectável do número de alunos nos variados ciclos de ensino, devido à diminuição do número de jovens atual e previsível para os próximos anos, e que consequentemente um número significativo de estabelecimentos escolares possa vir a encerrar num futuro próximo, haverá ainda muitas escolas que se manterão em serviço e necessitam de obras de reabilitação urgentes.

Através de inúmeros estudos realizados comprovou-se que melhores condições térmicas e de qualidade do ar interior, nomeadamente uma temperatura adequada ao longo do ano e ventilação adequada que permita garantir níveis não demasiado elevados de concentração de poluentes (principalmente do CO₂) e humidade relativa, permitem não só que se garantam boas condições de saúde dos ocupantes, mas sobretudo que haja um maior desempenho escolar e consequentemente uma aprendizagem mais eficaz. Por outro lado, atendendo a questões económicas relacionadas com o elevado custo energético atual tem de existir a preocupação de garantir as condições de qualidade do ambiente interior adequadas ao menor custo possível, ou seja, deve ser promovida a eficiência energética.

Da necessidade conjunta de reabilitação dos edifícios escolares e de garantir condições de conforto interiores e uma elevada eficiência energética destes nasce a necessidade de reabilitação energética aliada à reabilitação construtiva/funcional que os edifícios degradados necessitam com vista a garantir melhores condições de utilização.

Na atualidade começa a ressurgir a preocupação da concretização efetiva da reabilitação dos edifícios escolares como um investimento estratégico, agora voltada sobretudo para intervenções nas escolas do 2º e 3º ciclos do ensino básico, até agora não intervencionadas, e existem já incentivos à sua reabilitação provenientes de fundos europeus e do Orçamento de Estado para a Educação. No entanto, as difi-

culdades financeiras ainda estão presentes e o país terá de intervir em centenas de escolas com uma estratégia de investimento mais reduzida.

As novas intervenções nas escolas, com estratégias de investimento mais reduzido, devem promover a adoção de soluções que otimizem o desempenho térmico aplicadas aos muitos edifícios a reabilitar, para cada tipologia construtiva e para as reais condições de utilização. Dada a escassa informação cientificamente validada que apoie os projetistas na tomada das decisões mais eficientes de reabilitação para as condições de utilização específicas de um edifício escolar face a outros edifícios de serviços, esta escolha depende ainda muito da experiência de cada um noutros tipos de edifícios. Surge assim, a necessidade de simular numericamente o desempenho higratérmico em regime dinâmico das variadas tipologias de edifícios escolares e de realizar um estudo de sensibilidade que aborde várias soluções de reabilitação com vista à obtenção da solução que permita as maiores vantagens no binómio custo-benefício para cada tipologia e para os vários climas.

Assim, será possível propor um conjunto de soluções de reabilitação de âmbito energético dos vários edifícios escolares, assegurando um bom desempenho higratérmico ao menor custo e com informação cientificamente validada por *software* de simulação avançada, pretendendo este trabalho dar alguns contributos para a tipologia de edifício escolar Brandão e para climas semelhantes ao do Porto.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

O âmbito desta Dissertação centra-se no estudo de edifícios escolares da tipologia Brandão a reabilitar, recorrendo-se a um modelo geométrico-tipo de um edifício escolar da mesma tipologia na cidade do Porto e que constitui o Caso de Estudo deste trabalho, modelo esse realizado no âmbito de uma Tese de Doutoramento na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e disponibilizado para apoio à realização da presente Dissertação. Relativamente aos edifícios do tipo Brandão serão analisadas várias soluções de reabilitação para o clima do Porto, sendo objeto de estudo principal a simulação numérica e interpretação do desempenho higratérmico de um conjunto de soluções de reabilitação dos elementos da envolvente exterior definidos numa matriz de sensibilidade estabelecida, e na obtenção de uma solução técnico-energética otimizada para com base nessa solução propor recomendações e estratégias de reabilitação para edifícios escolares da tipologia em estudo.

Com base no referido, foram definidos um conjunto de dois objetivos principais e outro de objetivos complementares com vista à sua concretização.

Os objetivos principais são os seguintes:

- Desenvolver um estudo de sensibilidade que permita avaliar a influência de várias soluções de reabilitação da envolvente exterior (coberturas, fachadas e vãos envidraçados) nas condições de conforto e no consumo de energia para as condições de utilização corrente;
- Com base no estudo numérico de simulação higratérmica anterior, obter uma solução técnico-energética otimizada para a envolvente exterior e propor recomendações e estratégias para a reabilitação de edifícios escolares da tipologia Brandão.

Para a concretização dos objetivos principais estabeleceram-se os seguintes objetivos complementares:

- Analisar a evolução demográfica da população jovem, em Portugal e em especial para a região Norte, para obter previsões da evolução futura do número de alunos e das necessidades futuras de estabelecimentos escolares e do potencial de reabilitação do parque escolar português;
- Investigar os incentivos à reabilitação de edifícios escolares portugueses, em especial para os destinados ao 2º e 3º ciclos do ensino básico;

- Analisar as principais tipologias de edifícios escolares, bem como quem gere as variadas escolas, e os respetivos custos de exploração com energia;
- Estudar e sintetizar os elementos essenciais relacionados com o conforto térmico e qualidade do ar interior, bem como a importância da eficiência energética e das condições de utilização particulares dos edifícios escolares;
- Avaliar a importância do desenvolvimento de projetos de reabilitação específicos para cada zona climática e nesse âmbito da correção de eventuais projetos tipo do passado;
- Avaliar e caracterizar o programa *WUFI PLUS* e as suas potencialidades mais relevantes, caracterizar o clima a utilizar no estudo numérico, as condições de utilização dos edifícios escolares e as soluções da envolvente existentes e utilizadas no modelo a simular;
- Definir as condições de simulação higrotérmica adotadas e realizar as simulações mais relevantes previstas na matriz de sensibilidade e o seu respetivo tratamento e análise (avaliação da variação da temperatura em regime de flutuação livre, estimativa do sobreaquecimento e avaliação do consumo energético mensal e anual);
- Adicionalmente, estudar o efeito de estratégias de ventilação no consumo energético e no conforto na estação de arrefecimento, ambos para o período de aulas.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente Dissertação divide-se em cinco capítulos:

- O capítulo 1 realiza o enquadramento do trabalho a realizar, resume os seus objetivos e apresenta a organização da Dissertação;
- No capítulo 2 apresentam-se os aspetos mais relevantes associados aos edifícios escolares portugueses e ao seu comportamento em serviço. Assim, serão abordados a evolução demográfica da população, a previsão da evolução futura do número de alunos e a consequente necessidade futura de estabelecimentos escolares e potencial mercado de reabilitação, bem como os incentivos existentes à sua reabilitação; estabelecida a tipificação construtiva dos principais tipos de edifícios escolares, de quem é responsável pela sua gestão e dos principais custos de exploração, a nível de recursos energéticos; e realizada uma síntese dos aspetos principais relacionados com o conforto térmico, a qualidade do ar interior, a eficiência energética, as condições de utilização e a importância da realização de projetos de reabilitação adaptados às condições climáticas de cada região;
- No capítulo 3 é apresentado o Caso de Estudo e realizada toda a simulação numérica e sua análise para a obtenção dos objetivos definidos. Assim, serão abordadas as potencialidades do programa de simulação higrotérmica avançada utilizado, a descrição dos dados climáticos utilizados, as condições de utilização definidas e as propriedades higrotérmicas requeridas pelo programa; realizada a caracterização construtiva da envolvente (coberturas, paredes exteriores, vãos envidraçados/proteções solares e pavimentos) e das condições de simulação estabelecidas; estabelecido um estudo de sensibilidade das soluções de reabilitação de cada elemento da envolvente exterior, realizadas as simulações, sua análise e discussão; feita a síntese da simulação realizada e a discussão da solução otimizada obtida para a envolvente e para as várias orientações principais; e realizadas reflexões e um pequeno estudo das estratégias de ventilação passíveis de serem adotadas para a solução otimizada obtida, abordando as respetivas condições de conforto, qualidade do ar interior e consumo energético da solução de reabilitação proposta;
- No capítulo 4 são feitas recomendações para a reabilitação térmica de edifícios escolares da tipologia Brandão. Com efeito, com base nas conclusões obtidas no capítulo 3, descreve-se

primeiramente o enquadramento da estratégia de reabilitação a propor, para seguidamente se descrever em detalhe as recomendações a adotar na reabilitação de cada elemento da envolvente. São ainda discutidas, de uma forma mais geral, os sistemas passíveis de serem adotados, nomeadamente de aquecimento, arrefecimento e ventilação, e indicados os custos para aquecimento de uma escola-tipo não reabilitada e reabilitada com as soluções propostas;

- O capítulo 5 resume as principais conclusões e indica perspetivas de desenvolvimentos futuros no âmbito da reabilitação dos edifícios escolares e da importância da simulação higrotérmica para a validação das soluções a adotar.

2

REQUALIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS ESCOLARES

2.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Este capítulo está estruturado em quatro partes principais, nas quais se pretende apresentar uma visão geral sobre os conceitos mais importantes para a compreensão dos edifícios escolares e sua necessidade de reabilitação, e do estudo desenvolvido no presente trabalho.

Numa primeira parte pretende-se inicialmente fazer uma breve reflexão sobre as previsões para a evolução demográfica da população portuguesa, para seguidamente enquadrar a problemática da evolução do número de alunos do 2º e 3º ciclos do ensino básico (CEB) e ensino secundário (ES) e verificar as necessidades futuras de estabelecimentos escolares, com ênfase na região Norte, concluindo-se com a apresentação dos principais incentivos à reabilitação de edifícios escolares existentes atualmente e a implementar num futuro próximo.

Numa segunda parte pretende-se tipificar, por tipologias construtivas principais, os edifícios escolares existentes no parque escolar da zona Norte, bem como referir as entidades responsáveis pela gestão das escolas e os principais encargos com a exploração e manutenção dos edifícios escolares para as tipologias estabelecidas.

Na terceira parte pretende-se enquadrar a problemática do conforto térmico e necessidade de reabilitação energética dos edifícios escolares, bem como apresentar as suas especificidades, nomeadamente descrever as condições de utilização em serviço que servirão de base para o estudo de simulação numérica que será apresentado e desenvolvido no capítulo seguinte.

Por último, na quarta parte deste capítulo será justificada a necessidade de intervenções que visem melhorar o desempenho higrotérmico específicas para cada região climática através da apresentação das zonas climáticas previstas na regulamentação portuguesa.

2.2. DEMOGRAFIA E POTENCIAL MERCADO DE REABILITAÇÃO

2.2.1. EVOLUÇÃO DEMOGRÁFICA DA POPULAÇÃO

A população residente em Portugal tenderá a diminuir, entre 2012 e 2060, quer no que diz respeito ao país inteiro (Fig.1), quer para a região Norte, independentemente do cenário considerado no estudo mais recente sobre a evolução demográfica da população do Instituto Nacional de Estatística [1].

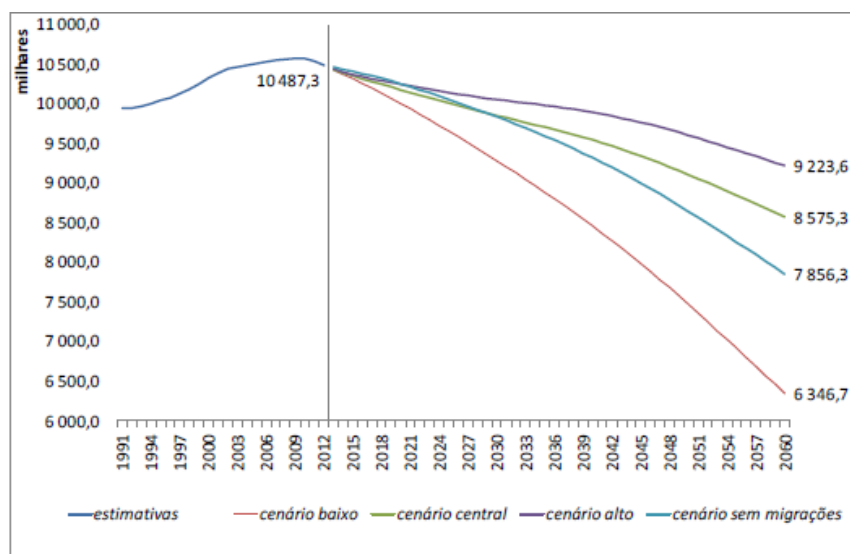


Fig.1 – Estimativas (até 2012) e projeções da população residente em Portugal, 1991-2060 [1]

De acordo com o mesmo estudo, são também expectáveis alterações na estrutura etária da população por um lado, com o consequente acréscimo do forte envelhecimento demográfico no país e em todas as regiões portuguesas, a NUTS II, e por outro, ao decréscimo da população jovem, nomeadamente pessoas com menos de 15 anos de idade (Fig.2).

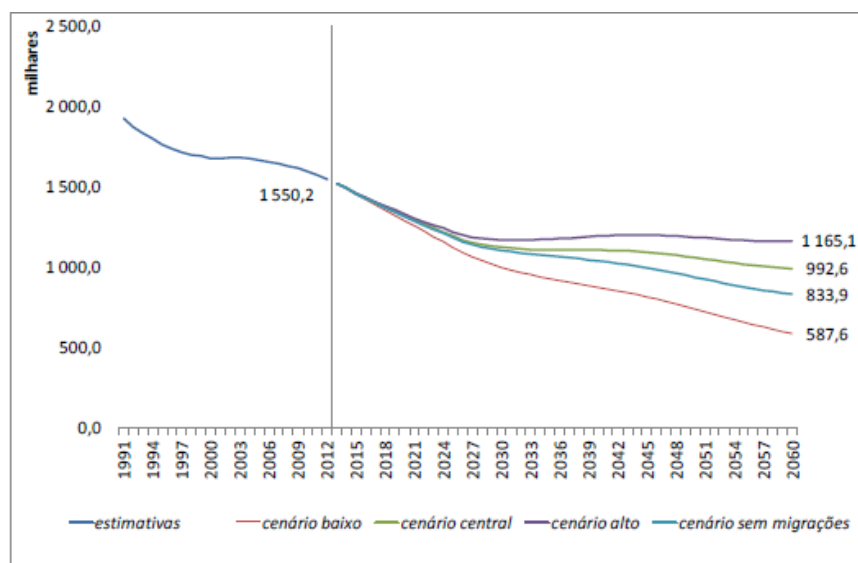


Fig.2 – Estimativas (até 2012) e projeções da população residente dos 0 aos 14 anos em Portugal, 1991-2060 [1]

Efetivamente, o decréscimo da população jovem irá refletir-se na menor quantidade de alunos no sistema de ensino público português e por consequência, em necessidades de estabelecimentos de ensino distintas das atuais e que merecem uma análise mais detalhada nos subcapítulos seguintes. De notar que na região Norte, a NUTS II, a quantidade de jovens até aos 15 anos entre 2012 e 2060 pode decrescer segundo as projeções [1] de 535 720 jovens em 2012 para valores entre os 174 568 jovens no cenário baixo e 348 365 jovens no cenário alto, pelo que as alterações no número de alunos e escolas serão inevitáveis.

Na Fig.3 apresentam-se as projeções para a população portuguesa por faixas etárias para o ano de 2035, sendo já possível verificar as tendências referidas anteriormente no que diz respeito à diminuição da população jovem em contraponto com o aumento da população idosa, para o período de estudo compreendido entre 2012 e 2060.

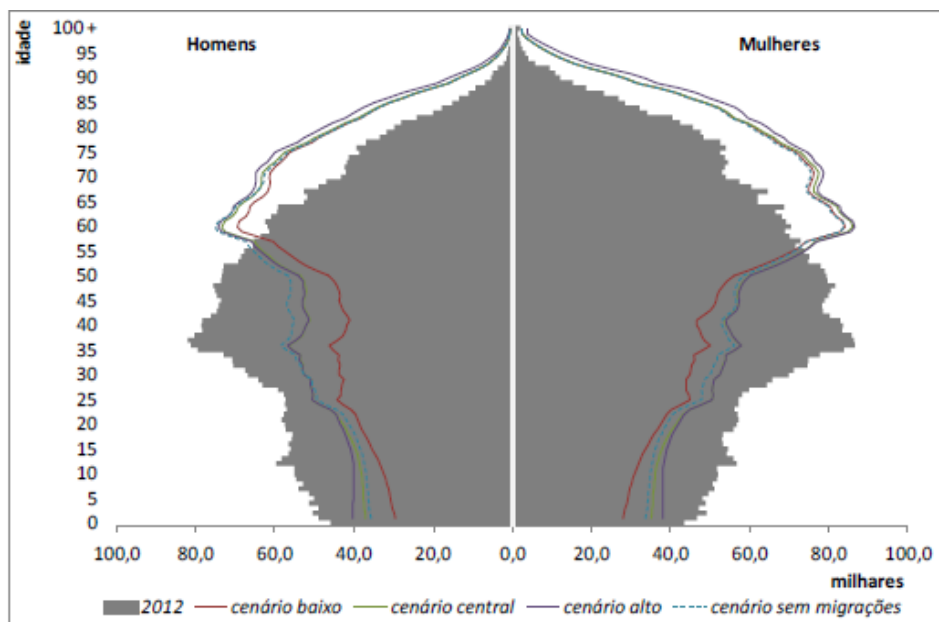


Fig.3 – Estimativas da pirâmide etária em Portugal em 2012 e projeções para 2035 [1]

2.2.2. ALUNOS E ESTABELECIMENTOS ESCOLARES

2.2.2.1. Previsões da evolução futura do número de alunos

No passado recente a lei nº 85/2009 alterou o regime de escolaridade obrigatória dos nove anos, ou seja, até ao final do 3º CEB, para o final do ensino secundário, ou pelo menos até ao momento do ano escolar em que o aluno perfaça 18 anos, independentemente do ciclo de estudos que tenha concluído. Com efeito, esta lei estabeleceu a obrigatoriedade de todos os alunos que se matricularam no 7º ano de escolaridade e anteriores no ano letivo de 2009/10 terem de cumprir as novas regras de escolaridade obrigatória, implicando desse modo que apenas em 2014/2015 se generalizou o alargamento da escolaridade obrigatória até ao final do ensino secundário [2].

Atualmente, a escolaridade obrigatória até ao final do ensino secundário está já generalizada, como referido, pelo que ao aumento recente do número de alunos associado ao alargamento da escolaridade obrigatória segue-se agora a diminuição do número de alunos devido à quebra acentuada da natalidade que leva à diminuição da população jovem até aos 15 anos, manifestada na pirâmide etária da Fig.3 do subcapítulo anterior, como já analisado.

De modo a perceber melhor as dinâmicas da evolução do número de alunos nos vários ciclos do sistema educativo português, por regiões, apresentam-se na Fig.4 a quantificação da evolução do número de nados vivos por regiões entre 2001 e 2013.

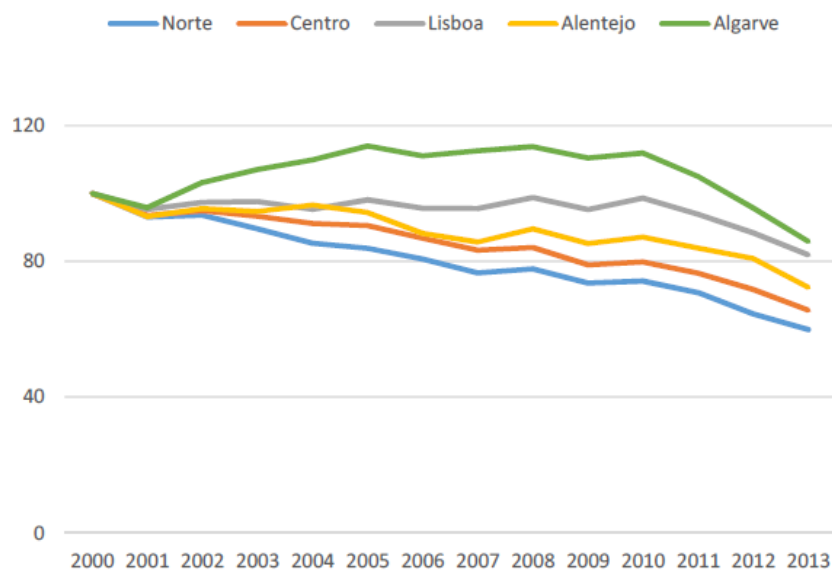


Fig.4 – Evolução do número de nados vivos em Portugal continental por regiões em relação ao ano 2000 em % [3]

Ao analisar a Fig.4 verifica-se que embora a tendência demográfica geral no fim de 2013 seja de decréscimo populacional em todas as regiões, esta tem ritmos diferentes de região para região, sendo que no Algarve o decréscimo no número de nados vivos é o menos acentuado (cerca de 4%), enquanto a região Norte é a mais afetada com o decréscimo referido a situar-se nos 36%. Este verifica-se praticamente ao longo de todo o período em que os registos foram analisados, salvo raras exceções em que o saldo é ligeiramente superior ao do ano anterior em que este se verifica.

De acordo com os dados públicos mais recentes da DGEEC (Direção-Geral de Estatísticas da Educação e Ciência), publicados em 2016, com dados referentes ao ano letivo de 2014/2015 provenientes de relatórios sobre as Estatísticas da Educação da mesma entidade, os resultados das previsões da evolução do número de alunos em Portugal continental, por ano letivo e por ciclo de estudos encontram-se na Tabela 1 e representadas na Fig. 5.

Tabela 1 – Previsão do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório até ao ano letivo de 2020/21 em Portugal continental (adaptado de [4])

Ano letivo							
Ciclo	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21
2º EB	219 485	216 660	213 201	207 439	205 639	202 944	200 109
3º EB	347 165	343 864	340 900	336 665	330 804	324 424	319 514
ES	341 365	345 811	347 999	350 572	348 229	344 875	341 022
Total (2º CEB – ES)	908 015	906 335	902 100	894 677	884 671	872 244	860 644

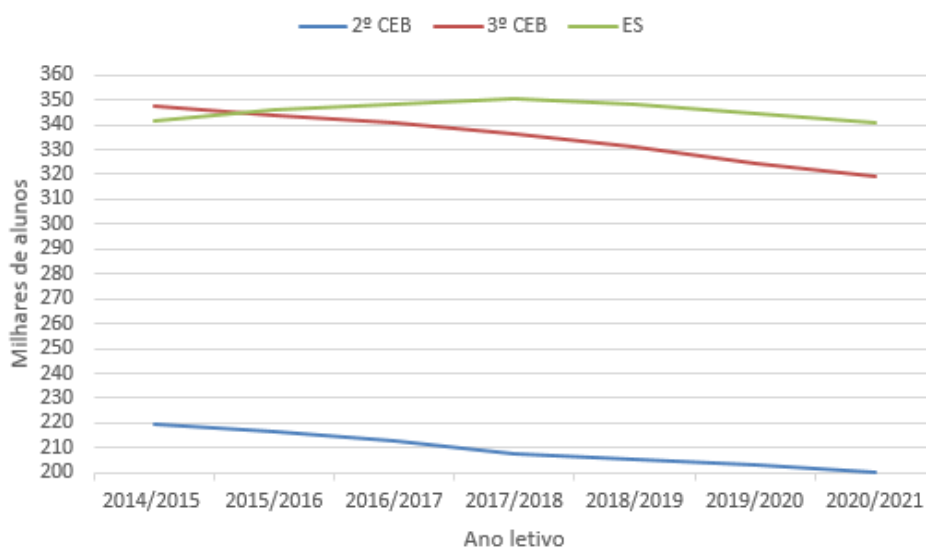


Fig.5 – Previsão da evolução do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório, até ao ano letivo de 2020/21, em Portugal continental (adaptado de [4])

Com base na análise da figura e tabela anteriores verifica-se para Portugal continental um decréscimo do número de alunos no 2º e 3º CEB, ao invés de uma subida no ensino secundário que se verificará até ao próximo ano letivo. Prevê-se que posteriormente, no período analisado, o número de alunos no ensino secundário comece a seguir uma tendência de queda ligeira, após aumento expressivo ao longo dos últimos anos durante o período de alargamento da escolaridade obrigatória até esse nível de ensino, que tem servido como atenuante até 2014/2015 face ao decréscimo da população jovem.

Mais especificamente em relação à região Norte a NUTS II, que conforme se verificou pelos dados do número de nascimentos será a região que tenderá a sofrer o maior decréscimo no número de alunos, são apresentadas as previsões quantitativas e a médio prazo para o número de alunos nos vários ciclos de estudos. Estas encontram-se representadas na Tabela 2 e na Fig.6.

Tabela 2 – Previsão do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório até ao ano letivo de 2020/21 na região Norte a NUTS II (adaptado de [4])

Ciclo	Ano letivo						
	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21
2º EB	79 597	77 002	74 761	71 713	70 138	68 647	67 075
3º EB	132 757	129 858	126 717	122 702	118 618	114 466	111 312
ES	131 494	133 345	133 982	134 453	132 018	128 800	125 060
Total (2º CEB – ES)	343 848	340 205	335 460	328 868	320 774	311 913	303 447

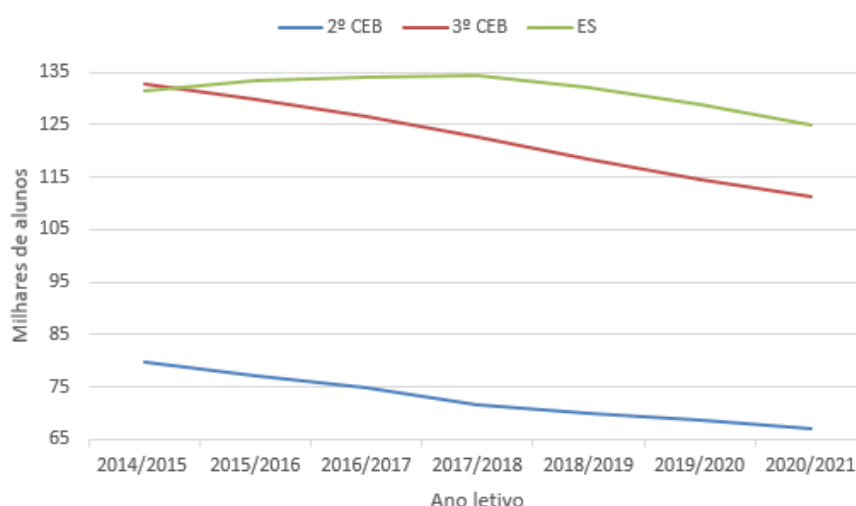


Fig.6 – Previsão da evolução do número de alunos por ciclos do ensino obrigatório, até ao ano letivo de 2020/21, na região Norte, a NUTS II (adaptado de [4])

Com base na análise da figura e tabela anteriores verifica-se na região Norte um decréscimo acentuado na população estudantil do 2º e 3º CEB, tal como no resto do país, sendo a região Norte onde esta diminuição de alunos tende a ser maior pelo número de nascimentos na última década ter vindo a decrescer mais acentuadamente nesta região. Ao invés, no ensino secundário prevê-se um aumento do número de alunos até ao ano letivo de 2017/2018 tendendo posteriormente a seguir a tendência de queda associada aos ciclos de ensino dos alunos mais jovens dado que serão estes que no futuro ocuparão este nível de ensino.

Outro aspeto relevante consiste em saber a percentagem de alunos que frequentam o ensino público e o ensino privado, visto a gestão das primeiras pertencer ao domínio público, conforme será descrito num subcapítulo posterior, e das segundas pertencer ao domínio privado e estar fora do âmbito deste trabalho. Assim, de acordo com dados estatísticos sobre o ano letivo de 2014/2015 a informação sobre a distribuição de alunos no domínio público encontra-se sintetizada na Fig. 7.

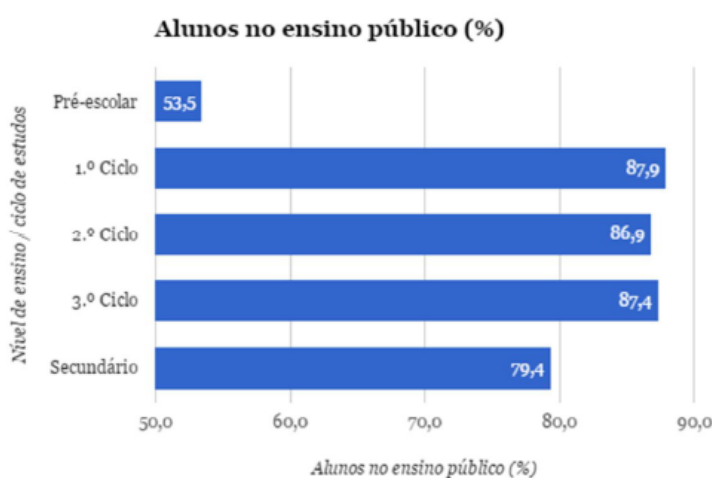


Fig.7 – Percentagem de alunos no ensino público português por ciclo de estudos [5]

De acordo com a Fig.7, em relação aos 2º e 3º CEB e ensino secundário, conclui-se que a maior parte dos alunos se encontra matriculado no ensino público, com percentagem mais baixa no ensino secundário. Pode deste modo verificar-se que as tendências observadas para a globalidade dos alunos representam com fiel aproximação a tendência que se prevê vir verificar na população estudantil do ensino público.

No entanto há que ter em conta vários aspetos que influenciam mais ou menos diretamente a percentagem de alunos no ensino público, genericamente, fatores de índole económico e financeiro das famílias, políticas governativas e educativas de âmbito mais geral e acesso à rede de escolas públicas existentes no período analisado numa determinada região são os mais relevantes e que podem fazer variar as percentagens apresentadas.

2.2.2.2. Evolução do número de estabelecimentos escolares nos últimos anos

Convém agora contrapor o decréscimo que se prevê que venha a acontecer com a redução da população estudantil nos variados ciclos de ensino com a evolução do número de estabelecimentos escolares nos últimos anos e aferir tendências da sua evolução no futuro.

De acordo com um estudo recente da DGEEC, a evolução do número de estabelecimentos de educação e ensino em Portugal entre 2000/01 e 2014/15, por natureza de ensino (público ou privado) encontra-se representado na Fig.8.

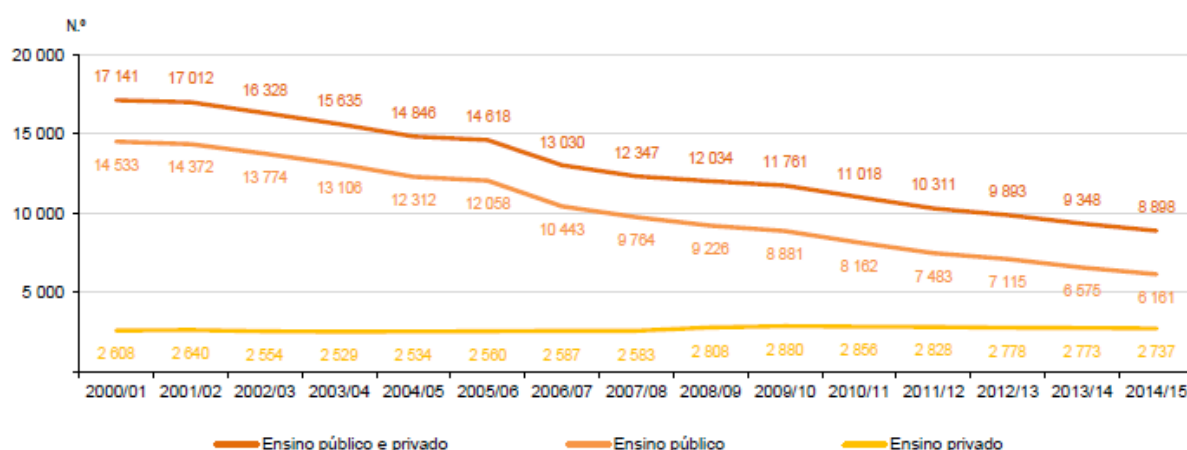


Fig.8 – Estabelecimentos de educação e ensino, por natureza, em Portugal [6]

De acordo com a Fig.8, o número de escolas do ensino privado aumentou ligeiramente, ao invés do número de escolas públicas que decresceu para menos de metade em 2014/15 em relação às existentes no início do milénio.

Devido a na Fig.8, na linha referente às escolas do ensino público terem sido incluídos todos os ciclos de ensino, a tendência de decréscimo que acompanhou a diminuição do número de alunos pode não se refletir uniformemente em todos os ciclos, pelo que convém analisar a evolução de cada ciclo em particular, conforme a informação da PORDATA, ente 1993 e 2015, presente na Fig.9.

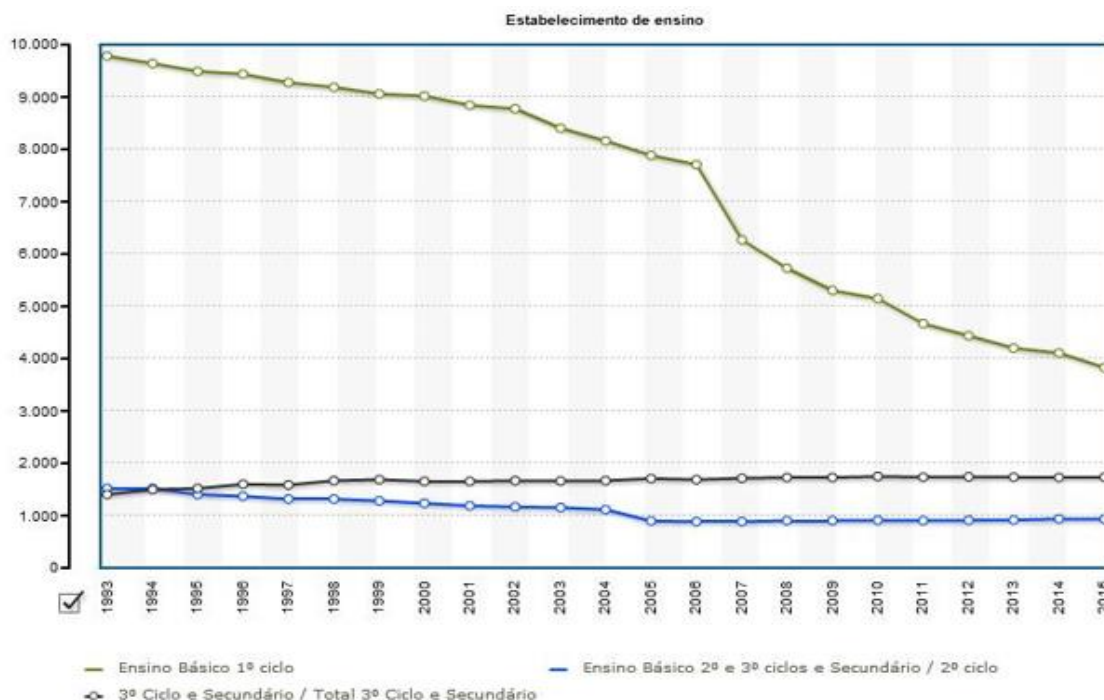


Fig.9 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos, por ciclo de ensino ministrado em Portugal [7]

Através da comparação entre as Fig.8 e Fig.9 pode-se constatar que o decrescimento no número de escolas públicas da Fig.8 deve-se sobretudo ao decrescimento acentuado ao longo do tempo das escolas que ministram o 1º CEB (curva a verde), tendo sido este mais abrupto entre 2006 e 2007. Quanto às escolas que ministram o 2º CEB (curva azul) houve um pequeno decrescimento em 22 anos enquanto que, o conjunto das escolas que ministram o 3º CEB e o ensino secundário tiveram um leve crescimento ainda antes do início do milénio e estabilizaram até ao presente, mesmo tendo-se verificado no início da 2ª década um aumento do número de alunos provocado pelo alargamento da escolaridade obrigatória.

O número de estabelecimentos de ensino público em Portugal e na região Norte, por ciclo de ensino em 2015, encontram-se na Tabela 3. De notar que de acordo com os dados da PORDATA, cada estabelecimento de ensino é contado tantas vezes quantas o número de ciclos que ministra pelo que o número de escolas total do 1º CEB ao ensino secundário não corresponderá à soma aritmética dos ciclos parciais da Tabela 3.

Tabela 3 –Número de estabelecimentos de ensino público em Portugal e na região Norte a NUTS II, por ciclo de ensino, em 2015 (adaptado de [7])

Âmbito Geográfico		
Ciclo	Região Norte (NUTS II)	Portugal
1º EB	1 338	3 832
2º EB	309	929
3º EB	384	1 154
ES	199	584

No que diz respeito às necessidades futuras de estabelecimentos escolares haverá um excedente de recursos e/ou número de escolas em todos os níveis de ensino, pelo que o encerramento ou reestruturação do parque escolar edificado será inevitável [2].

Deste modo, não serão necessárias construir mais escolas no país, salvo necessidades específicas de cada região relacionadas com a distância entre os alunos e as escolas, mas sim reabilitar o parque escolar edificado que se encontra degradado.

De acordo com um trabalho apresentado num caderno de síntese tecnológica da Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC) sobre a estratégia para a reabilitação em Portugal [8], das cerca de 1200 escolas existentes no 2º e 3º CEB e no ensino secundário, cerca de 1000 não foram intervencionadas. Ao mesmo tempo, com a evolução negativa do número de alunos, já analisada, estima-se que cerca de 140 possam mesmo vir a encerrar ou a ser reestruturadas até 2022, sendo portanto imprescindível reabilitar nos próximos anos mais de 800 escolas de acordo com o mesmo estudo. No que respeita ao investimento público necessário e admitindo o custo unitário de 500 €/m² o potencial de reabilitação, para todo o país, será da ordem dos 2,5 mil milhões de euros. Importante contudo referir que estes dados são estimativas e remetem para a necessidade de um estudo mais aprofundado.

Quanto à região Norte estão presentes 394 escolas públicas que lecionam pelo menos um dos ciclos de ensino compreendido entre o 2º CEB e o ensino secundário, estimando-se em cerca de 323 as escolas que não foram ainda intervencionadas e que necessitam de reabilitação construtiva [2]. Apresentam-se na Fig.10 as escolas da região Norte não intervencionadas por tipologias construtivas, segundo estimativas de 2014.

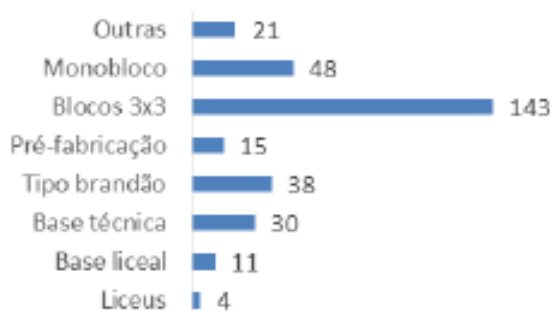


Fig.10 – Estimativa do parque escolar não reabilitado, do 2º e 3º CEB e ES, por tipologia construtiva, na região Norte, a NUTS II (adaptado de [2])

Das 323 escolas não intervencionadas na região Norte, estima-se que cerca de 50 possam vir a encerrar ou a ser reconvertidas até 2022, por forma a haver um maior equilíbrio de recursos face à procura em número de alunos existente. Deste modo, aproximadamente 280 escolas terão de ser mantidas em funcionamento e possivelmente necessitam de obras de reabilitação construtiva e de conforto do ambiente interior. Admitindo um custo de reabilitação construtiva, conforme já referido, de 500 €/m², será necessário um investimento público para a reabilitação deste parque escolar de aproximadamente 785 milhões de euros só na região Norte [2].

2.2.3. INCENTIVOS À REABILITAÇÃO

Na última década, de forma a promover a requalificação do parque escolar português, foi criado um programa de modernização que visava a intervenção nas escolas do ensino secundário. Com efeito, o “Programa de Modernização do Parque Escolar destinado ao Ensino Secundário” foi lançado por Resolução de Conselho de Ministros no início de 2007 e foi criada uma entidade responsável pela implementação e operacionalização do programa de modernização dos edifícios escolares, a designada EPE – Empresa Parque Escolar [9].

O programa de modernização referido tinha como objetivos fundamentais a recuperação e modernização dos edifícios escolares, a abertura da escola à comunidade e a criação de um sistema eficaz de gestão dos edifícios escolares [9]. Através dos referidos objetivos de âmbito mais geral pretendia-se, entre muitos outros aspetos, melhorar as condições de habitabilidade e de conforto ambiental visando a melhoria das condições higrotérmicas, acústicas e de qualidade do ar interior (QAI) com vista à obtenção de uma maior sustentabilidade e uma maior eficiência energética dos edifícios intervencionados.

De acordo com a Inspeção Geral das Finanças, o custo unitário por área de construção envolvido nas intervenções da Parque Escolar foi de 877 €/m² [2] e, tendo em conta a conjuntura internacional de crise económica e financeira que se tem verificado na última década o programa sofreu várias reformulações de modo a tornar os custos mais adequados face às disponibilidades financeiras atuais, através de alargamentos de prazos de intervenção, até que a determinada altura ocorreu a extinção do programa da EPE destinado às escolas secundárias.

Do exposto anteriormente, resulta que a questão da reabilitação do parque escolar português é uma necessidade atual relevante que está longe de estar concretizada com a aplicação do referido programa pois, para além de este não abranger a totalidade das escolas secundárias a necessitar de intervenções, ele também não abrangeu os outros edifícios escolares destinados aos vários ciclos do ensino básico com problemas e anomalias que põe em causa o seu correto funcionamento. Desta forma, as escolas que terão de ser tidas em conta, a curto prazo, em futuros projetos de reabilitação serão as secundárias não englobadas no programa da Parque Escolar e as escolas básicas do 2º e 3º ciclos [10].

Mais recentemente, através do acordo de parceria adotado entre Portugal e a Comissão Europeia, o PORTUGAL 2020, definem-se princípios de programação que consagram a política de desenvolvimento económico, social e territorial a promover em Portugal, entre 2014 e 2020, através da aplicação de fundos estruturais e de investimento comunitários na ordem dos 25 mil milhões de euros até 2020 [11]. No seguimento do PORTUGAL 2020 foi criado em 2014 [11] o programa operacional de âmbito regional NORTE 2020, que em colaboração com CCDRn – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte visa a aplicação dos fundos europeus através de políticas com vista à melhoria da competitividade da região Norte.

Com efeito, através do Programa de Investimento de Proximidade, de âmbito regional, pretende-se prosseguir a requalificação/modernização das instalações de educação dos ensinos básico e secundário, colmatando situações deficitárias e melhorando as condições de ensino e aprendizagem, através da intervenção nas escolas a necessitar de reabilitação/modernização e/ou não objeto de intervenção em programas de requalificação anteriores, nomeadamente as escolas de 2º e 3º ciclo do ensino básico e do ensino secundário que transitam do período de programação 2007-2013 da PE [12].

Foram definidos como valores de investimento máximo, financiados por fundos europeus e provenientes do Orçamento de Estado para a Educação e das Autarquias, até 2020, cerca de 131 milhões de euros para a região Norte (valor deduzido de reservas de desempenho), sendo a área metropolitana do

Porto a que mais poderá beneficiar, com quase 48 milhões de euros. De notar que no aviso de apresentação de candidaturas para a requalificação dos edifícios escolares, admite-se um prazo máximo de 24 meses (2 anos) a partir da assinatura do termo de aceitação/contrato para a conclusão das intervenções [12].

No que se refere aos atuais incentivos à reabilitação no território nacional, foi anunciado no ano passado pelo atual Ministro da Educação que vários municípios vão assinar acordos com o Governo para a modernização de 200 escolas, tendo sido já concretizados até este ano mais de 100 acordos, num investimento total de 200 milhões de euros que envolvem maioritariamente fundos europeus no que se refere a escolas que estavam mapeadas nos fundos do PORTUGAL 2020 [13] e [14].

2.2.4. ANÁLISE CRÍTICA

Conforme se verificou, ao longo dos tempos houve uma alteração da estrutura etária da população, com o crescente envelhecimento da população idosa e a crescente diminuição de população jovem, o que contribui para a diminuição do número de alunos a frequentar o sistema de ensino português e à necessidade de reformulação ou encerramento de edifícios escolares menos frequentados e em que o custo/benefício para a população sejam muito elevados.

No que se refere à previsão da diminuição da necessidade de estabelecimentos escolares, por diminuição do número de alunos foram já apresentados valores aproximados do número de estabelecimentos a encerrar, sempre dependentes de decisões do poder político local e do Governo contudo, se queremos saber as reais necessidades de reabilitação não chega a previsão do número de escolas a encerrar, é preciso fazer um levantamento do estado de conservação de cada escola de cada região. A par disso, não existem registos públicos das tipologias de escolas existentes, mas apenas informação sobre a localização e tipo de ensino ministrado em cada escola pública.

Dado muitas escolas resultarem de planos tipos característicos de determinados períodos temporais, a sua tipificação construtiva seria o primeiro passo a realizar para se saber a dimensão aproximada e fundamentada do potencial parque escolar a reabilitar, para seguidamente estabelecer um plano tipo de intervenção, com base em anomalias observadas em diferentes escolas da mesma tipologia, que servisse de base para uma margem de orçamentação razoavelmente aproximada das reais necessidades de reabilitação. Seguidamente, e após uma definição do investimento financeiro a colocar em prática conforme a disponibilidade financeira em cada momento, um estudo mais aprofundado deveria ser seguido de forma a averiguar o estado de conservação de cada escola em particular para desse modo realizar os estudos e planos necessários para tornar os orçamentos mais realistas e realizar intervenções de forma planeada e com o custo de reabilitação mais adequado às reais necessidades de cada estabelecimento escolar.

Relativamente à estratégia de reabilitação dos edifícios escolares surgem algumas questões relativamente à variação de custos de reabilitação envolvidos ao longo do tempo. Aquando da Empresa Parque Escolar as intervenções rondavam um valor de 877 €/m². Através de uma solução mais económica de 500 €/m², adotada na reabilitação de um caso de estudo [2], e estimando cerca de 800 escolas (do 2ºCEB ao ensino secundário) a reabilitar em Portugal continental obteve-se um investimento previsto de 2,5 mil milhões de euros [8]. Atualmente, decorre o programa de “investimento reduzido” previsto no PORTUGAL 2020 de 200 milhões para 200 escolas básicas de 2º e 3º ciclos.

Efetivamente, em média cada intervenção da Parque Escolar rondou os 15 milhões de euros [15] enquanto a do atual programa prevê 1 milhão por escola, ou seja, substancialmente mais barato mesmo as escolas reabilitadas pela Parque Escolar terem sido sobretudo secundárias com áreas próximas dos

15000 m² e as do 2º e 3ºCEB a reabilitar atualmente rondem cerca de 6000 m². Se por um lado este valor bastante mais baixo pode parecer uma melhoria, a qualidade da intervenção corre o risco de poder vir a ser significativamente inferior (e inferior ao desejável), e apressada, associado ao prazo máximo de 2 anos para a conclusão das empreitadas.

Daqui, a questão fundamental que se coloca é sobre a disparidade de valores entre os vários modelos. Ou seja, será que, por um lado, se estava no passado com a Parque Escolar a reabilitar criando escolas com condições consideradas demasiado elevadas para um país em dificuldades financeiras e sem ter em conta as reais condições de conservação das escolas que possivelmente não seriam tão más (cerca de 53% do investimento por escola foi dedicado a construção nova, sobrando apenas 47% para reabilitação [16])? Ou, por outro, com as preocupações económicas e a pressão para a reabilitação de edifícios escolares ao custo mais baixo estaremos a realizar apenas intervenções minimalistas, com menor qualidade, apressadamente, com pouca durabilidade e que num futuro a curto prazo grande parte das anomalias se voltem a manifestar? Na verdade, a reabilitação mais adequada poderá levar a um custo intermédio entre ambos os modelos, a determinar com base em estudos aprofundados a desenvolver por todo o país sobre a caracterização construtiva e levantamento das necessidades reais de reabilitação de cada estabelecimento escolar, por tipologias de estabelecimentos de ensino.

2.3. ANÁLISE DAS PRINCIPAIS TIPOLOGIAS DE EDIFÍCIOS ESCOLARES

2.3.1. TIPIFICAÇÃO CONSTRUTIVA DOS PRINCIPAIS EDIFÍCIOS

Os edifícios escolares são locais muito importantes, onde se dá a formação cívica e pedagógica às nossas crianças e aos nossos jovens, preparando-os para no futuro poderem exercer uma cidadania ativa e produtiva na nossa sociedade.

Em Portugal, a atual rede pública de escolas integra um vasto conjunto de edifícios que vai desde imóveis com reconhecido valor patrimonial do século XIX e XX, como o caso dos Liceus Históricos, até aqueles que foram construídas a partir do final da década de 60, com base em projetos tipificados, de forma a darem resposta rápida à expansão da rede escolar, por um lado devido ao alargamento da escolaridade obrigatória, e mais tarde, na década de 80, devido às migrações provenientes das ex-colónias portuguesas [10].

Segundo a atual organização escolar, as escolas são designadas em função do grau de ensino que ministram, podendo abranger vários níveis, ciclos e modalidades de ensino [17]:

- Escola Básica do 1º Ciclo (EB1) – 1º CEB (1º ao 4º anos de escolaridade);
- Escola Básica do 2º Ciclo (EB2) – 2º CEB (5º e 6º anos de escolaridade);
- Escola Básica do 3º Ciclo (EB3) – 3º CEB (7º ao 9º anos de escolaridade);
- Escola Secundária Geral (ES) – Ensino Secundário (10º ao 12º ano de escolaridade com vista ao prosseguimento de estudos no ensino superior);
- Escola Secundária Tecnológica (EST) – idem anterior;
- Escola Secundária Artística (ESA) – idem anterior;
- Escola Profissional (EP) – 10º ao 12º e visa a preparação para o mercado de trabalho ao mesmo tempo que permite concluir a escolaridade obrigatória;
- Escola Básica dos 1º e 2º CEB (EB1,2);
- Escola Básica dos 2º e 3º CEB (EB2,3);
- Escola Básica Integrada (EBI) – 1º, 2º e 3º CEB;
- Escola Básica dos 2º e 3º CEB com ES (EB2,3/ES);
- Escola Secundária com 3º CEB (ES/EB3);

Face à grande diversidade de edifícios escolares é frequente encontrar na bibliografia a sua divisão por três épocas temporais distintas nomeadamente, aquelas que correspondem ao período de construção até 1939, as que correspondem ao período de 1940 até 1968 e as restantes, que correspondem às construídas a partir de 1968 [9].

Pelas razões já apresentadas, de forma a poder garantir uma rede de escolas que cobrisse todo o país, foi no último período, ou seja, de 1968 em diante, que se construíram inúmeros edifícios escolares. Para se ter uma ordem de grandeza, refira-se que mais de 75% das atuais escolas com ensino secundário foram construídas nos últimos 35 anos, e grande parte na década de 80 [10].

Por este motivo, apenas serão sinteticamente abordadas no presente trabalho as escolas correspondentes ao último período, ou seja, as escolas posteriores a 1968. Destas será dada especial relevância às escolas básicas de 2º e 3º CEB, das tipologias construtivas mais frequentes, nomeadamente as escolas do tipo Brandão, do tipo pavilhonar/blocos “3x3” e monobloco, não existindo atualmente uma quantificação objetiva por tipologias em documentos oficiais

A partir de 1968 foram estudados pela Direção-Geral das Construções Escolares planos de construção de estabelecimentos escolares, de que resultaram programas funcionais diversificados constituídos por soluções de elevada rapidez e economia de execução, de escolas normalizadas do tipo pavilhonar que se adaptavam a diferentes contextos de inserção e condições locais, entre as quais se incluía um programa tipo de escola preparatória designada tipo “Brandão” [10]. São constituídas por conjuntos de duas unidades elementares, destinadas ao ensino e aos espaços coletivos, iguais em termos estruturais e que se podem associar de diferentes modos com ligações cobertas entre si. Concretamente, a tipologia “Brandão” (Fig.11) apresenta um bloco administrativo e de serviços com piso e meio e blocos de aulas com um piso de planta retangular e pátio central descoberto [2].



Fig.11 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos tipo “Brandão” [10]

A partir da década de 80 desenvolveu-se o projeto tipo blocos “3x3” (Fig.12), com recurso a sistemas de construção industrializada e incorporando pré-fabricação leve e pesada, resultando da evolução dos projetos de finais da década de 60. Este baseia-se num módulo dimensional da sala de aula de planta quadrada com 50 m², desenvolvendo-se em blocos também quadrados com a dimensão mais comum de 22 m por 22 m com um ou dois pisos, autónomos e normalizados, e ligados ou não através de galeias cobertas. Construtivamente, os pavilhões são constituídos por uma estrutura porticada pilar-viga de betão armado e lajes maciças ao nível do 1º piso e cobertura [10].



Fig.12 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos tipo blocos “3x3” [10]

O conhecimento adquirido relativo aos projetos tipificados de tipologia pavilhonar é transferido para as direções regionais que os continuam a aplicar para resolver situações de escolas novas, evoluindo-se dessa forma, na década de 90 e por razões tecnológicas, para o projeto tipo monobloco (Fig. 13). Os monoblocos variam construtivamente, existindo soluções construtivas de estrutura porticada de betão armado com lajes de betão armado maciças, soluções pré-fabricadas, e estruturas de pilares e lajes fungiformes alveolares. A nível das fachadas, estas são preenchidas por panos de alvenaria de tijolo rebocados e pintados com os elementos de betão aparente, e com vãos envidraçados em caixilharia de madeira ou de alumínio. As coberturas podem ser planas ou inclinadas revestidas a telha cerâmica [2].



Fig.13 – Estabelecimentos de educação e ensino públicos tipo monobloco [10]

Muitas destas escolas não tiveram a manutenção adequada ao longo do tempo, levando a inúmeras patologias e problemas construtivos decorrentes do seu uso. Por outro lado, elas não estão adaptadas às exigências atuais, decorrentes não só de novas formas de aprendizagem que implicam a modernização das escolas, mas também, e visto que os projetos tipo apenas alteravam em função de características locais relacionadas com a sua morfologia e não tinham em conta as condições climáticas em que se inseriam, estão desajustados do ponto de vista das exigências de conforto e eficiência energética [10] e [16].

Desta forma, é necessário reabilitar inúmeros edifícios escolares, conforme já discutido amplamente no subcapítulo anterior, de forma a melhorar as condições de utilização, permitindo assim, uma melhoria significativa para as condições de saúde, uma melhor aprendizagem e condições de habitabilidade. Simultaneamente, pretende-se garantir o conforto dos utilizadores, a eficiência energética, a durabilidade das soluções e a sustentabilidade da exploração dos edifícios escolares [10].

2.3.2. RESPONSABILIDADES PELA GESTÃO DAS ESCOLAS

Para se efetuar as obras de reabilitação, requalificação e modernização dos edifícios escolares, em particular os do 2º e 3º CEB e escolas secundárias, importa saber a quem pertence a responsabilidade pela sua gestão e manutenção.

Em 2008, resultado de políticas públicas com o objetivo de promover a descentralização ou territorialização em matéria de educação, foi publicado o Decreto-Lei n.º 144/2008, de 28 de julho [18], em que o Governo descentraliza parte das competências do Ministério da Educação, através da DGEstE (Direção-Geral dos Estabelecimentos Escolares), para as delegar nos órgãos de poder local, nomeadamente as autarquias, de forma a aproximar a educação da população local.

Com efeito, com a aplicação do referido Decreto-Lei (na sua 9ª versão e última [19]) estabelece-se o “quadro de transferência de competências para os municípios em matéria de educação”. Assim, as autarquias que possuam Contrato de Execução com o Ministério da Educação (artigo 2º) passam a ter competências em matéria de Educação relativamente ao pessoal não docente do ensino básico, ao fornecimento de refeições e apoio às atividades do 1º CEB, à ação social nos 2º e 3º CEB e à gestão do parque escolar do 2º e 3º CEB (visto que todas as escolas do 1º CEB, independentemente de possuírem contrato de associação são já geridas pelos municípios – DL 147/97).

No que concerne às atribuições de construção, manutenção e apetrechamento de estabelecimentos de ensino definidas no artigo 8º [18], estas estarão financiadas pelas autarquias com Contrato de Execução com os próprios fundos da autarquia e com apoios financeiros do Ministério da Educação, estabelecidos em portaria para cada ano letivo. As atribuições definidas anteriormente estendem-se também, de acordo com o mesmo Decreto-Lei, às escolas secundárias em que sejam ministrados um ou mais ciclos do ensino básico, ou seja, é também possível a gestão de parte de escolas secundárias pelos municípios mediante celebração de contrato específico para essa situação com o Ministério da Educação.

Em suma, a gestão das escolas básicas do 1º ciclo pertence às autarquias de cada município, as escolas básicas do 2º e 3º ciclo podem ter uma de duas formas de gestão, a gestão pelo Ministério da Educação (ou seja, centralizada), ou a gestão pela Autarquia em que a escola se insere (gestão descentralizada ou territorializada), no caso de possuir contrato de Execução com o Ministério da Educação. No caso das escolas secundárias a grande maioria é gerida pelo Ministério da Educação havendo a possibilidade de algumas poderem ser geridas pelas autarquias no caso em que integrem ciclos do ensino básico mediante contrato especial.

2.3.3. CUSTOS DE EXPLORAÇÃO E MANUTENÇÃO

2.3.3.1. Análise dos principais custos de exploração

Tanto a avaliação energética de um edifício escolar, como o estudo dos seus consumos de água são importantes instrumentos de gestão do funcionamento em serviço das escolas. No âmbito desta Dissertação apenas serão abordados os consumos energéticos.

Os edifícios escolares são edifícios de serviço que apresentam características de funcionamento particulares e muito bem definidas. Funcionam geralmente os cinco dias úteis da semana, havendo interrupção no seu funcionamento a cada final de semana, e iniciando-se a sua utilização, para um regime laboral, ao início da manhã e terminando ao final da tarde. A sua ocupação é muito variável, existindo espaços onde se verifica um constante funcionamento, como o caso dos serviços administrativos; espaços com muitas horas de ocupação embora intermitentes, como o caso das salas de aula, laboratórios

e pavilhões gimnodesportivos; e espaços com ocupação perfeitamente irregular, como as casas de banho [20].

A eficiência energética é uma preocupação fundamental na reabilitação e utilização dos edifícios escolares, não só pelos elevados custos de exploração gerados por consumos energéticos mais elevados, mas principalmente pelas preocupações ambientais ligadas à sustentabilidade do planeta e à crise energética mundial que se verifica nos últimos tempos.

Com efeito, a IEA (International Energy Agency) estabelece no seu *Annex 53* a preocupação em quantificar os consumos energéticos globais dos edifícios e no estabelecimento de medidas da sua *performance* energética. Para o efeito, parte do princípio que o consumo energético pode ser afetado de diversos modos pelos seguintes fatores [21]:

- Clima;
- Envolvente passiva do edifício;
- Sistemas do edifício (caso dos sistemas de aquecimento e ventilação);
- Gestão e Manutenção do edifício;
- Hábitos de uso e ocupação;
- Condições ambientais interiores.

Para melhor se compreender a *performance* energética das principais tipologias de edifícios escolares portugueses apresentadas em 2.3.1 (Brandão, Blocos 3x3 e Monobloco) utilizou-se um dos Energy Performance Indicator (EPI) possíveis, que expressa o consumo energético global de cada fonte de energia por área útil de pavimento num ano, ou seja, kWh/(m².ano). De notar que para se poder tornar comparáveis os valores, dado os edifícios poderem utilizar mais do que um tipo de fonte de energia, inclui-se também o somatório dos custos das diversas fontes de energia por área útil de pavimento, ou seja, uma medida global do custo do consumo energético por unidade de superfície.

Apresenta-se assim, os consumos energéticos nas Tabelas 4 a 6 para amostras das 3 tipologias de edifícios escolares principais definidas e, na Fig.14 a mesma medida, mas aplicadas a uma amostra de 23 escolas não reabilitadas do litoral Norte de Portugal, presentes num artigo sobre a variação dos consumos de energia nos edifícios escolares.

Tabela 4 – Custos anuais de energia (€/m²) para edifícios escolares do tipo Brandão [22], [23]

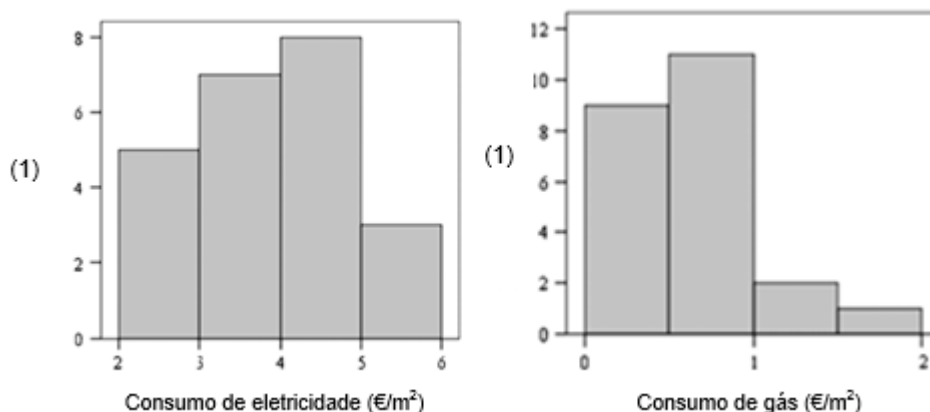
Tipo de Consumo	Escola BD1	Escola BD2
Eletricidade	4,73	5,04
Gás	0,27	0,37
Total	5,00	5,41

Tabela 5 – Custos anuais de energia (€/m²) para edifícios escolares do tipo Blocos 3x3 [24],[25],[26]

Tipo de Consumo	Escola BL1	Escola BL2	Escola BL3
Eletricidade	4,33	4,1	5,02
Gás	0,77	1,36	0,58
Gasóleo	-	-	0,37
Total	5,10	5,46	5,97

Tabela 6 – Custos anuais de energia (€/m²) para edifícios escolares do tipo monobloco [27], [28]

Tipo de Consumo	Escola MB1	Escola MB2
Eletricidade	3,43	3,93
Gás	0,62	0,61
Total	4,05	4,54



Legenda: (1) Número de edifícios escolares da amostra

Fig.14 – Distribuição dos custos anuais (€/m²) de uma amostra de 23 escolas relativamente à eletricidade (à esquerda) e gás (à direita) [adaptado de 29]

No que concerne ao uso, os custos energéticos anteriormente apresentados na Fig. 14 tem um valor total anual maioritariamente entre 4,50 €/m² e 6,50 €/m² (cerca de 30 kWh/m² por ano) e, incluem a eletricidade, utilizada sobretudo para aquecimento e iluminação; gás, para cozinhar e aquecimento de água quente sanitária; e gasóleo, quando existente, para aquecimento de água quente sanitária. Consta-se que os custos mais significativos são os relativos à eletricidade, apresentando uma distribuição simétrica centrada em 4 €/m² por ano [29], [30].

No que concerne ao estudo realizado relativo à variabilidade existente no consumo de energia e água nas escolas [30] verificou-se que os consumos de eletricidade são sazonais, com maior relevância no inverno, apesar de o aquecimento não representar um custo acrescido visto que na comparação entre edifícios escolares com sistemas de aquecimento em todas as salas de aula e entre escolas sem esses sistemas em todas as salas os consumos são semelhantes, indiciando o seu reduzido uso.

Com efeito, a eficiência energética poderia ser considerada elevada, visto que o consumo anual será em média de 30 kWh/m² [30] e portanto baixo, contudo é sobretudo à custa do sacrifício do conforto térmico e qualidade do ar interior dentro das salas de aula, segundo medições experimentais efetuadas na amostra de escolas referida da Fig.14. Por outro lado, constata-se que quer a existência de pavilhão gimnodesportivo ou maior área ajardinada nas escolas não leva necessariamente a um maior consumo de energia ou água, como seria de esperar. Este facto, aliado à grande variabilidade de consumos energéticos nas diversas escolas não reabilitadas indica que a eficiência pode ser aumentada e que depende fortemente da gestão mais ou menos otimizada que cada escola faz dos seus recursos disponíveis [29], [30].

Num estudo promovido pela Agência Internacional de Energia (IEA) – Anexo 36 – com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes estratégias de reabilitação de edifícios escolares verificou-se que a necessidade energética para aquecimento pode sofrer uma redução de até 75%. No entanto, apesar de estes resultados terem sido obtidos para edifícios do centro e norte da Europa com realidades climáticas mais severas que a portuguesa, a intervenção na envolvente dos edifícios e nos sistemas será uma oportunidade de melhoria da eficiência energética e do seu conforto, através da redução de perdas e implementação de soluções economicamente sustentáveis [10].

Na reabilitação de edifícios escolares públicos será, com efeito, necessário um estudo económico cuidado das soluções a aplicar, pois em reabilitações recentes ocorreu um aumento do consumo energético devido ao gasto elevado dos equipamentos de aquecimento e ventilação e, cujo benefício foi considerado muitas vezes duvidoso. Por outro lado, as melhorias tecnológicas e de comunicação podem levar a aumentos do consumo energético mas produzem uma melhor gestão dos métodos de ensino e mais facilidade de aprendizagem associada a uma melhor transmissão de conhecimentos e são, portanto, perfeitamente justificáveis. Será deste modo imprescindível, um estudo cuidado na prevenção de custos de exploração que possam ser injustificados, e até incomportáveis, ao realizar projetos de reabilitação de escolas.

2.3.3.2. Importância da manutenção das escolas

Os custos de exploração e manutenção representam uma elevada parcela do custo global de qualquer edifício, ou seja, a sua construção representa apenas uma pequena parcela do custo do ciclo de vida dos edifícios escolares, pelo que a sua gestão corrente é da maior importância.

No que se refere às ações de manutenção, estas são de vital importância para o bom funcionamento de todos os elementos de um edifício escolar e dividem-se em dois tipos principais, a manutenção preventiva e a corretiva.

A manutenção preventiva visa reduzir a probabilidade de qualquer elemento construtivo ou equipamento perder a sua funcionalidade de modo repentino, através da implementação de rotinas de inspeção periódicas estabelecidas em planos de manutenção, ou à medida que o natural envelhecimento e utilização o justifiquem, e deveria ser a promovida nas escolas quer antes, quer após reabilitação, de modo a garantir um desempenho satisfatório dos edifícios ao longo da sua vida útil [23].

A manutenção corretiva ocorre após a manifestação avançada do estado de degradação das anomalias e visam a sua correção/reparação, ou seja, a reposição de uma situação de bom serviço. Este tipo de manutenção está atualmente generalizado na grande maioria dos edifícios escolares e origina frequentemente, por desconhecimento, custos mais elevados de manutenção devido às necessidades de substituição por elementos novos, podendo estar na base de ações de pequena intervenção pontual ou de grande intervenção, ou seja, a reabilitação global do edifício [23].

No caso das escolas públicas, face à grande diversidade de ações de manutenção a empreender para o bom funcionamento dos diversos elementos construtivos e equipamentos de um edifício escolar, sugere-se a criação de uma equipa multidisciplinar responsável pela manutenção de várias escolas, de forma a promover a racionalidade económica de custos com pessoal e materiais [23].

Relativamente à reabilitação de edifícios escolares, para além do aumento dos custos de exploração que certas ações possam acarretar, é também importante refletir no aumento incomportável do custo de manutenção, nomeadamente no caso de utilização de sistemas AVAC na reabilitação das escolas no período recente, com custos de exploração e manutenção muito elevados. De acordo com um estudo da Parque Escolar, os custos de manutenção previstos, considerando um ciclo de vida de 30 anos, e

incluindo manutenção preventiva, corretiva e grande conservação são de 65 000 €/ano por escola, ou seja, muito elevados [10]. Mais uma vez, justifica-se a necessidade de planejar a reabilitação de edifícios escolares para não aumentar desnecessariamente os custos de exploração e manutenção em serviço.

2.4. CONFORTO E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

A qualidade do ambiente interior das salas de aula, em particular o conforto térmico e a qualidade do ar interior (QAI) no âmbito do trabalho desenvolvido nesta Dissertação, são condições fundamentais, não só para a promoção de boas condições de saúde nos seus ocupantes, mas também tem um forte impacto na criação de adequadas condições de aprendizagem. Assim, na reabilitação dos edifícios escolares devem ser tidas em consideração as suas especificidades e as atividades de ensino e aprendizagem neles desenvolvidas para projetar as mais adequadas intervenções na envolvente e nos vários tipos de sistemas, de forma a permitir criar conforto térmico e uma qualidade do ar propícias ao bom funcionamento das atividades letivas.

No que respeita às características construtivas e condições de utilização, os edifícios escolares apresentam particularidades únicas que os diferenciam dos restantes edifícios de serviços e lhes conferem um desempenho higrotérmico altamente dependente do seu perfil de ocupação. Entre os aspetos mais relevantes a ser tidos em consideração e cujo efeito deve ser devidamente contabilizado destacam-se [10]:

- Elevadas taxas de ocupação com consequentes ganhos térmicos internos muito significativos;
- Elevada área de envidraçados com implicações num aumento relevante da parcela relativa aos envidraçados no balanço térmico do edifício;
- Elevados ganhos solares térmicos captados pelas áreas envidraçadas, desempenhando o sombreamento um papel fundamental no controlo do sobreaquecimento;
- Requisitos mais exigentes de ventilação devidos às elevadas taxas de ocupação e maior preocupação com a qualidade do ambiente interior.

Atualmente, uma educação de excelência é um objetivo claro de qualquer sociedade moderna que pretende formar crianças e jovens para serem cidadãos ativos do futuro, sendo que vários estudos nacionais e internacionais publicados apontam que melhores condições do ambiente interior das salas de aula, nomeadamente variados aspetos relacionados com o efeito da temperatura e da qualidade do ar interior (QAI) tem uma influência muito importante na saúde, atitude e desempenho dos estudantes [10]. Assim, a sua satisfação será uma das prioridades nas intervenções de reabilitação para garantir um melhor ensino público.

O conforto térmico do ser humano implica que ele expresse satisfação com o ambiente térmico envolvente, sendo esta influenciada por fatores quer físicos, quer psicológicos, variáveis de pessoa para pessoa. O conforto térmico é atingido, para a maioria das pessoas, para temperaturas do ar compreendidas num intervalo de conforto estabelecido em normas, e para os quais poderão contribuir com maior ou menor peso os sistemas de climatização conforme, por exemplo, a envolvente dos edifícios seja melhor ou pior adaptada ao clima envolvente.

Uma vez que quer o clima exterior quer o interior não aquecido não se enquadram, na generalidade do tempo, nas condições de conforto interior, será necessário o recurso ao aquecimento, no inverno, para a garantia das condições de conforto que propiciem melhores condições de aprendizagem aos seus ocupantes. Assim, no âmbito da reabilitação energética, a intervenção na envolvente e na melhoria dos sistemas visa a obtenção dessa qualidade térmica ao menor custo de utilização dos sistemas em serviço

(por a temperatura do ar estar mais próxima da de conforto um maior número de vezes), ou seja, uma maior eficiência energética [10].

As temperaturas operativas de conforto estabelecidas em normas, que para o caso dos edifícios escolares são muito próximas da temperatura do ar interior, para condições correntes de utilização dos edifícios escolares (1,2 met e 0,5 a 1 clo) encontram-se definidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Intervalo de temperaturas operativas recomendadas com uma previsão de conforto térmico para 90% dos ocupantes [2]

Estação	ISO/EN 7730	ASRAE 55
inverno	20 - 24	20 - 23,5
verão	23 - 26	23 - 26

De acordo com ambas as normas a temperatura de conforto mínima na estação de aquecimento (inverno maioritariamente) é de 20 °C, sendo a adotada para a simulação do consumo energético de uma sala tipo durante todo o seu período de ocupação (tipicamente das 8h às 18h), aquando da realização dos estudos de sensibilidade na determinação das melhores soluções de reabilitação de uma escola da tipologia Brandão, no capítulo 3 desta Dissertação.

É importante ressaltar contudo, que apesar de se considerar a temperatura de 20 °C como a referência de conforto mínimo para todo o período de aulas analisado, há períodos em que tal não é estritamente verdade. Efetivamente, nos períodos de intervalo das aulas é de esperar maior ventilação por abertura das portas para os alunos e professores irem para intervalo, e consequentemente, a temperatura da sala em contato direto com o exterior mais frio poderá baixar dos 20 °C para valores de aproximadamente 18 °C. Contudo, quando os alunos regressam do intervalo é de esperar que jovens da faixa etária tipicamente dos 10 aos 14 anos regressem com taxas metabólicas mais elevadas, sendo a temperatura de 18 °C mais próxima das condições de conforto durante aproximadamente os primeiros 10 minutos. A nível do consumo energético o valor será semelhante quer se considere ou não os intervalos e, visto que pretendemos ser representativos de um grande número de escolas da tipologia Brandão, optou-se por não incluir os períodos de intervalo no estudo desenvolvido no capítulo 3 da presente Dissertação.

Quanto aos valores para a estação de arrefecimento (primavera e inícios do verão até ao fim de cada ano letivo) o valor máximo estabelecido nas normas é de 26° C, mas de acordo com [2] a partir de 25°C o rendimento escolar começa a decrescer acentuadamente e, portanto, no presente trabalho foi utilizado o valor de 25° C para medir o sobreaquecimento da sala no estudo de sensibilidade do capítulo 3 da presente Dissertação. Concluindo, os valores de conforto de referência utilizados para o período de aulas serão de um mínimo de 20 °C na estação de aquecimento e um máximo de 25 °C na estação de arrefecimento, valores de acordo com os previstos na atual regulamentação portuguesa de acordo com [32].

Visto que não será utilizado nenhum sistema de arrefecimento do ar interior das salas de aula na estação de arrefecimento, e de forma a poder ser quantificado o sobreaquecimento da sala de aula para as várias soluções analisadas, foi utilizado para o seu estudo um Indicador de Desconforto Térmico (IDT). Este quantifica o somatório de graus-hora [°C.h] acima da temperatura de conforto de referência de 25 °C, sendo dessa forma uma importante maneira para avaliar o desconforto térmico associado a temperaturas mais elevadas registadas [31].

A QAI desempenha também um papel fundamental na saúde, conforto e desempenho dos seus ocupantes. Se por um lado a ventilação é responsável por importantes perdas de calor interno e conse-

quente aumento do consumo energético, ela é absolutamente imprescindível para manter a qualidade do ar em níveis cuja concentração de poluentes e humidade relativa não chegue a ser nociva à saúde humana. Aliás, a propósito deste problema, um relatório realizado pela Organização Mundial de Saúde em 1984 indicava que era precisamente a concentração excessiva de poluentes que estava relacionada com muitos problemas de saúde, associados ao desconforto com a QAI, tendo sido atribuída a designação de “*Sick Building Syndrome*” a edifícios em cuja qualidade do ar era responsável por problemas de saúde aparentemente sem causa conhecida [10].

Com base nas preocupações referidas anteriormente relacionadas com a QAI, diversa regulamentação nacional e internacional prevê valores mínimos e/ou máximos para o caudal de ar novo, para a humidade relativa (HR) e para a concentração de poluentes, principalmente do dióxido de carbono (CO_2), visto este gás resultar da respiração humana e as salas possuírem taxas de ocupação elevada, tal como referido anteriormente, sendo por isso um bom indicador de QAI.

Em relação à humidade relativa a ventilação deverá garantir uma gama de valores aceitáveis que varia entre um mínimo de 30 a 40 % e o valor máximo deverá ser inferior a 70 % [10]. De notar que o principal objetivo será o de garantir condições para que a humidade na sala resultante da sua ocupação, por exemplo através da respiração dos seus ocupantes, não atinja valores extremamente elevados.

No que diz respeito aos requisitos de caudais mínimos de ar novo e à concentração máxima de CO_2 , em Portugal estes foram alterados de valores considerados muito restritivos e exigentes estabelecidos no RSECE de 2006 (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios), para valores menos restritivos estabelecidos no RECS (Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços), segundo a Portaria n.º 353-A/2013, mas mesmo assim ainda permanecem mais exigentes que os previstos em regulamentos europeus [2].

Assim, na Tabela 8 apresentam-se neste âmbito não só os valores previstos em Portugal (os antigos do RSECE e os atuais do RECS) mas também os previstos num outro país europeu de referência, a Alemanha (a título de exemplo) para uma sala de aula típica.

Tabela 8 – Exigências de QAI em salas de aula segundo vária regulamentação [adaptado de 2]

País	Caudal de ar novo [m ³ /h]	Concentração máxima de CO_2 [ppm]
Portugal (RSECE – revogado)	780 (30 m ³ /(h.ocupante))	1000
Portugal (RECS)	624 (24 m ³ /(h.ocupante))	1250*
Alemanha (DIN 4108 e 4701)	420	1500

*valor médio num intervalo de oito horas contínuas

Os valores apresentados foram estabelecidos para uma ocupação normal de uma sala de aula, constituída por 26 pessoas (25 alunos de 10 a 14 anos e 1 professor). De acordo com a Tabela 8, no passado, através do RSECE, para a ventilação de uma sala tipo de um edifício escolar com 26 pessoas era necessário cerca de 800 m³/h de caudal de ar novo para satisfazer o regulamento, estando esse valor atualmente estabelecido em cerca de 600 m³/h. Este valor, apesar de corresponder a menos 200 m³/h é ainda elevado comparado com o regulamento alemão que estabelece um valor de 400 m³/h [2].

Quanto à concentração máxima de CO₂ o regulamento antigo (RSECE) estabelecia um valor máximo admissível de 1000 ppm, valor muito exigente apenas conseguido à custa de ventilação mecânica. Atualmente este valor é estabelecido pelo RECS num valor médio de 1250 ppm, mais flexível, contudo o regulamento alemão estabelece um valor de 1500 ppm, admitindo que possa ser pontualmente superior durante curtos períodos de tempo [2]. Este valor abre portas para a utilização de ventilação mista, com admissão natural e extração mecânica, com menores gastos em equipamentos de ventilação e consumos de energia pelo que se justifica a sua análise.

Num artigo recente denominado “*Indoor environmental quality of classrooms in Southern European climate*” [32] foram estabelecidas conclusões importantes sobre os assuntos abordados neste subcapítulo com base numa amostra de escolas do Norte de Portugal estudada.

Com efeito, medições da temperatura do ar interior de edifícios escolares não reabilitados e sem sistemas de aquecimento em todas as salas de aula levaram à conclusão de que estas estavam longe dos valores de conforto estabelecidos no regulamento nacional na estação de aquecimento, pelo que uma reabilitação térmica da envolvente de modo a diminuir os seus coeficientes de transmissão térmica se revela fundamental. Tal facto é comprovado pelas boas condições de conforto observadas no inverno para a generalidade da amostra das escolas reabilitadas [32].

De acordo com o mesmo estudo [32], a questão da humidade relativa não é um problema dos edifícios escolares analisados, quer reabilitadas, quer não reabilitadas porém, nos edifícios não reabilitados constata-se problemas graves de concentração de poluentes, associados a uma fraca ventilação, devido à necessidade de diminuição de perdas de calor nessas escolas por não terem sistemas de aquecimento nem envolvente adequados e consequentemente temperaturas bastante baixas. Por outro lado, em edifícios reabilitados com maior estanquidade ao ar e com sistemas de ventilação puramente mecânicos constata-se que em caso de avaria ou não colocação em funcionamento dos sistemas, por razões económicas, a QAI piora significativamente, obtendo-se concentrações de poluentes muito elevadas (e ainda maiores que em escolas não reabilitadas) e prejudiciais à saúde.

De acordo com o apresentado no parágrafo anterior, e ainda de acordo com resultados do mesmo estudo [32], somos levados à conclusão de que quer os sistemas de ventilação, quer as envolventes devem ser melhorados, contudo a colocação de sistemas puramente mecânicos não é a melhor opção.

Segundo as recomendações do estudo [32], a melhor solução passa por uma solução de ventilação mista e adaptativa, controlável através da concentração de poluentes principais. Apesar de com ventilação mista haver um menor controlo na concentração de poluentes/maior variabilidade são atingidos bons resultados com custos incomparavelmente menores.

2.5. IMPORTÂNCIA DAS ZONAS CLIMÁTICAS NO ESTUDO DO CONSUMO ENERGÉTICO

Apesar do conceito de número de Graus-Dias (GD), na base de 18 °C para a estação de aquecimento, previsto no regulamento português [33] se referir a um aquecimento contínuo de habitações e não ser aplicável, pelo menos desta forma, a edifícios escolares, trata-se de um indicador de severidade do clima de cada região bastante relevante no estudo do consumo energético necessário para o aquecimento das escolas nos períodos letivos.

Embora na presente Dissertação apenas irão ser estudadas as escolas a reabilitar da tipologia Brandão da região Norte de Portugal com um clima próximo do da cidade do Porto, incluído na Região do Grande Porto a NUTS III (inclui municípios como Espinho, Póvoa de Varzim, Trofa, Santo Tirso, etc.), com um clima mais ameno, é necessário também um estudo para outros climas de referência da

região Norte como Braga, pertencente à zona climática da Região do Cávado a NUTS III e Bragança pertencente à Região Alto Trás-os-Montes a NUTS III apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Principais parâmetros e zonamento climático de cidades da região Norte [adaptado de 33]

Município	Graus-Dias [°C]	Temperatura média mês mais frio [°C]	Temperatura média na estação de arrefecimento [°C]	Zona climática inverno	Zona climática verão
Porto	1250	9,9	20,9	I1	V2
Braga	1491	9,0	20,7	I2	V2
Bragança	2015	5,5	21,5	I3	V2

As zonas climáticas obtidas são melhor perceptíveis através da apresentação dos gráficos de zonamento climático para a estação de aquecimento e arrefecimento, tal como apresentado na Fig. 15.

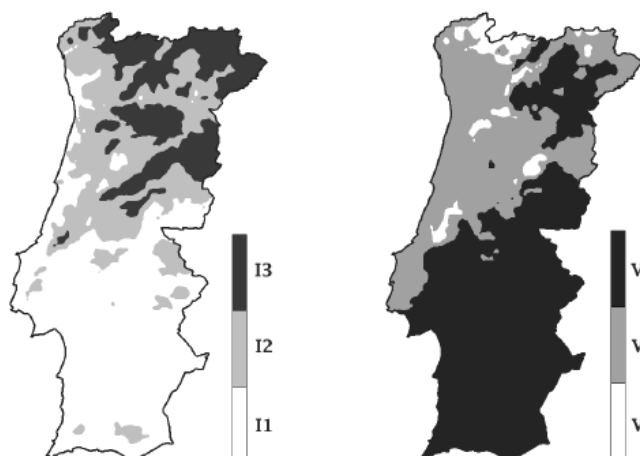


Fig.15 - Zonas climáticas de inverno (esquerda) e verão (direita) em Portugal continental [33]

Tal como se pode comprovar pela Fig.15 e Tabela 9, para as cidades apresentadas, o clima do Porto na estação de aquecimento é o mais ameno (zona I1), seguido de Braga (zona I2), e por fim pelo clima da cidade de Bragança que é o mais severo considerado pelo regulamento (I3), sendo tal reforçado pela temperatura média exterior do mês mais frio de cada cidade.

De acordo com os dados apresentados, e conforme a consequente severidade do clima, o número de GD correspondente à estação de aquecimento tem valores diferenciados, sendo quase o dobro entre Porto e Bragança. Em consonância, são de esperar consumos bem diferenciados entre regiões com climas na estação de aquecimento mais ou menos severos.

Pelo exposto pode-se concluir que climas diferenciados levam a consumos energéticos mais ou menos severos no caso de envolventes do edifício semelhantes, o que acontece com muitos projetos de edifícios do parque escolar português, que foram tipificados e construídos pelas várias regiões do país sem alterações relevantes na envolvente a nível térmico. Isto implica uma eficiência energética baixa, para garantir condições de conforto, em muitos deles, devendo nos atuais e futuros projetos de reabilitação serem corrigidos os problemas higrotérmicos do passado através de projetos que levem a envolventes termicamente otimizadas para as condições climáticas próprias de cada região, melhorando assim

significativamente o desempenho higrotérmico dos edifícios escolares reabilitados. Este é um dos principais objetivos do trabalho.

2.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada e sintetizada a seguinte informação:

- Apesar de se prever nos próximos anos uma diminuição do número de alunos em todo o país e em todos os ciclos de estudos, mais acentuada na região Norte, e de se estimar que cerca de 140 escolas poderão mesmo vir a encerrar ou ser reestruturadas até 2022, será imprescindível reabilitar nos próximos anos mais de 800 escolas, num investimento público estimado para todo o país de cerca de 2,5 mil milhões de euros. Já para a região Norte o número de escolas a reabilitar previsto é de cerca de 280, num investimento previsto de 785 milhões de euros;
- Foram definidos como valores de investimento máximo, financiados por fundos europeus e provenientes do Orçamento de Estado para a Educação, até 2020, cerca de 131 milhões de euros para a região Norte, sendo a área metropolitana do Porto a que mais poderá beneficiar, com quase 48 milhões de euros;
- Foi anunciado no ano passado pelo atual Ministro da Educação que vários municípios vão assinar acordos com o Governo para a modernização de 200 escolas num investimento total de 200 milhões de euros que envolvem maioritariamente fundos europeus no que se refere a escolas que estavam mapeadas nos fundos do PORTUGAL 2020;
- As principais tipologias de edifícios do parque escolar a reabilitar foram construídas após 1969 e são sobretudo das tipologias Brandão, Blocos 3x3 e Monobloco, estando grande parte delas com um elevado estado de degradação por falta de cuidados de manutenção;
- O total dos custos energéticos (eletricidade, gás, gasóleo) nas escolas tem normalmente um valor anual entre 4,50 €/m² e 6,50 €/m², com a eletricidade a apresentar uma distribuição simétrica centrada em 4 €/m²;
- A grande variabilidade nos custos energéticos existente nos variados edifícios escolares indica que apesar de os consumos energéticos poderem ser considerados baixos e dependentes do tipo de gestão de cada escola, a eficiência energética pode ser aumentada, sendo a reabilitação uma oportunidade estratégica para a sua efetiva concretização;
- A especificidade dos edifícios escolares e suas condições de utilização exige cuidados especiais relacionados com o conforto térmico e QAI. Para uma aprendizagem e condições de saúde adequadas dos seus ocupantes, a temperatura interior deverá estar compreendida entre 20°C e 25°C e relativamente à ventilação deverão ser garantidos caudais de ar novo adequados para evitar uma concentração excessiva de poluentes;
- Os edifícios escolares a reabilitar não se encontram adaptados às diversas condições climáticas do país, pelo que para manter uma temperatura de conforto adequada apresentam baixa eficiência energética. Nos projetos de reabilitação a realizar dever-se-á corrigir os problemas do projeto tipo inicial, através da conceção de uma envolvente e recurso a sistemas eficientes e adaptados à condição climática em que a escola se insere;
- A reabilitação dos edifícios escolares deve ser encarada como um processo de compatibilização de várias condicionantes relacionadas com a eficiência energética, o conforto térmico, a QAI, os custos iniciais, de exploração e manutenção das soluções adotadas e a respetiva durabilidade.

3

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO - CASO DE ESTUDO

3.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Na presente Dissertação será estudada fundamentalmente a otimização técnico-energética da envolvente, no que diz respeito ao seu desempenho higrotérmico, de uma sala de aula tipo de uma escola da tipologia Brandão que pretende ser representativa de grande parte das escolas desta tipologia que necessitam de intervenções de reabilitação, para climas semelhantes ao da cidade do Porto, de forma a poderem ser propostas recomendações de reabilitação deste tipo de escolas no capítulo seguinte.

Com efeito, o Caso de Estudo da escola a estudar, representativo de escolas da tipologia Brandão não reabilitadas, encontra-se na cidade do Porto e é uma escola básica do 2º e 3º CEB, tendo sido inaugurada em 1978. Na Fig. 16 apresenta-se uma vista geral da escola e uma fotografia do autor do bloco em estudo aquando da sua visita à escola.



Fig.16 – Fotografia aérea da escola (à esquerda) [23] e bloco a estudar (à direita)

A escola é constituída por um edifício principal com 2 pisos, onde se localizam os serviços administrativos e refeitório, e quatro edifícios de 1 piso e pátio central, semelhantes entre si, que constituem os blocos onde decorrem as aulas. A escola conta ainda com um campo de jogos e um pavilhão gimno-desportivo, sendo normalmente frequentada por cerca de 750 alunos distribuídos por 33 turmas em 2 turnos.

Na Fig. 17 representa-se a planta tipo dos blocos de aulas, bem como a representação da localização da sala a estudar e uma foto do seu interior.

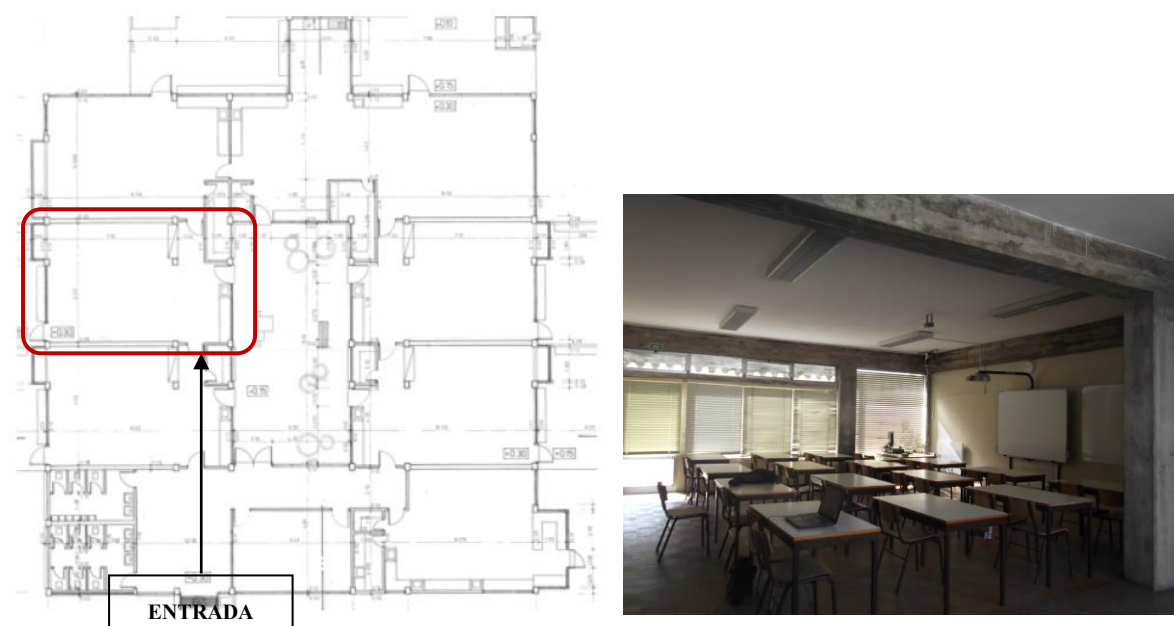


Fig.17 – Planta tipo do bloco de aulas com sala a analisar (à esquerda) [23] e sala de aulas a estudar (à direita)

A sala em estudo tem uma área total de $61,2 \text{ m}^2$, sendo constituída pela sala de aulas propriamente dita com cerca de $44,2 \text{ m}^2$ (a ponte) e pelo corredor com a função de acesso às salas com cerca de $17,0 \text{ m}^2$ (nascente e local de onde se retirou a foto da Fig.17), unidos entre si sem qualquer tipo de separação física. Obviamente, entre o corredor e cada uma das salas anexas existe uma porta de separação para as aulas poderem decorrer com condições de conforto acústico e privacidade.

Assim, este capítulo está subdividido em quatro partes principais nas quais se desenvolve toda a análise do Caso de Estudo.

Na primeira parte será apresentado o programa de simulação em regime dinâmico do desempenho higratérmico utilizado, o *WUFI PLUS* [34], bem como o modelo da escola e sala tipo a estudar, realizado, validado e cordialmente disponibilizado para a realização desta Dissertação por uma estudante no âmbito da sua Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a Francisca Cavaleiro Barbosa, com orientação do Professor Vasco Peixoto de Freitas. Para além disso, serão descritos os dados climáticos, as condições de utilização e propriedades higratérmicas utilizadas para a realização das diversas simulações.

Na segunda parte apresentam-se a caracterização construtiva dos diversos elementos da envolvente exterior da escola do Caso de Estudo existentes atualmente, bem como os seus homólogos no modelo de simulação da sala de aula que servirão de base à obtenção de soluções técnico-energéticas de reabilitação eficientes para a envolvente.

A terceira parte pode ser considerada nuclear no desenvolvimento do presente capítulo e constitui um estudo de sensibilidade cuidado sobre os diversos elementos que constituem a envolvente com vista à obtenção da melhor solução técnico energética de reabilitação para escolas do tipo Brandão e para climas semelhantes ao do Porto.

Por fim, na última parte faz-se um estudo que pretende ser uma pequena reflexão sobre algumas estratégias de ventilação possíveis a adotar na solução otimizada obtida na terceira parte do capítulo, com quantificação da consequente qualidade do ar e consumos energéticos.

3.2. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO EM REGIME DINÂMICO UTILIZADO – *WUFI PLUS*

3.2.1. POTENCIALIDADES DO PROGRAMA UTILIZADO E APRESENTAÇÃO DO MODELO A SIMULAR

Conforme referido será utilizado um modelo de uma sala tipo que será simulado recorrendo ao *software WUFI PLUS*, desenvolvido na Alemanha pelo Fraunhofer IBP – Fraunhofer Institute for Building Physics, com muitos estudos de validação experimental concretizados. Este programa de simulação higratérmica avançada combina os mecanismos de fluxo de calor e transporte de humidade através dos vários componentes para avaliar o clima interior, nomeadamente as suas condições de conforto térmico, de qualidade do ar interior e consumo de energia, de um edifício inteiro ou apenas parte, mediante os *inputs* representativos de condições reais definidos pelo utilizador (clima exterior, condições de utilização e ventilação, etc.) [35].

O modelo da escola/sala tipo a estudar foi já validado por estudos experimentais e inclui um total de 6 zonas a simular em conjunto pelo programa: a sala-tipo a estudar, central, com orientação Nascente/Poente e incluindo corredor de acesso/sala de aulas propriamente dita, num total de 61,2 m² (zona 1); duas salas de aulas anexas, que incluem também sala de aulas propriamente dita e corredor de acesso (sala sul com 61,3 m² (zona 3) e sala norte com 64,4 m² (zona 5)), em contato direto com a envolvente interior da sala central (zona 1); bem como 2 zonas de arrumos (arrumos da sala central e norte com 6,75 m² (zona 2) e arrumos da sala sul com 3,3 m² (zona 4)). Adicionalmente está definida uma zona 6 que corresponde a uma cobertura fortemente ventilada [34].

Para o presente estudo apenas interessará a análise da sala central (zona 1), apresentando-se todos os resultados apenas para essa sala. Apesar disso, o programa simulou sempre condições de utilização semelhantes às da zona 1 para as 2 salas envolventes (zonas 3 e 5), definidas pelo utilizador de forma a evitar fluxos de calor e humidade distintos dos reais pelas paredes da envolvente interior em contato com as salas sul e norte. Estes ocorreriam caso as salas anexas não tivessem condições típicas de um ambiente interior e levavam a que na sala em estudo se verificassem resultados diferentes dos que preveem na realidade. Quanto aos arrumos adotou-se o regime de flutuação livre (zonas 3 e 5).

Apresenta-se assim, na Fig. 18 uma imagem do modelo completo a simular retirada do *WUFI PLUS* e da respetiva sala a estudar.

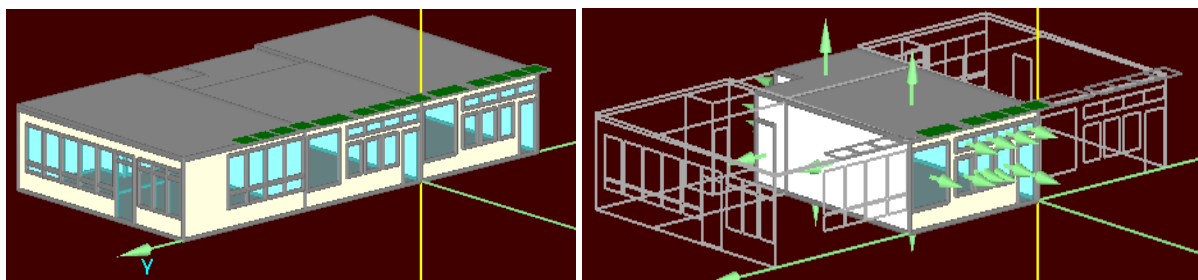


Fig.18 – Modelo da escola a simular (vistas norte e poente) e respetiva sala tipo a estudar [34]

As análises “estáticas” definidas em regulamentos levam frequentemente a estimativas erradas a menos que seja realizado um trabalho crítico de validação dos princípios regulamentares aplicado às reais condições de serviço, sendo vivamente recomendado o recurso a programas de simulação higratérmica rigorosos [36]. Para um melhor desenvolvimento e análise de resultados das diversas simulações que envolverão o estudo de sensibilidade desta Dissertação foi elaborada previamente uma lista com a exploração das várias potencialidades do *WUFI PLUS* relevantes no âmbito de estudo do presente trabalho, estando o seu resultado sintetizado na Fig.19.

Resultados Globais Horários			
Clima		Energia	
Parâmetros	Unidade	Parâmetros	Unidade
* Temperatura Exterior	°C	* Necessidades de Aquecimento	kW
* Temperatura Interior	°C	* Necessidades de Arrefecimento	kW
* Temperatura Superfical Interior Média	°C	* Ganhos Solares	kW
* Temperatura Superfical Interior Média dos Envidraçados	°C	* Ganhos Internos Convetivos	kW
* Temperatura Média dos Pavimentos	°C	* Ganhos Internos Radiantes	kW
* Temperatura Média dos Tetos	°C	* Fluxo de Calor através da Envolvente Opaca	kW
* Concentração CO2	ppmv	* Fluxo de Calor por Ventilação	kW
* Humidade Relativa Exterior	%	* Fluxo de Calor através da Envolvente envidraçada	kW
* Humidade Relativa Interior	%		
Resultados para cada Elemento Construtivo Horários			
Vãos Envidraçados		Vãos Opacos	
Parâmetros	Unidade	Parâmetros	Unidade
* Intensidade da Radiação Solar Incidente	W/m2	* Intensidade da Radiação Solar Incidente	W/m2
		* Fluxo de Calor por Componente	W/m2
		* Temperatura por Material ao longo de toda a malha	°C
		* Temperaturas Superficiais dos Elementos Construtivos	°C

Fig.19 – Resultados mais relevantes obtidos através da simulação numérica com o *WUFI PLUS* [adaptado de 37]

3.2.2. DADOS CLIMÁTICOS

Para a realização o mais rigorosa possível do estudo de simulação higratérmica da presente Dissertação são requeridos pelo programa ficheiros climáticos precisos do ambiente exterior. Para o efeito foram utilizados ficheiros climáticos relativos à cidade do Porto em formato *.wac (formato lido pelo *WUFI PLUS*) originários do *Test Reference Year* (TRY), disponibilizados pelo LFC-FEUP.

Estes dados climáticos resultam de tratamentos estatísticos de resultados experimentais recolhidos durante 10 anos e pretendem ser representativos do clima de um ano típico do Porto. Estes ficheiros contêm informação bastante completa, indicando-se na Tabela 10 a requerida pelo programa.

Tabela 10 – Principais propriedades climáticas presentes nos ficheiros provenientes do TRY

Propriedades	Unidades
Temperatura do ar	°C
Humidade Relativa (HR)	%
Radiação Atmosférica	W/m ²
Radiação Solar Incidente	W/m ²
Direção do Vento	-
Velocidade do Vento	m/s
Pressão Atmosférica	hPa
Chuva Incidente	l/m ² .h

Alguns dos dados climáticos utilizados pelo programa e considerados mais relevantes são apresentados seguidamente nas Fig. 20 e Fig. 21.

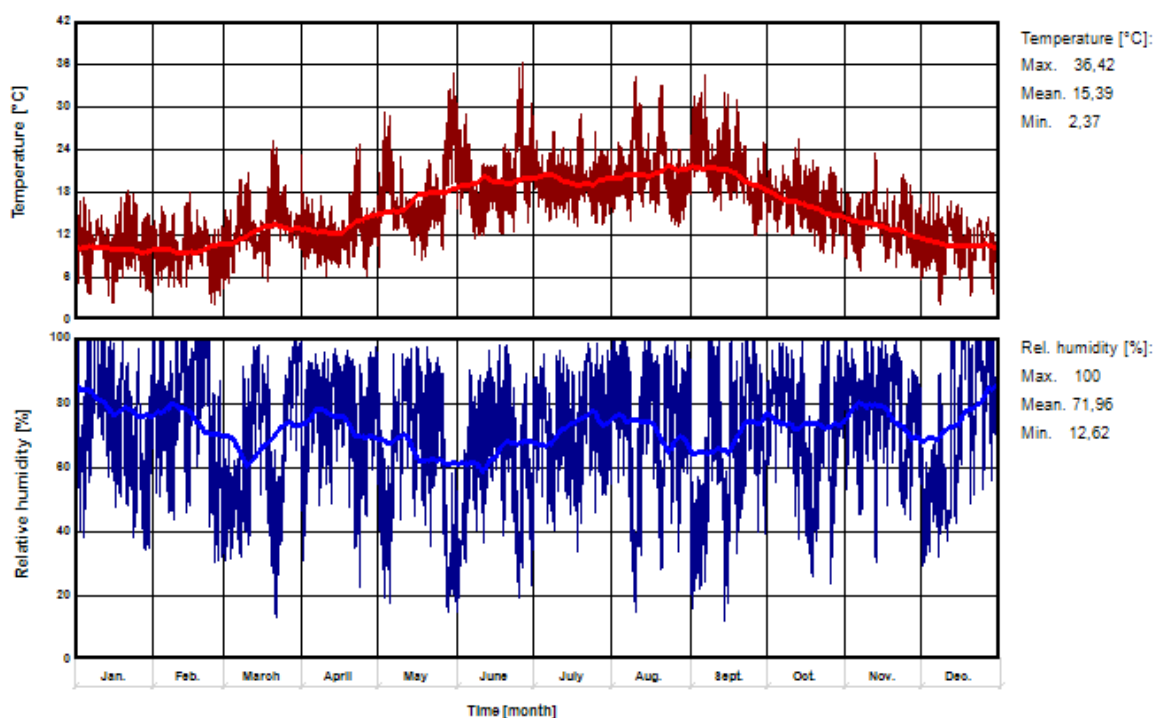


Fig.20 – Temperatura e humidade relativa do ar exterior anual do Porto utilizada no *WUFI PLUS* [34]

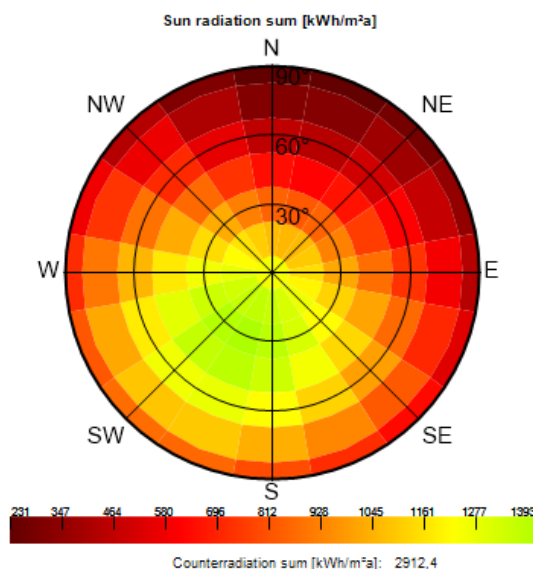


Fig.21 – Soma da radiação solar por orientação e inclinação anual no Porto utilizada no WUFI PLUS [34]

A temperatura e humidade relativa serão fundamentais para o cálculo do fluxo de calor e transferência de humidade entre o interior e o exterior pela envolvente. Já a radiação solar, por orientação e inclinação, é relevante para a determinação dos ganhos solares pelos envidraçados e a determinação do período de funcionamento das proteções solares nas diversas orientações de modo a garantir sombreamento adequado. Relativamente à concentração de CO₂ no ambiente exterior está definido o valor por defeito de 350 ppmv (partes por milhão por volume) [34].

3.2.3. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

Conforme referido no capítulo anterior, referente ao Estado da Arte, os edifícios escolares apresentam uma especificidade em relação aos restantes edifícios de serviços no que diz respeito às taxas de ocupação. Assim, os edifícios escolares apresentam taxas de ocupação elevadas durante os períodos de aulas, tendo uma elevada quantidade de ganhos de calor internos que convém ter em conta aquando da simulação do comportamento higratérmico da escola em estudo.

Por razões associadas à estabilização das condições de temperatura e humidade dos elementos da envolvente, entre o final e o início de cada ano tipo, de forma a não haver influência das condições de temperatura e humidade iniciais definidas para a simulação (a que se voltará mais tarde), todas as simulações foram efetuadas para um período de 2 anos, recorrendo-se apenas à análise do segundo ano de simulação. Este aspeto fez com que no modelo se estabelecesse como anos de simulação 2017 e 2018.

Assim, utilizou-se o calendário escolar do ano letivo de 2016/2017 disponibilizado no site da DGEstE, aplicou-se diretamente o calendário escolar vigente entre janeiro e junho de 2017, e entre setembro de 2017 e dezembro de 2018 aplicou-se o mesmo calendário, salvo pequenas adaptações sempre que se verificava que no ano letivo vigente as aulas começavam/terminavam num dia de semana e no ano civil de 2018 o mesmo dia correspondia a um fim de semana, tendo-se alterado nesses casos para o dia útil imediatamente antes ou após o fim de semana de forma a assegurar-se uma semana de aulas completa. Estas pequenas adaptações visaram obter calendários escolares futuros o mais próximo possível da “filosofia” de calendário escolar vigente na atualidade no que respeita às semanas de ocupação,

bem como que o número de dias de aulas/ocupação das salas de aula fosse muito semelhante, visto o calendário de 2017/2018 não ter sido publicado aquando do início do estudo de simulação.

Assim, o calendário escolar estabelecido para o ano civil de 2018 (janeiro a dezembro), ou seja, o segundo ano de simulação de que se recolhe os dados é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Calendário escolar para 2018 estabelecido no modelo

Dias de Calendário	Ocorrências
1 e 2 janeiro	Férias de Natal
3 janeiro a 25 fevereiro	2º Período (17/18) - 1ª parte
26 a 28 fevereiro	Interrupção do Carnaval
1 março a 4 abril	2º Período (17/18) - 2ª parte
5 abril a 18 abril	Férias da Páscoa
19 abril a 17 junho	3º Período (17/18)
18 junho a 12 setembro	Férias do verão
13 setembro a 16 dezembro	1º Período (18/19)
17 dezembro a 31 dezembro	Férias de Natal

Em relação ao horário de aulas estabeleceu-se uma ocupação contínua de 10 horas diárias: das 8 horas da manhã até às 18 horas da tarde às segundas, terças e quintas. Às quartas e sextas devido a reuniões de professores (que ocorrerão em princípio em salas específicas e pontuais) e sextas à tarde livres em muitas escolas apenas de considerou 5 horas de ocupação: das 8 horas da manhã até às 13 horas. Para os restantes períodos da semana e ao fim de semana não foi estabelecido qualquer tipo de ocupação ou ganhos internos. Além disso, conforme já explicado no capítulo 2 também não foram considerados períodos de intervalo entre aulas.

Relativamente à ocupação e ganhos internos tem-se consciência da sua variabilidade maior ou menor entre anos letivos, escolas e turmas (bem como o seu número num determina ano escolar). Foi estabelecida uma ocupação típica, com base nos dados da biblioteca do *WUFI PLUS*, de 26 pessoas, ou seja, 25 alunos com metabolismo de jovens de 14 a 16 anos e 1 adulto (o professor). Além disso, foram estabelecidos ganhos internos, relativos à iluminação e uso de dispositivos de utilização, de 675 W/h.

Assim, o programa estabeleceu as seguintes características resultantes da ocupação [34]:

- 3,046 kW/h (ganhos internos convectivos, radiantes, etc.);
- 1 309 g/h (produção de humidade);
- 881,3 g/h (libertação de CO₂).

Num ano inteiro, das 8760 horas apenas 1365 horas correspondem ao período de aulas, o que equivale apenas a 15,6 % de horas do ano em que a sala está ocupada. De forma a se poder melhor compreender a aplicação do calendário escolar, horário escolar, ocupação definida e o seu impacto ao longo do ano (períodos de aulas e interrupções letivas) apresentam-se, como forma de sintetizar a informação referida, na Fig. 22 o total dos ganhos internos mensais e anuais em kWh (para os 61,2 m² da sala) e kWh/m².

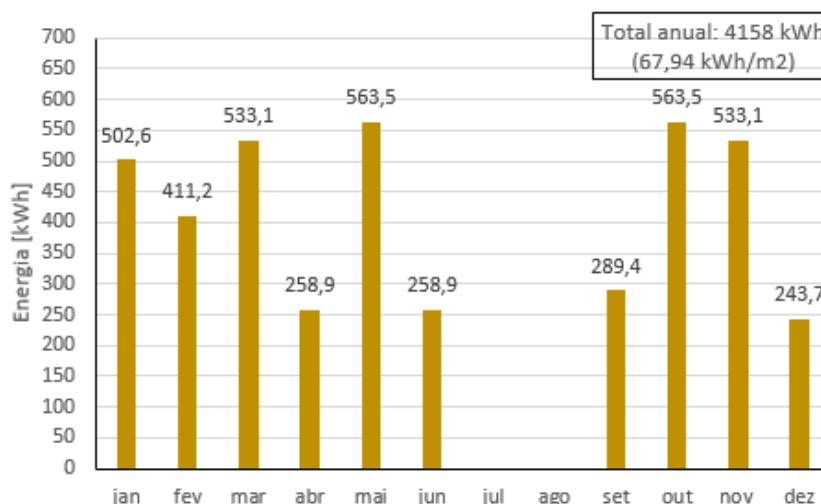


Fig.22 – Total ganhos internos mensais e anuais em kWh e kWh/m²

3.2.4. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

As propriedades higrotérmicas dos materiais podem ser obtidas em pesquisas de laboratório, recorrendo à extensa base de dados do *WUFI PLUS* ou através de consultas bibliográficas disponíveis na literatura e inseridas manualmente pelo utilizador no programa. O mesmo se passa na definição dos diversos elementos construtivos (que são combinações devidamente estruturadas de materiais), em que o utilizador pode escolher elementos construtivos já existentes na biblioteca do programa ou combinar materiais da forma mais conveniente e constituir os elementos mais adequados à situação construtiva real [31]. Foi este o longo trabalho desenvolvido para a elaboração do modelo fornecido para a elaboração dos estudos da presente Dissertação.

O programa distingue dois tipos de propriedades: as propriedades básicas, imprescindíveis ao funcionamento do programa; e as propriedades complementares, que podem não ser introduzidas, embora seja vivamente recomendada a sua introdução dos mais importantes para o fenómeno em estudo, caso contrário nem todos os mecanismos higrotérmicos passíveis de serem contabilizados pelo programa são considerados, originando situações que não representam a realidade [38].

Assim, as propriedades básicas e complementares utilizadas pelo programa são apresentadas nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Propriedades básicas dos materiais necessárias pelo *WUFI PLUS* (adaptado de [38])

Propriedade	Unidade
Massa Volúmica	Kg/m ³
Porosidade	m ³ /m ³
Calor específico do material seco	J/kg.K
Condutibilidade térmica do material seco	W/m.K
Fator de resistência à difusão de vapor	-

Tabela 13 – Propriedades complementares dos materiais necessárias pelo *WUFI PLUS* (adaptado de [38])

Propriedade	Unidade
Curva de armazenamento de humidade	Kg/m ³
Curva de transporte de humidade - sucção	m ² /s
Curva de transporte de humidade - redistribuição	m ² /s
Curva de dependência da condutibilidade térmica em relação ao teor de água	W/m.K
Curva de dependência da condutibilidade térmica em relação à variação de temperatura	W/m
Curva de dependência do fator de resistência à difusão de vapor em relação ao teor de água	-

A título de exemplo apresenta-se seguidamente o menu de edição das propriedades dos materiais do programa em que o utilizador pode ver e/ou editar as propriedades básicas e complementares dos diversos materiais. Para o caso do exemplo (Fig. 23) utilizou-se as propriedades do isolamento térmico poliestireno expandido extrudado (XPS) disponíveis na biblioteca do *WUFI PLUS*, a utilizar na simulação da colocação de diversas espessuras de isolamento nos elementos da envolvente aquando do desenvolvimento do estudo de sensibilidade (subcapítulo 3.4).

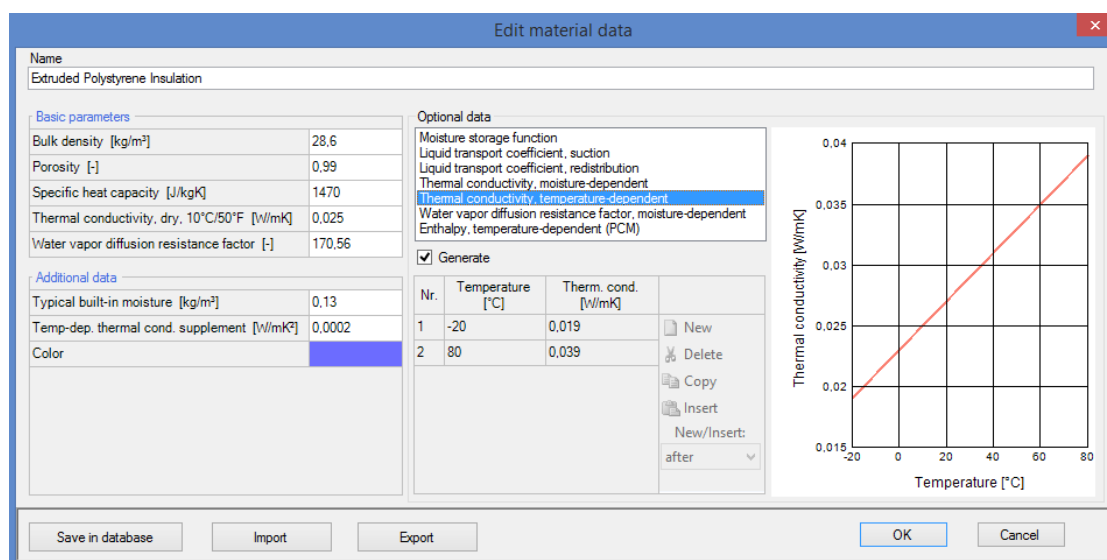


Fig.23 – Menu de edição das propriedades do isolamento térmico a utilizar (XPS) do *WUFI PLUS* [34]

De notar a diferença entre as propriedades do XPS estabelecidas na biblioteca do *WUFI PLUS* e as presentes no ITE 50 [39], em particular o coeficiente de transmissão térmica unitário de 0,025 W/m.K no programa e de 0,037 W/m.K no ITE 50. Naturalmente que o ITE 50 pretende representar todo o tipo de soluções existentes no mercado contudo, a diferença de valores justifica uma necessidade de medição experimental cuidada das propriedades higrotérmicas dos materiais a aplicar de forma a que o desempenho térmico previsto na presente Dissertação possa corresponder ao obtido com as soluções práticas aplicadas na reabilitação de edifícios escolares.

3.3. CARATERIZAÇÃO CONSTRUTIVA DA ENVOLVENTE

Neste subcapítulo será apresentada uma comparação entre os elementos construtivos existentes na escola não reabilitada do tipo Brandão do Caso de Estudo, descritos num relatório técnico de consultoria à reabilitação da escola, e os aplicados no modelo de simulação utilizado, devidamente acompanhados por fotografias elucidativas das condições reais observadas pelo autor da Dissertação.

Conforme já referido a simulação será baseada no estudo das condições higrotérmicas de uma sala tipo, tendo sido realizado um trabalho prévio pela autora do modelo geométrico da escola de validação dos valores obtidos com o modelo com base nos resultados experimentais obtidos na sala em estudo.

Apresentam-se assim, na Fig. 24 as fachadas poente e nascente da sala em estudo para a qual será feita a caracterização construtiva dos diversos elementos da envolvente exterior que pretendem ser representativos da tipologia Brandão.



Fig.24 – Fachadas exteriores da sala: poente (à esquerda) e nascente retirada do pátio interior (à direita)

3.3.1. COBERTURAS

As soluções construtivas da cobertura existentes na sala estão representadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Caraterização construtiva das coberturas dos blocos de aulas (adaptado de [23])

Caraterização construtiva	Foto
Solução 1 - Coberturas das salas de aula sem isolamento térmico sobre laje de cobertura; - Revestimento superior em chapas de fibrocimento (a substituir obrigatoriamente); - Cobertura inclinada ventilada;	
Solução 2 - Coberturas dos corredores das salas de aula; - Cobertura horizontal não isolada e com impermeabilização em tela asfáltica autoprotégida, coberta por eventual ladrilho hidráulico;	

Relativamente aos elementos construtivos da cobertura inseridos no modelo para o estudo do comportamento higrotérmico da sala tipo (zona 1) foi utilizada, como já referido, uma zona 6 por cima da laje de cobertura apenas da sala propriamente dita, sendo esta coberta por uma chapa metálica com espaço de ar fortemente ventilado intermédio (zona 6). Esta zona como é fortemente ventilada permitirá que existam na parte superior laje de cobertura da sala de aulas propriamente dita condições climáticas de temperatura e humidade semelhantes ao clima exterior, mas impedirá o acesso de chuva direta incidente e radiação solar. Relativamente à cobertura do corredor da sala, este corresponde à solução 2 não sendo abrangida pela zona 6. Assim, nos elementos apresentados na Fig. 25 relativamente à solução 1 não constarão a cobertura metálica superior a aplicar na reabilitação da escola (que funciona unicamente como pára-sol). A Fig. 26 representa a solução 2.

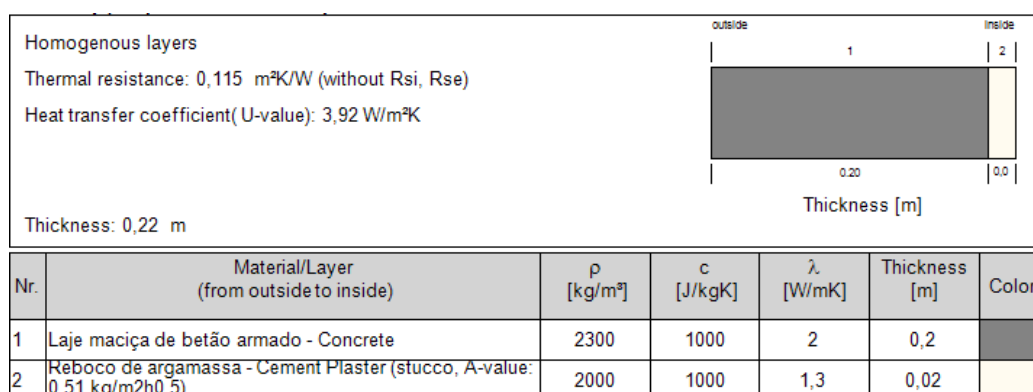


Fig.25 – Caracterização construtiva das coberturas de solução 1 utilizadas no modelo [34]

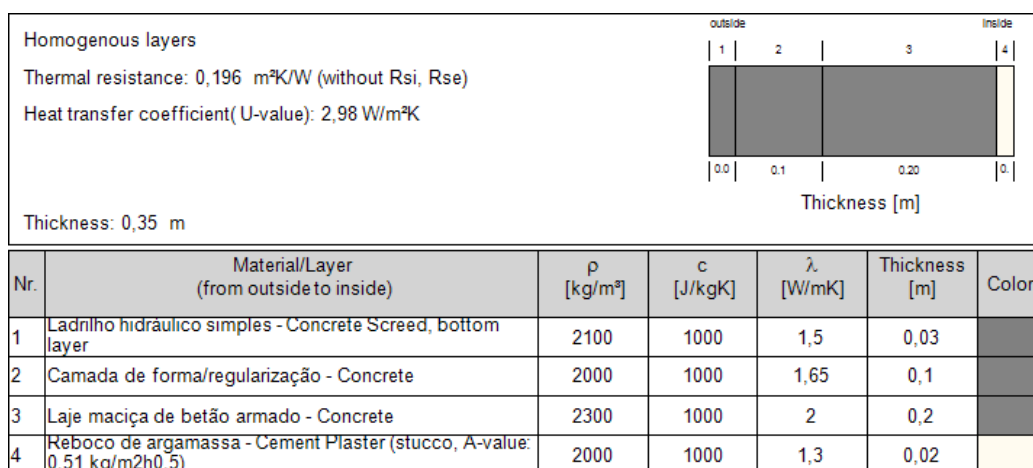


Fig.26 – Caracterização construtiva das coberturas de solução 2 utilizadas no modelo [34]

3.3.2. PAREDES EXTERIORES

As soluções construtivas para as paredes exteriores existentes estão representadas na Tabela 15. De notar que na Fig.24 estão já representadas estas soluções de paredes (solução de paredes 1) e que representam apenas uma pequena percentagem no total da envolvente.

Tabela 15 – Caracterização construtiva das paredes exteriores dos blocos de aulas (adaptado de [22] e [23])

Caraterização construtiva	Foto
Solução 1: - Alvenaria simples de tijolo sem isolamento térmico; - Reboco pintado; OU Solução 2 (não utilizada na sala em estudo): - Alvenaria de tijolo maciço à vista sem isolamento térmico OU Solução 3 (não utilizada na sala em estudo): - Pano simples de betão pintado sem isolamento térmico	

A solução de paredes adotada no modelo para ambas as orientações é uma solução de parede simples de 11 cm rebocada exterior e interiormente, de acordo com o indicado na Fig. 27.

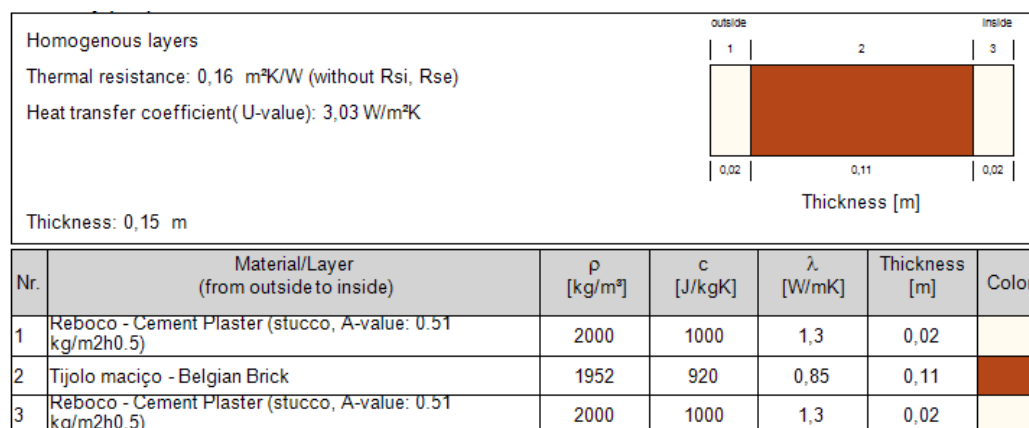


Fig.27 – Caracterização construtiva das paredes exteriores utilizadas no modelo [34]

3.3.3. VÃOS ENVIDRAÇADOS

As soluções construtivas dos vãos envidraçados existentes estão representadas na Tabela 16. Em relação às proteções solares pelo interior, na sala do Caso de Estudo estas assumem a forma de lâminas metálicas ajustáveis e encontram-se no vão orientado a poente, conforme a segunda foto presente na Tabela 16, e são inexistentes no vão orientado a nascente.

Tabela 16 – Caracterização construtiva dos vãos envidraçados dos blocos de aulas (adaptado de [23])

Caraterização construtiva	Fotos
- Caixilharia de alumínio sem corte térmico; - Vidro Simples; - Sistema basculante;	
- Proteção solar pelo interior (pontual);	

A solução de vãos envidraçados adotada para ambas as orientações é uma solução de vão envidraçado em alumínio basculante sem corte térmico e vidro simples, de acordo com o indicado na Fig. 28.

Uw-mounted	[W/m²K]	6.2
Frame factor	[-]	0.70
SHGC (short-wave radiation average)	[-]	0.85
SHGC hemispherical	[-]	0.85
Long wave radiation emissivity (mean glazing/frame)	[-]	0.8

Fig.28 – Caracterização dos vãos envidraçados utilizados no modelo [34]

Esta solução inclui não só o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado (conjunto do vidro e caixilho), como também a fração envidraçada, o fator solar do vidro e a sua emissividade.

Por outro lado, no modelo da sala em estudo (e salas anexas), para os envidraçados a nascente não foi definida nenhum tipo de proteção solar. Mas, como para os vãos orientados a poente ela existe, conforme a Tabela 16, foi considerado um estore de lâminas interior de cor clara com fator solar de 0,40 e resistência térmica adicional do espaço de ar de $0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, não tendo sido estabelecida resistência térmica adicional para o estore/persiana interior veneziana.

Além disso, e apesar de se ter noção de poderem ocorrer inúmeras situações de utilização das proteções solares nas variadas escolas, estabeleceu-se um padrão em que os estores existentes a poente estariam fechados quando não ocorressem aulas (férias, fins de semana, períodos noturnos, etc.) de forma a evitar que os raios solares degradassem o mobiliário interior.

Tendo em conta a carta solar, que estabelece os períodos em que há radiação solar incidente no interior da sala de aula durante o tempo em que decorrem as aulas, para cada orientação, estabeleceu-se no

programa um calendário e horário de utilização das várias proteções solares. Assim, tendo em conta que por motivos de desconforto luminoso geral e para os raios solares diretos não perturbarem os alunos sentados junto aos vãos envidraçados, estes estariam totalmente fechados sempre que existisse radiação solar direta incidente, mas manter-se-iam abertos enquanto tal não ocorresse por forma a permitirem que ganhos térmicos devido à luminosidade e radiação indireta fossem aproveitados, sobretudo na estação de aquecimento.

Com efeito, durante o período da manhã desde o início das aulas até cerca das 13h30/14h30 (conforme a altura do ano, tendo em conta a mudança de hora no verão, e que o Sol “chega” mais cedo nesta altura à orientação poente) os estores estão totalmente abertos. Já no período da tarde, das 13h30/14h30 até ao fim das aulas e período após as aulas os estores encontram-se totalmente fechados.

3.3.4. PAVIMENTOS

Nos relatórios de consultoria à reabilitação de escolas da tipologia Brandão a que o autor teve acesso apenas surgia a referência às soluções constituintes do revestimento de piso da sala de aula propriamente dita, constituído por madeira de soalho de pinho, e do corredor de acesso da sala, constituído por um mosaico hidráulico (Fig. 29). Admite-se, no entanto, que o pavimento da escola tenha uma constituição típica, simplificada, de um *Tout Venant* como base de regularização, seguido de uma laje maciça de betão armado, sobre a qual assenta uma camada de forma/regularização de betão.



Fig.29 – Fotografia do revestimento de piso do corredor de acesso à sala de aula (mosaico hidráulico) e da sala de aula propriamente dita (madeira)

As soluções de pavimentos adotadas no modelo em estudo do *WUFI PLUS* para a sala de aula propriamente dita (com 44,2 m²) e corredor de acesso à sala (com 17,2 m²) encontram-se, respetivamente, nas Fig.30 e Fig. 31.

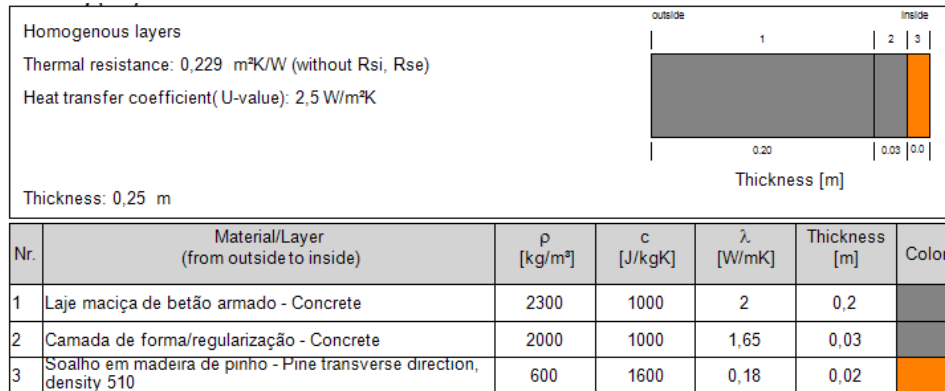


Fig.30 – Caraterização construtiva da solução de pavimento da sala de aula utilizada no modelo [34]

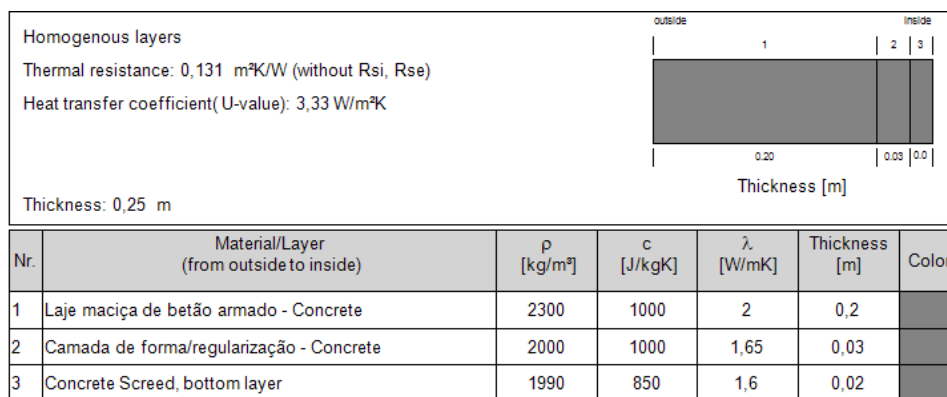


Fig.31 – Caraterização construtiva da solução de pavimento do corredor da sala utilizada no modelo [34]

Comparando os valores dos parâmetros térmicos das soluções anteriores com os valores especificados no REH [40], verifica-se que os coeficientes de transmissão térmica (U) dos pavimentos térreos apresentado pelo *WUFI PLUS* (seja 2,5 W/m².K, seja 3,33 W/m².K) são superiores aos apresentados no Regulamento Português.

Efetivamente, de acordo com o regulamento [40], considerando uma resistência térmica total do pavimento (sem considerar resistências superficiais e correspondente à média pesada das duas soluções de pavimentos adotadas), R_{f (médio)} de 0,202 m².K/W, e uma dimensão caraterística do pavimento (B') de 3 (valor conservativo), obtém-se através da Tabela 03 para U_{bf} o valor de 0,75 W/m².°C. Este valor de U_{bf} é multiplicado pelo diferencial de temperaturas entre o interior e o exterior.

No caso do *WUFI PLUS* considera-se um clima específico para o solo, no qual são definidas ondas sinusoidais para representar a variação da temperatura do terreno ao longo do tempo, estabelecidas com base em normas europeias. É assim, desta forma, considerado o comportamento específico do solo, pois embora os valores do coeficiente de transmissão térmica do pavimento sejam diferentes dos previstos no REH, os efeitos são análogos para ambos os modelos.

3.3.5. SÍNTESE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS TÉRMICOS DOS ELEMENTOS DA ENVOLVENTE A UTILIZAR

De forma a se ter uma visão geral prévia da importância de cada elemento da envolvente exterior e da sua qualidade térmica apresentam-se na Tabela 17 os valores das áreas e dos coeficientes de transmissão térmica (U) dos elementos da envolvente a utilizar na simulação numérica a realizar. O objetivo do estudo de sensibilidade a desenvolver será, portanto, a melhoria dos valores de U através do recurso a soluções otimizadas.

Tabela 17 – Caracterização térmica (simplificada) dos elementos utilizados no modelo em estudo

Elemento da Envolvente	Área [m ²]	Coeficiente de transmissão térmica (U) [W/m ² .°C]
Pavimento	61,2	Sala de aula: 2,50* (44,2 m ²) Corredor da sala: 3,33* (17,0 m ²)
Cobertura	61,2	Sala de aula: 3,92 (44,2 m ²) Corredor da sala: 2,98 (17,0 m ²)
Paredes exteriores	14,4 (9,38 m ² poente + 4,99 m ² nascente)	3,03
Vãos envidraçados	17,2 (9,88 m ² poente + 7,35 m ² nascente)	6,20 (U _w)

*valor de cálculo usado pelo *WUFI PLUS*, distinto dos previstos no regulamento português

De notar que no restante trabalho a desenvolver, devido à obrigatoriedade de cumprimento dos valores dos coeficientes de transmissão térmica regulamentares (U) de todas as soluções a interencionar será sempre apresentado, no caso do pavimento e cobertura, a solução mais desfavorável apesar de o programa considerar todas as soluções definidas na Tabela 17.

Há ainda que destacar o facto de se recorrer, no caso dos envidraçados, ao valor de U_w (coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados) e não U_{w,di} (coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados médio dia-noite) definidos no ITE 50 visto que os edifícios escolares têm uma especificidade de ocupação, ou seja, as aulas decorrem no período diurno, não tendo as escolas qualquer tipo de ocupação no período noturno na maioria dos casos.

3.4. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DA ENVOLVENTE

Para comparar os resultados obtidos com o estudo de sensibilidade realizado na presente Dissertação com eventuais estudos futuros neste âmbito, quer experimentais, quer numéricos, é fundamental a definição o mais detalhada e rigorosa possível das condições de simulação adotadas.

Com efeito, e de acordo com a Fig. 32, são necessárias a definição das condições fronteira de simulação, nomeadamente o clima exterior (abordado em 3.2.2), a definição da envolvente em estudo (modelo fornecido, como já referido, mas do qual se detalhou parte dos seus aspetos essenciais em 3.2.2, 3.2.4 e no subcapítulo 3.3) e o clima estabelecido no interior das salas de aula (os aspetos relativos às condições de utilização foram estabelecidos em 3.2.3, mas importa ainda definir os processos de aquecimento e ventilação adotados). Através de todos estes elementos, o *WUFI PLUS* fará a simulação do desempenho higrotérmico e apresentará todos os resultados necessários para o estudo de sensibilidade a realizar, sendo estes exportados e tratados no *Microsoft EXCEL*.

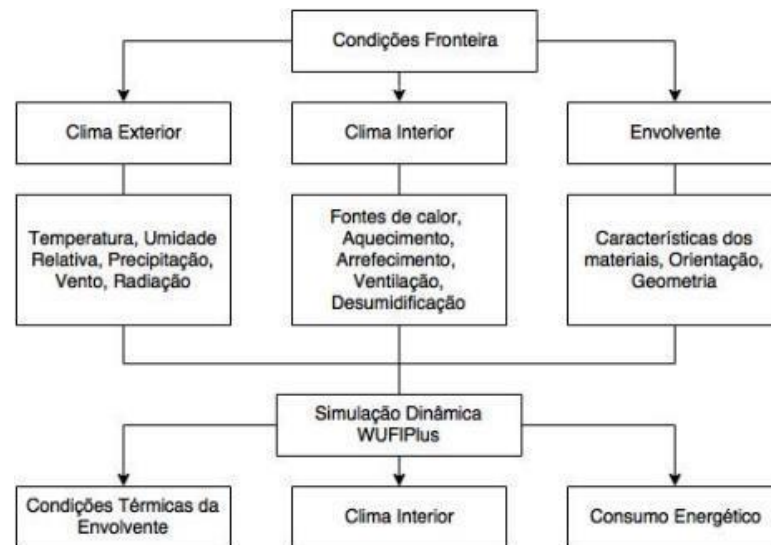


Fig.32 – Condições fronteira e resultados (resumo) da simulação com o WUFI PLUS [31]

Assim, relativamente ao sistema de aquecimento foram definidas duas situações:

- Num primeiro grupo de simulações não se estabeleceu qualquer sistema de aquecimento de modo a simular a variação da temperatura interior da sala em regime de flutuação livre e avaliar as suas condições de conforto sem aquecimento;
- No segundo grupo de simulações foi adotado um sistema de aquecimento elétrico “ideal”, estabelecido com potência por defeito até 50 kW para cada sala (potência total, por excesso, a fornecer desde o início do funcionamento do sistema, caso fosse necessário), de forma a permitir o fornecimento de toda a energia de aquecimento necessária à sala para a manutenção de uma temperatura mínima de conforto de 20 °C durante todo o período de aulas. Foi também tido o cuidado de estabelecer no programa um calendário e horário de funcionamento unicamente durante o período de aulas, estando a sala consequentemente em flutuação livre sempre que não haja qualquer ocupação. Assim, através da definição das condições de conforto mínimo durante o período de aulas, o programa quantificará toda a energia necessária para aquecimento, quando necessário, permitindo dessa forma o cálculo do consumo energético para garantir condições de conforto relativas à temperatura mínima na sala em estudo (apenas se recolherá a informação relativa a uma sala apesar de se aquecer as salas anexas). Apesar do aumento de consumo que eventualmente esta opção possa representar (porque os sistemas de aquecimento a adotar não serão, por razões económicas, dimensionados para a potência máxima necessária no ano inteiro), ela é muito vantajosa na interpretação dos dados resultantes da melhoria de elementos da envolvente, uma vez que garante condições interiores semelhantes durante o período de aulas para todas as soluções, ou seja, um diferencial de temperaturas entre o interior e exterior semelhante, permitindo assim uma melhor avaliação das implicações da melhoria da qualidade térmica dos elementos intervencionados no consumo energético final.

Em relação à ventilação da sala utilizou-se uma ventilação constante durante todos os períodos do ano de 400 m³/h em cada uma das salas de aula (garantindo aproximadamente 2,60 renovações horárias por sala), e a implementar possivelmente através de um sistema novo de ventilação mista, visto que o atual sistema de ventilação natural não garante um caudal de ventilação que permita uma concentração não demasiado elevada de poluentes interiores no inverno, conforme estudos experimentais realizados

na sala em estudo. De referir, como nota importante, que a energia consumida por estes sistemas de ventilação não está incluída no consumo energético em quaisquer resultados apresentados na presente Dissertação.

É discutível a simulação do caudal de ventilação durante o ano inteiro como constante, no entanto pretendeu-se encontrar uma solução de ventilação que pudesse representar as várias escolas a estudar. Concretizando, apesar de se saber que os ventiladores não estarão a funcionar, em princípio, durante o período noturno e férias escolares (ou seja, existirá nessas situações um caudal de ventilação substancialmente menor), não se sabe se o período de duração da ventilação, quer antes, quer após as aulas, vai bastante além dos períodos em que a sala de aulas está ocupada (por outras palavras, não se sabe se, por exemplo, se será adotada aquando da implementação de intervenções de reabilitação, ventilação centralizada servindo várias salas e/ou inclusivamente casas de banho requerendo um funcionamento do sistema de ventilação como um todo muito para além do período de aulas). Tentando minimizar possíveis críticas que possam eventualmente surgir em relação à solução adotada e sua análise, apenas se apresentou o resultado das simulações realizadas no estudo de sensibilidade para o período de aulas (1365 horas e não o total das 8760 horas do ano). Por outro lado, pretendeu-se também com a solução de ventilação constante adotada representar ao mesmo tempo a abertura de janelas na estação de arrefecimento (em que os ventiladores estarão desligados), que se espera que permaneçam também abertas durante o período noturno e que desse modo se garantam condições de arrefecimento mais propícias a diminuir a ocorrência de problemas de sobreaquecimento durante o dia, visto que não se adotou qualquer sistema de arrefecimento.

Este assunto, relativo aos sistemas de ventilação modelados no programa e suas implicações voltará a ser analisado com maior cuidado, mais adiante, no subcapítulo 3.5 e aplicado no caso concreto da solução técnico-energética mais adequada obtida no estudo de sensibilidade.

Por fim, importa referir que de forma a que as condições iniciais dos materiais simuladas (por exemplo, o seu teor de humidade) não tivessem influência nos resultados do estudo de sensibilidade, adotou-se um período de simulação de 2 anos completos (anos 2017 e 2018) para todas as simulações realizadas, correspondendo o primeiro ano à estabilização das propriedades dos materiais, apenas se recolhendo para tratamento dos resultados os dados do segundo ano simulado. Efetivamente, foi assegurado que o período de 2 anos era satisfatório pois ao comparar os resultados do segundo ano tipo de simulação (visto utilizar-se um clima de um ano tipo, em que as condições climáticas exteriores da última hora do ano correspondem às mesmas condições da primeira hora do ano seguinte) obteve-se valores das condições interiores da sala de aula muito semelhantes entre a primeira e última hora de 2018 (entre as 0 horas de 1 de janeiro de 2018 e as 24 horas de 31 de dezembro de 2018), comprovando-se que os resultados do segundo ano de simulação eram relativamente fiáveis ao já ter havido uma estabilização das propriedades dos materiais suficiente ao longo do primeiro ano de simulação.

3.4.1. SOLUÇÕES A ANALISAR

No estudo de sensibilidade a realizar pretende-se simular o desempenho higratérmico de várias combinações de soluções de reabilitação possíveis de cada elemento da envolvente exterior (coberturas (C), paredes exteriores (P) e vãos envidraçados/proteções solares (E)), de forma a no fim se atingir um resultado que corresponda à melhor solução técnico-energética. Para o efeito foi elaborada uma matriz de sensibilidade (Fig.33 e Fig.34) onde estão presentes as principais soluções a estudar no âmbito do estudo de sensibilidade da envolvente exterior (cada elemento em cores distintas) e todas as restantes soluções possíveis, para condições de ventilação constantes (V em m^3) nas orientações Este/Oeste (E-O) e Sul/Norte (S-N). Será de seguida apresentada uma análise explicativa da matriz de sensibilidade

(Fig.33 e 34) mas pode desde já adiantar-se que a primeira letra representada corresponde ao elemento construtivo (C e P) e o número à espessura de isolamento nas coberturas/paredes a adotar para essa simulação, enquanto que para os vãos envidraçados/proteções solares (E) os números representam sucessivamente a solução inicial, a alteração das proteções solares e por fim a alteração destas e do tipo de envidraçado.

PORTO																																							
C0												C6												C10															
P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8						
E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3				

Fig.33 – Matriz de sensibilidade das simulações principais a realizar, isolando o pavimento em 3 cm (parte 1)

PORTO																											
C15														C20													
P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8						
E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3				
V400	S	N	E	O																							
V600	S	N	E	O																							
V800	S	N	E	O																							
V1000	S	N	E	O																							

■ Isolamento Cobertura

Fig.34 – Matriz de sensibilidade das simulações principais a realizar, isolando o pavimento em 3 cm (parte 2)

Na matriz de sensibilidade apresentada as soluções a cinzento referem-se à adoção de sistemas de ventilação distintos do definido no início do subcapítulo 3.4 e que apenas serão tratadas para a melhor solução técnico-energética obtida, visto que se pretende primeiramente definir uma solução construtiva de reabilitação adequada e só depois discutir o tipo de sistemas passível de ser adotado.

Assim, ao longo deste subcapítulo serão discutidas as soluções da envolvente exterior apresentadas a cores na matriz de sensibilidade (Fig.33 e Fig.34) para a ventilação constante de 400 m³/h:

- Espessura de isolamento sobre laje da cobertura: C0 (sem isolamento); C6 (espessura de 6 cm de isolamento, mínimo regulamentar); C10 (espessura de 10 cm de isolamento); C15 (espessura de 15 cm de isolamento); C20 (espessura de 20 cm de isolamento);
- Espessura de isolamento interior das paredes exteriores: P0 (sem isolamento); P2 (isolamento de 2 cm, atualmente não regulamentar); P4 (isolamento de 4 cm, mínimo regulamentar); P8 (isolamento de 8 cm);
- Soluções de envidraçados e proteções solares: E1 (Envidraçado com caixilharia metálica e vidro simples; estore de lâminas interior de cor clara apenas no vão poente); E2 (Caixilharia metálica e vidro simples; proteção exterior móvel de lâminas metálicas e cor clara); E3 (Caixilharia metálica com corte térmico e vidro duplo de baixa emissividade; proteção exterior móvel de lâminas metálicas e cor clara);
- Variação da orientação: Este-Oeste e Sul-Norte visto a sala possuir duas frentes e desta forma serem abordados todos os pontos cardeais principais (apenas em 3.4.6.2).

Devido ao tempo levado pelo programa na realização de cada simulação (os dois anos estabelecidos demoram a simular, em média, cerca de 1h20 dado tratar-se de uma simulação higrotérmica complexa global, de todos os elementos construtivos, e de todas as zonas do modelo e suas condições climáticas interiores) não foi possível a realização de todas as simulações da matriz de sensibilidade num período compatível com a realização desta Dissertação. Por este motivo foram realizadas, para além das apresentadas a cores, apenas as consideradas mais relevantes e que permitem retirar elações sobre as estratégias de reabilitação mais eficientes do ponto de vista energético. Com efeito, é importante referir que ao longo do estudo de melhoria de cada elemento construtivo serão retiradas conclusões que permitem que certas soluções da matriz possam ser excluídas sem recurso a um estudo económico visto que, por um lado a melhoria energética por elas obtida pode ser muito diminuta, ou pelo contrário ser muito benéfica e implicar a sua adoção (como a necessidade de isolar a cobertura com a espessura mínima).

Por cada solução de reabilitação da envolvente exterior apresentada nos pontos seguintes deste subcapítulo, explorando individualmente as soluções para cada elemento construtivo, será apresentada uma análise da temperatura interior da sala de aula em flutuação livre ao longo de todo o período de aulas, bem como uma quantificação do sobreaquecimento das salas com base no IDT (parâmetro que permite a quantificação do desconforto térmico estabelecido no subcapítulo 2.4). Porém, dado apenas se pretender instalar sistemas de aquecimento (e ventilação) na reabilitação das escolas em estudo, devido à estação de aquecimento representar a grande maioria do tempo de aulas e na maioria do período do verão a grande maioria das salas não estarem em funcionamento devido às férias escolares, será dada importância primordial ao valor do consumo energético de aquecimento para garantir condições de conforto. Este servirá também como um indicador de custos energéticos de aquecimento e qualidade da envolvente térmica, razão pela qual se adotou o seu valor na matriz de sensibilidade para a comparação global dos valores do estudo de sensibilidade a apresentar na síntese do estudo.

Quanto aos resultados obtidos nas várias simulações do estudo de sensibilidade, o programa simula os dois anos inteiros estabelecidos, mas apenas serão tratados os dados referentes aos períodos de aulas do segundo ano (correspondendo a 1365 horas). Exceção será feita numa reflexão prévia de “preparação do estudo de sensibilidade” (3.4.2), apresentando-se apenas para este caso os valores referentes ao ano inteiro de forma a aproveitar avaliar a importância das perdas e ganhos anuais por cada elemento construtivo. Esta “reflexão prévia” visa evidenciar a necessidade de colocação de isolamento térmico no pavimento e leva à escolha da espessura de 3 cm de isolamento a adotar no pavimento em todo o estudo de sensibilidade da envolvente exterior das Fig. 33 e Fig.34.

3.4.2. PAVIMENTO

3.4.2.1. Simulações

Conforme referido, será realizado um “estudo preliminar” que visa avaliar a influência da diminuição do valor do coeficiente de transmissão térmica do pavimento térreo definida pelo *WUFI* no desempenho energético da sala de aula. Assim, através da aplicação de poliestireno expandido extrudido (XPS), a utilizar no isolamento dos restantes elementos da envolvente e com as propriedades já estabelecidas em 3.2.4) pretende-se verificar se isolando o pavimento com a espessura de 3 cm obtemos benefícios substanciais na diminuição do consumo energético da sala tipo que justifiquem o seu uso para a simulação das diversas soluções de reabilitação da envolvente exterior. De referir que este isolamento não é exigido pelo regulamento português pois não são estabelecidos requisitos mínimos para elementos em contato com o solo.

Em relação ao pavimento entendeu-se ser interessante não só a avaliação do efeito do seu comportamento em contato com o solo, sem e com isolamento, no consumo energético, mas também da sua influência no fluxo de energia pelos diversos elementos da envolvente exterior. Para uma melhor comparação utilizou-se ainda o caso de isolamento da cobertura com a espessura mínima regulamentar (REH) para se compreender melhor o efeito que o isolamento do pavimento e cobertura tem na percentagem das perdas e ganhos pelos diversos elementos da envolvente exterior. Este último caso de isolamento da cobertura voltará a ser abordado em 3.4.3, mas aí já num contexto de solução de reabilitação possível em que se pretende avaliar sobretudo o conforto térmico e consumo energético durante as aulas.

As simulações a apresentar estão sintetizadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Simulações a realizar para o estudo do pavimento

1ª Simulação (Tabela 17)*		2ª Simulação (C0-P0-E1, cons. Fig.33)		3ª Simulação (C6-P0-E1, cons. Fig.33)	
<i>Sem isolamento de cobertura e pavimento</i>		<i>Isolamento de 3 cm do pavimento</i>		<i>Isolamento de 6 cm da cobertura e 3 cm do pavimento</i>	
U (cob.)	U (pav.)	U (cob.)	U (pav.)	U (cob.)	U (pav.)
3,92	3,33*	3,92	0,67	0,38	0,67
W/(m ² .°C)	W/(m ² .°C)	W/(m ² .°C)	W/(m ² .°C)	W/(m ² .°C)	W/(m ² .°C)

* valor de cálculo usado pelo *WUFI PLUS* distinto dos previstos no regulamento [40]

Nas Fig. 35, Fig. 36 e Fig. 37 estão representados as perdas e os ganhos de calor (incluindo o efeito de transferência de calor e inércia térmica) para o 2º ano de simulação inteiro, ou seja 8760 horas, dos vários elementos da envolvente exterior em cada orientação, para as 1ª, 2ª e 3ª simulações definidas na Tabela 18, respetivamente. Apresentam-se também a indicação do total de perdas e ganhos por m², visto ser um indicador bastante usado para avaliar a *performance* energética. Como se pretende analisar para já apenas a influência relativa dos vários elementos da envolvente nas perdas e ganhos da sala, não foram apresentados os ganhos e perdas por ventilação, mas tem-se a noção de que os seus efeitos influenciam substancialmente o comportamento térmico da sala. Será realizada primeiramente uma análise descritiva após a apresentação das Fig.35, Fig.36 e Fig.37, para seguidamente ser realizada uma análise comparativa e interpretativa dos resultados obtidos.

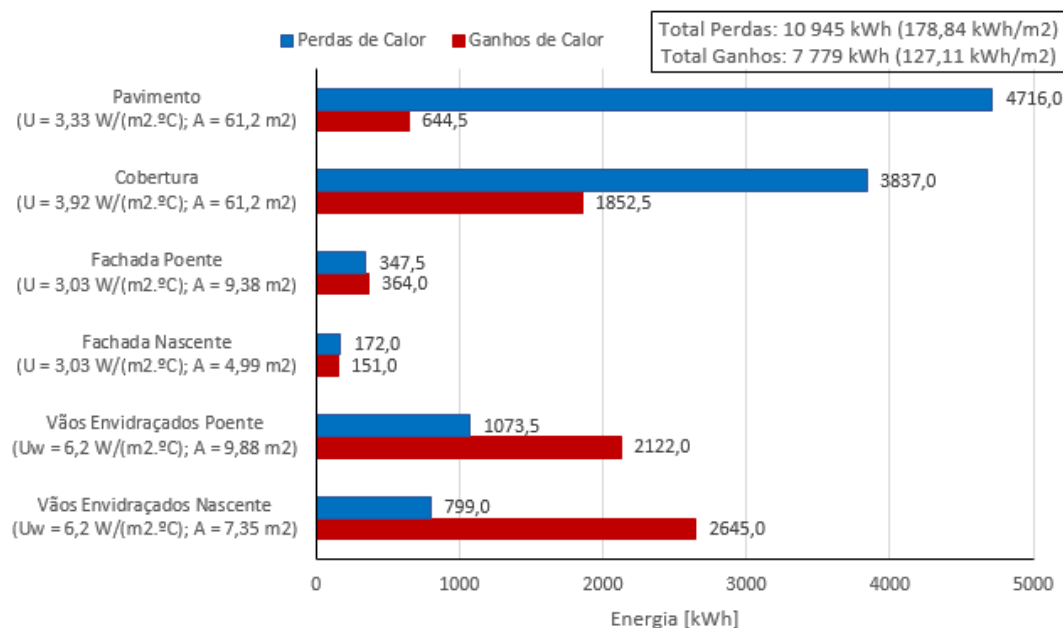


Fig.35 – Perdas e ganhos energéticos pela envolvente exterior para a 1ª Simulação, no período de 1 ano inteiro (8760 horas), com o aquecimento normal durante o período de aulas

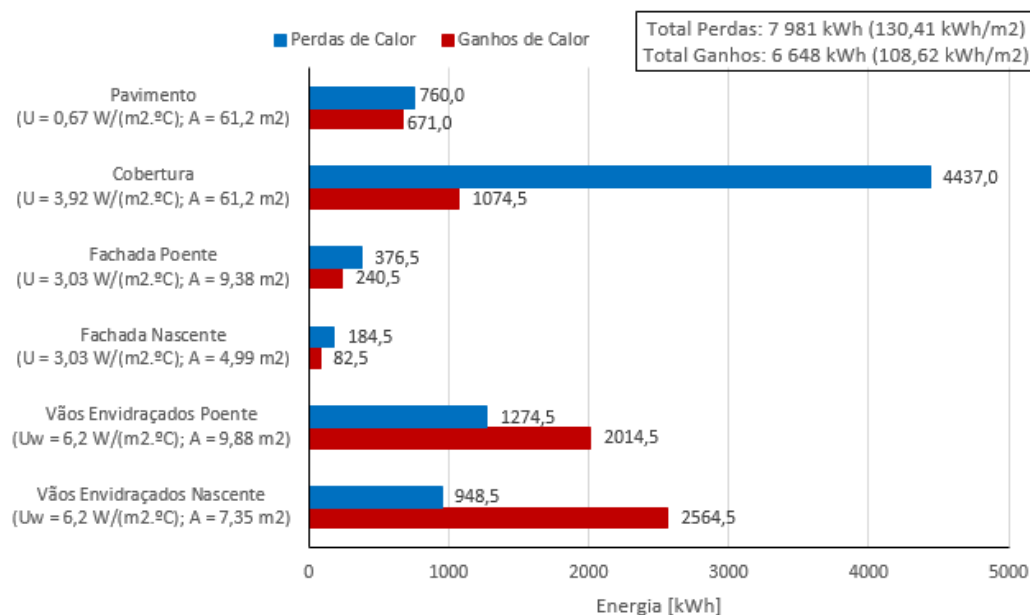


Fig.36 – Perdas e ganhos energéticos pela envolvente exterior para a 2ª Simulação, no período de 1 ano inteiro (8760 horas), com o aquecimento normal durante o período de aulas

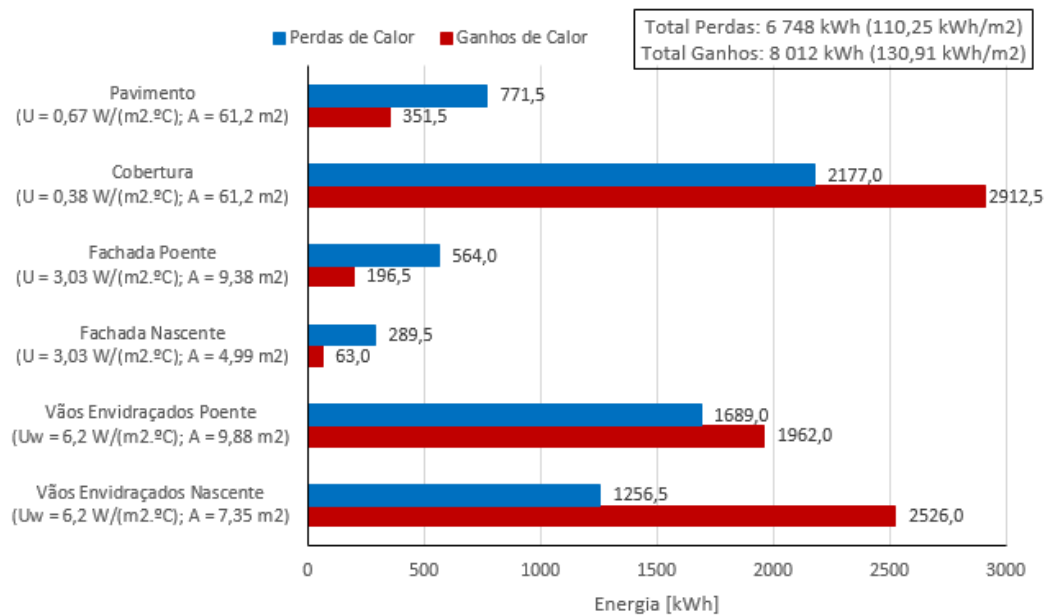


Fig.37 – Perdas e ganhos energéticos pela envolvente exterior para a 3ª Simulação, no período de 1 ano inteiro (8760 horas), com o aquecimento normal durante o período de aulas

Da análise da Fig. 35 verificam-se que as principais perdas de energia pelos elementos da envolvente ocorrem através do pavimento e cobertura, enquanto os principais ganhos se dão sobretudo através dos vãos envidraçados (inclui o efeito dos ganhos solares). De notar que, conforme referido, os ganhos pelas paredes (e restantes elementos) envolvem ganhos relativos tanto ao fluxo de calor do exterior para o interior, sobretudo no verão quando o ambiente exterior está muitas vezes a temperatura mais elevada, como também à inércia dos elementos construtivos, que acumulam energia durante o dia enquanto a sala é aquecida (durante o período de aulas) e vão libertando essa energia num período temporal distinto (e já sem aulas) assim que a sala começa a baixar a temperatura. Quanto à proteção solar dos vãos a poente e sua ausência nos vãos a nascente implica que os ganhos energéticos, sobretudo os resultantes da radiação solar direta, não sejam proporcionais à área de envidraçados tal como acontece no caso das perdas.

Da análise da Fig. 36 (e comparando com a Fig.35) verifica-se que isolando o pavimento há uma drástica redução de perdas de energia para o solo. Assim, as principais perdas pelos elementos da envolvente já não se dão pelo pavimento, mas sim pela cobertura e vãos envidraçados. Este aspeto está muito relacionado com a grande área do pavimento em relação aos restantes elementos da envolvente. Tal como no caso anterior, a proteção solar dos vãos a poente e sua ausência nos vãos a nascente implica que os ganhos térmicos, sobretudo os resultantes da radiação solar direta, não sejam proporcionais à área de envidraçados como acontece no caso das perdas.

Por fim, da análise da Fig. 37 (e comparando com a Fig. 36) verifica-se que a cobertura não só diminui bastante as suas perdas, como passa também a fornecer bastante mais energia devido ao isolamento restringir a saída de calor e à forte inércia da cobertura invertida (isolamento sobre a laje de cobertura) permitir uma maior acumulação dessa energia e posteriormente a libertar maioritariamente para o interior. Nesta situação embora o total dos vários ganhos pela envolvente supere o valor das perdas, no contexto global haverá sempre bastantes mais perdas devidas à ventilação, considerada constante para todas as simulações e igual a $400 \text{ m}^3/\text{h}$, que não foram aqui objetivamente consideradas.

3.4.2.2. Análise de resultados

Apresentam-se seguidamente as Fig.38, Fig.39 e Tabela 19 que pretendem sintetizar todos os resultados das simulações de análise do pavimento/cobertura previstas na Tabela 18 para facilitar a sua comparação e interpretação. Assim, na Fig. 38 apresenta-se uma comparação do consumo energético anual que cada simulação representa, e na Tabela 19 é apresentada a poupança energética associada a cada simulação em relação ao modelo inicial do *WUFI*. Já na Fig. 39 são agrupados os resultados das Fig.35, Fig.36 e Fig.37 relativamente às perdas e ganhos energéticos anuais por cada elemento da envolvente, sem a inclusão do efeito da ventilação.

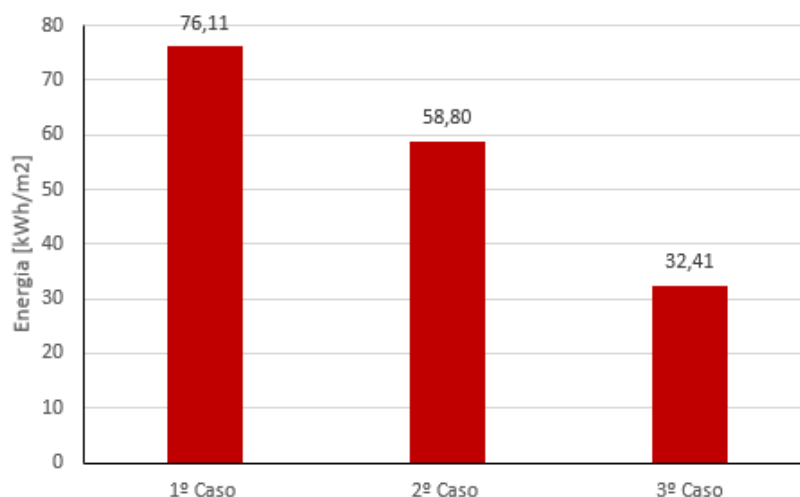


Fig.38 – Consumo energético anual, em kWh/m², de cada simulação para condições de conforto durante o período de aulas

Tabela 19 – Poupança energética associada a cada simulação apresentada na Tabela 18 em relação ao modelo inicial do *WUFI*

1ª Simulação	
Consumo Energético	76,11 kWh/(m ² .ano)
Poupança Energética [%]	
2ª Simulação (58,80 kWh/(m ² .ano))	22,7
3ª Simulação (32,41 kWh/(m ² .ano))	57,4

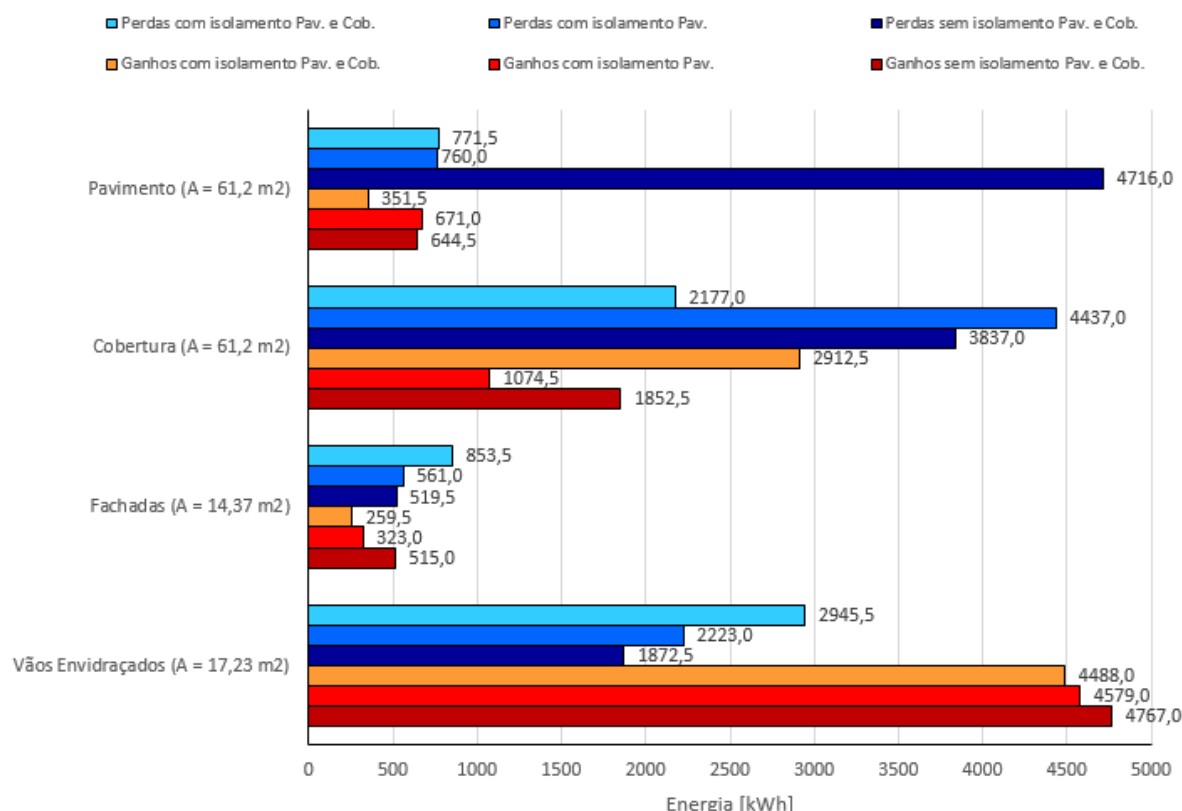


Fig.39 – Perdas e ganhos energéticos anuais (8760 h), em kWh, pela envolvente exterior de todas as simulações apresentadas, com normal aquecimento durante o período de aulas

Da análise da Fig.39, conjuntamente com a Fig.38 e Tabela 19, verifica-se que sempre que se recorre à melhoria energética de um elemento da envolvente, simultaneamente constata-se um aumento das perdas energéticas absolutas pelos restantes elementos. São o caso das paredes e vãos envidraçados, quer quando isolamos a cobertura, quer o pavimento. O mesmo também é verificável no pavimento quando isolamos a cobertura, ou pelo contrário, quando se isola o pavimento na cobertura. Comprova-se assim, a importância de uma análise dinâmica do comportamento higratérmico. Com efeito, ao isolarmos um componente não melhoramos o desempenho térmico global tanto como esperaríamos, uma vez que os outros componentes pioram ligeiramente o seu desempenho e, portanto, a melhoria não será tão boa como a esperada em regime estático.

Por outro lado, ao isolarmos elementos da envolvente verifica-se geralmente um aumento de ganhos energéticos pelos elementos isolados dado que, haverá uma menor dissipação de energia para o exterior devido ao aumento da resistência térmica, contribuindo para a sua acumulação e dissipação já após as aulas para o interior da sala em maior quantidade, levando também a um arrefecimento mais lento e gradual.

Verifica-se também uma diminuição dos ganhos energéticos totais (transmissão térmica, inércia, ganhos solares) pelas paredes e vãos envidraçados quando se isola o pavimento ou se isola a cobertura. Tal poderá ser explicado pelo facto de o isolamento da envolvente, como referido, levar a um arrefecimento mais lento da sala após o fim do período das aulas. Consequentemente, origina-se um fluxo de energia inercial menor entre a envolvente e o interior, levando a que a energia acumulada se dissipe mais para o exterior e reduzindo, portanto, a energia disponível fornecida para o interior da sala de aula. De notar, que tal facto não prejudicará o desempenho energético da sala em serviço dado que o

menor ritmo de arrefecimento da sala não terá relevância no período após o término das aulas, ou seja, este efeito de inércia térmica acaba por não ser devidamente aproveitado. Dado que o que pretendemos é garantir boas condições ambientais interiores durante o período de aulas (1365 h) não terá tanta relevância análises para todo o ano (8760 h), pelo que o estudo apenas do período de aulas (1365 h) para as várias soluções contidas no estudo de sensibilidade da Fig.33 e Fig.34 seguidamente realizado permitirá uma maior facilidade de interpretação dos fenómenos e resultados no comportamento da sala durante o período de ocupação.

Em termos práticos, o isolamento do pavimento pode considerar-se fundamental dada a sua elevada dimensão superficial, obtendo-se uma poupança energética global de 22,7 % e uma diminuição das perdas de calor pelo pavimento de cerca de 80 %, pelo que serão utilizados 3 cm de isolamento do pavimento térreo em XPS ($\lambda = 0,025 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$) para a realização do estudo de sensibilidade das simulações dos elementos da envolvente exterior. De destacar também que, entre o 2º e o 3º casos simulados apenas se isolou a cobertura e constata-se um acréscimo elevado da poupança energética (de 22,7 % para 57,4 %), concluindo-se que será fundamental isolar a cobertura (assunto melhor explorado adiante).

Optou-se portanto, como referido, por adotar uma espessura de isolamento de 3 cm e por não realizar um estudo de sensibilidade mais aprofundado relativamente ao isolamento do pavimento, visto as condições do solo serem muito semelhantes ao longo do tempo e variando pouco de local para local, o que não se verifica em relação ao ambiente exterior para climas diferentes, pelo que os elementos entre este e o interior da sala serão alvo de um estudo de sensibilidade mais aprofundado.

3.4.3. COBERTURA

O estudo de sensibilidade, conforme já referido, abordará dois cenários de aquecimento: o de flutuação livre (aquecimento nulo) e uma estratégia de aquecimento de inverno que visa a obtenção de temperaturas de conforto mínimo de 20°C, considerada como a temperatura mínima adequada para eficientes condições de aprendizagem.

Apresentam-se seguidamente os dois cenários referidos relativos ao aquecimento para o caso de isolamento mínimo regulamentar da cobertura, considerada como a intervenção indispensável a realizar na envolvente numa intervenção de reabilitação (Fig.40), para uma semana tipo completa, tendo sido escolhida a 1ª semana completa do mês de janeiro de 2018 (Tabela 20).

Tabela 20 – Ocupação e dias de semana na 1ª semana completa do mês de janeiro de 2018

Dia de calendário	Dia da semana	Horário escolar
7 janeiro 2018	domingo	Não há aulas
8 janeiro 2018	2ª feira	8h00 – 18h00
9 janeiro 2018	3ª feira	8h00 – 18h00
10 janeiro 2018	4ª feira	8h00 – 13h00
11 janeiro 2018	5ª feira	8h00 – 18h00
12 janeiro 2018	6ª feira	8h00 – 13h00
13 janeiro 2018	sábado	Não há aulas

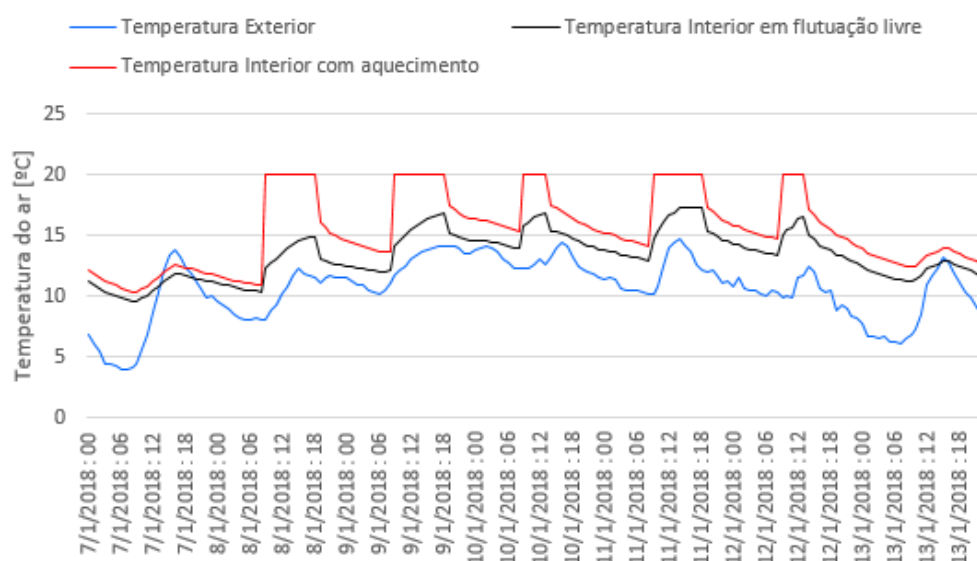


Fig.40 – Temperatura exterior e interior, em °C, para os casos de flutuação livre (aquecimento nulo) e estratégia de conforto mínimo de 20°C, para a semana completa da Tabela 20, e para a solução C6-P0-E1 da Fig.33

Através da análise da Fig.40 (2ª simulação, Tabela 21) verifica-se que em nenhum período da semana, quer a temperatura exterior, quer a interior em flutuação livre atinge a temperatura de conforto de 20°C, pelo que será sempre necessário aquecimento no período de aulas. São claramente visíveis 5 picos da temperatura interior com aquecimento (curva a vermelho) que correspondem precisamente aos 5 dias úteis da semana e horário em que decorrem as aulas, para o qual foram definidas as condições de conforto mínimo de 20°C. Verifica-se simultaneamente durante esses períodos, no caso de flutuação livre, um acréscimo de temperatura devido aos ganhos internos com origem na ocupação humana.

Nas restantes simulações deste trabalho, apesar de no *WUFI PLUS* ser analisado o comportamento higrotérmico no período completo do ano, só serão apresentados, para melhor visualização e interpretação dos resultados, os resultados relativamente ao período de aulas (1365 h).

3.4.3.1. Simulações

As soluções a analisar, apresentadas na Tabela 21, correspondem apenas a intervenções de reabilitação na cobertura, pretendendo-se avaliar a influência de diferentes espessuras de isolamento térmico (incluindo a solução mínima regulamentar atual, solução 2) sobre a laje de cobertura. Serão para o efeito analisadas individualmente a temperatura interior em flutuação livre e consequentes condições de conforto, bem como o consumo energético mensal necessário em cada solução para ser garantido o conforto térmico durante o período das aulas (valor total e por unidade de superfície). Novamente, mais à frente, os resultados de todas as simulações serão agrupados de forma a se poder comparar as diversas soluções e retirar conclusões.

Tabela 21 – Simulações a realizar para o estudo da cobertura

Simulações (consultar Fig.33)	Espessura de isolamento da cobertura [cm]	$U_{\text{cobertura}}$ (fluxo ascendente)* [W/(m ² .°C)]	Cumprimento Regulamentar [41] ($U_{\text{máx}} = 0,40 \text{ W/(m}^2\text{.°C)}$)
1ª Simulação (C0-P0-E1)	0	3,92	NÃO CUMPRE
2ª Simulação (C6-P0-E1)	6	0,38	CUMPRE
3ª Simulação (C10-P0-E1)	10	0,23	CUMPRE
4ª Simulação (C15-P0-E1)	15	0,16	CUMPRE
5ª Simulação (C20-P0-E1)	20	0,12	CUMPRE

* Isolamento em XPS ($\lambda = 0,025 \text{ W/m.°C}$) [34]; $R_{\text{si}} = 0,10 \text{ (m}^2\text{.°C)/W}$ e $R_{\text{se}} = 0,04 \text{ (m}^2\text{.°C)/W}$ [39]

Apresentam-se nas Fig.41, Fig.43, e Fig.45 as curvas de probabilidade acumulada de temperaturas interiores em regime de flutuação livre, no período de 1 ano de aulas, apenas da 1ª à 3ª simulação devido aos resultados da 3ª, 4ª e 5ª simulações serem muito semelhantes em termos de temperaturas acumuladas; e nas Fig.42, Fig.44, Fig.46, Fig.47 e Fig.48 os consumos energéticos mensais para manter condições de conforto durante o período de aulas, da 1ª à 5ª simulação da Tabela 21, respetivamente. O conjunto de resultados para cada uma das simulações é o seguinte:

- Simulação 1 (C0-P0-E1)

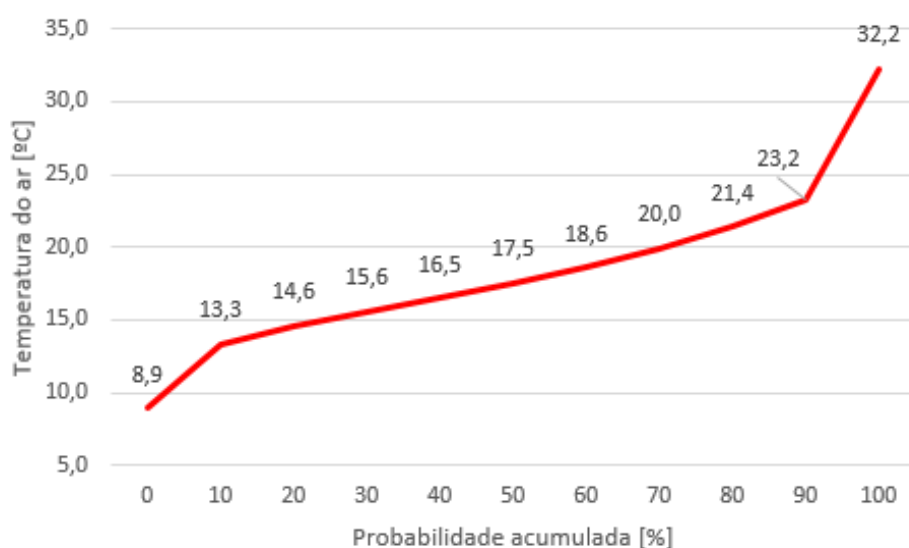


Fig.41 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C0-P0-E1

Da análise da Fig.41 verifica-se que, sem aquecimento, 70% das temperaturas interiores são inferiores aos 20°C desejáveis durante o período de aulas, registando-se uma gama de valores da temperatura entre uma mínima de 8,9°C e máxima de 32,2°C, com média de 18,1°C.

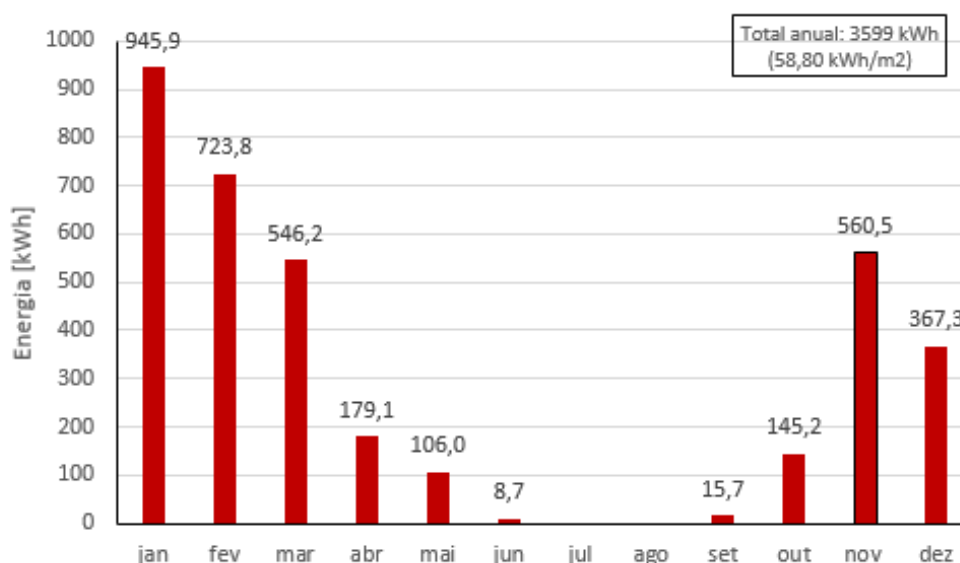


Fig.42 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C0-P0-E1

- Simulação 2 (C6-P0-E1)

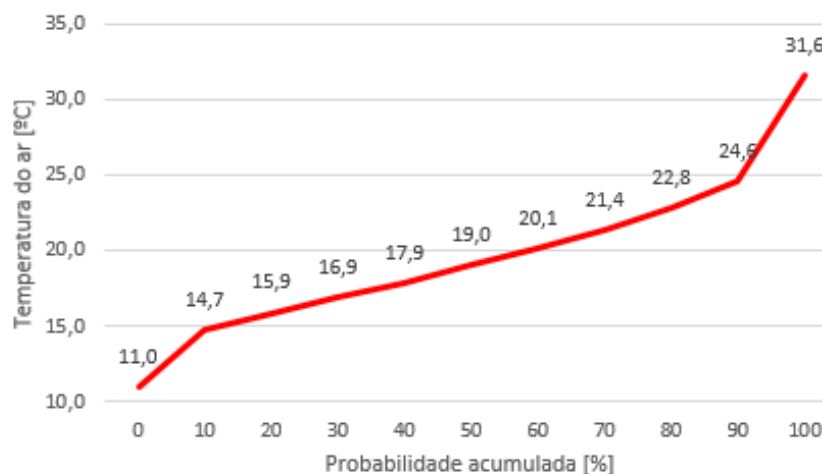


Fig.43 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P0-E1

Da análise da Fig.43 (e comparação com a simulação anterior na Fig.41) verifica-se que, sem aquecimento, passa-se de uma percentagem de 70% para cerca de 60% de temperaturas interiores inferiores aos 20°C desejáveis, durante o período de aulas. Regista-se nesta nova solução uma gama de valores da temperatura entre uma mínima de 11,0°C e máxima de 31,6°C, com média de 19,4°C. Importante relembrar que uma semana tipo em que se compara a temperatura interior em flutuação livre e com aquecimento com a temperatura exterior foi já apresentada anteriormente na Fig. 40.

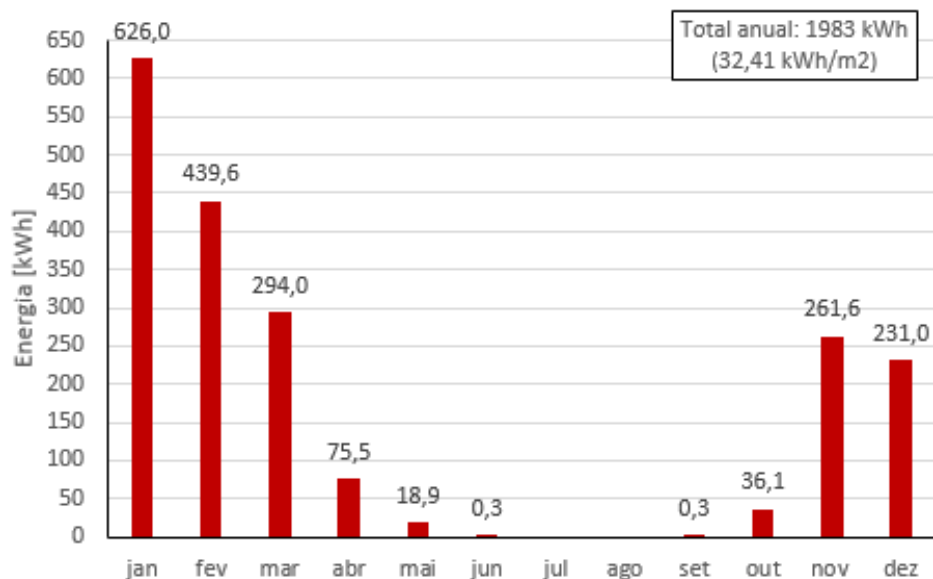


Fig.44 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E1

- Simulação 3 (C10-P0-E1)

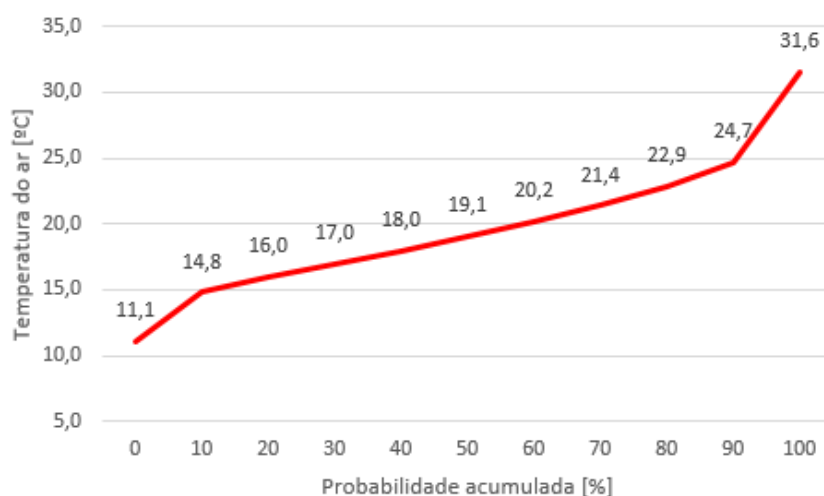


Fig.45 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C10-P0-E1

Da análise da Fig.45 (e comparação com a simulação anterior na Fig.43) verifica-se que, sem aquecimento, a percentagem de temperaturas interiores inferiores aos 20°C desejáveis, durante o período de aulas, mantém-se em cerca de 60%. Regista-se nesta nova solução uma gama de valores da temperatura muito semelhante, entre uma mínima de 11,1°C e máxima de 31,6°C, com média de 19,5°C.

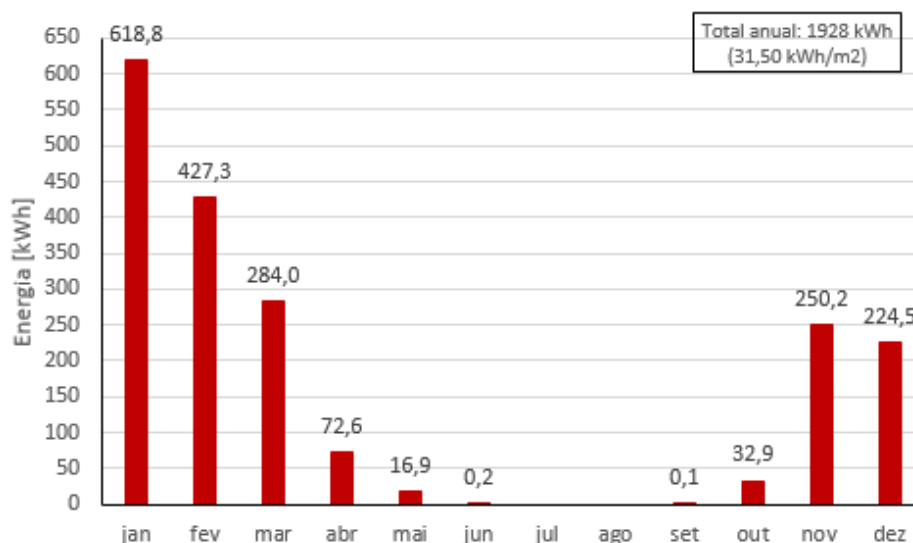


Fig.46 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C10-P0-E1

- Simulação 4 (C15-P0-E1)

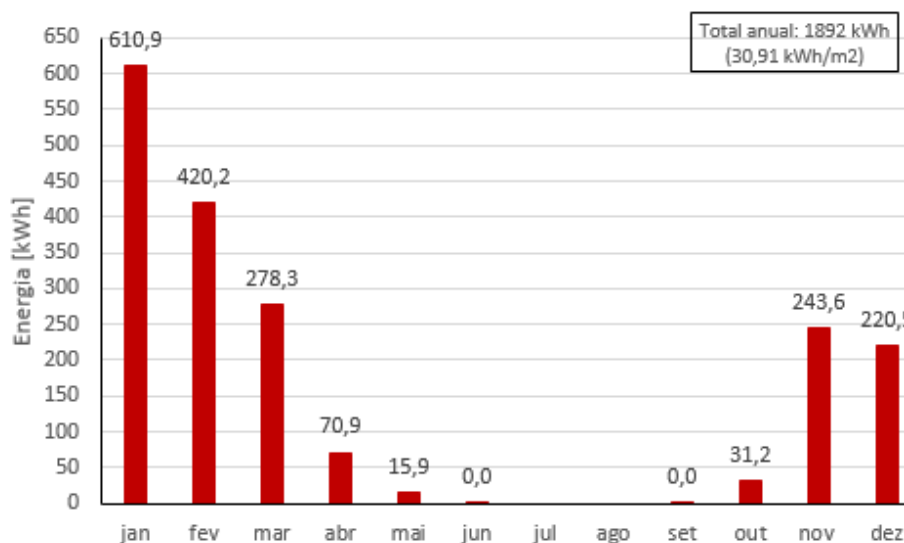


Fig.47 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C15-P0-E1

Relativamente às curvas de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em regime de flutuação livre e durante o período de aulas, há uma grande semelhança entre as curvas da 3ª, 4ª e 5ª simulações, pelo que não se justifica a sua repetição. Devemos no entanto referir que ao isolar a cobertura mais de 10 cm, sem qualquer intervenção noutro elemento da envolvente, não estaremos a melhorar as condições de conforto interiores no caso de não se aquecer. Estabelece-se assim, o valor máximo de melhoria, equivalente a 60% de desconforto, pelo que o aquecimento durante o período de aulas será inevitável numa intervenção que apenas contemple a cobertura.

- Simulação 5 (C20-P0-E1)

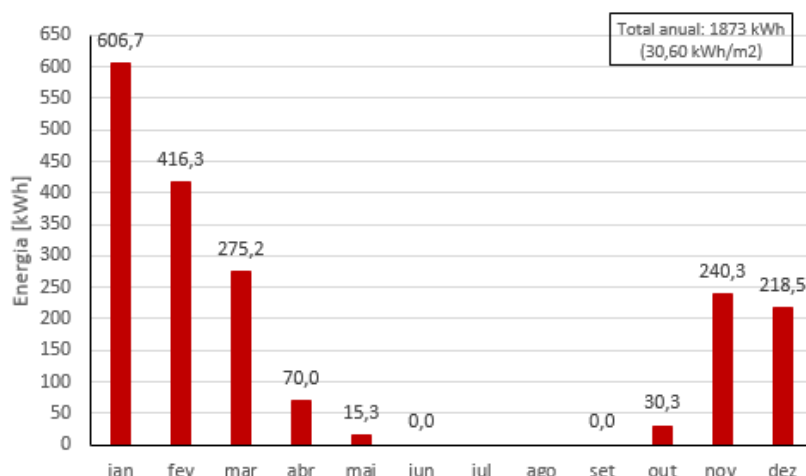


Fig.48 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C20-P0-E1

3.4.3.2. Análise de resultados

Após a apresentação individual dos aspetos mais relevantes de cada simulação (1^a a 5^a), serão agora apresentados os resultados comparativos das várias soluções de isolamento da cobertura em termos de temperatura interior em flutuação livre/sem aquecimento; analisados os problemas de sobreaquecimento na estação de arrefecimento; e realizada uma comparação do consumo energético anual e consequente poupança energética que cada solução propicia. Serão obtidas conclusões que permitirão propor as melhores soluções quanto à espessura de isolamento a utilizar na cobertura.

Na Fig.49 são comparados os percentis de temperatura interior correspondente a uma probabilidade de 10% (ou seja, a temperatura mínima expectável em vários dias) e a mediana das várias soluções, por forma a permitir verificar uma evolução mais clara das temperaturas “mínima” e mediana, e na Fig.50 são apresentadas as curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores sem aquecimento.

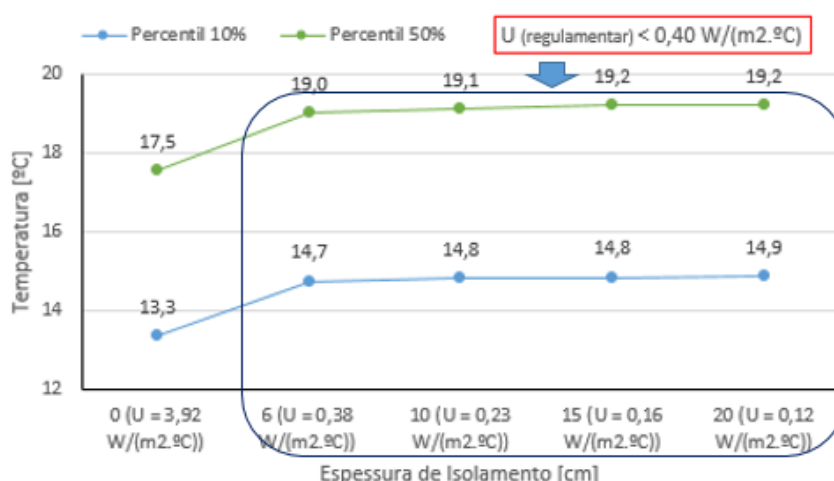


Fig.49 – Percentis de 10% e mediana das temperaturas interiores de todas as simulações, em °C, em regime de flutuação livre e para o período de aulas (1365 h)

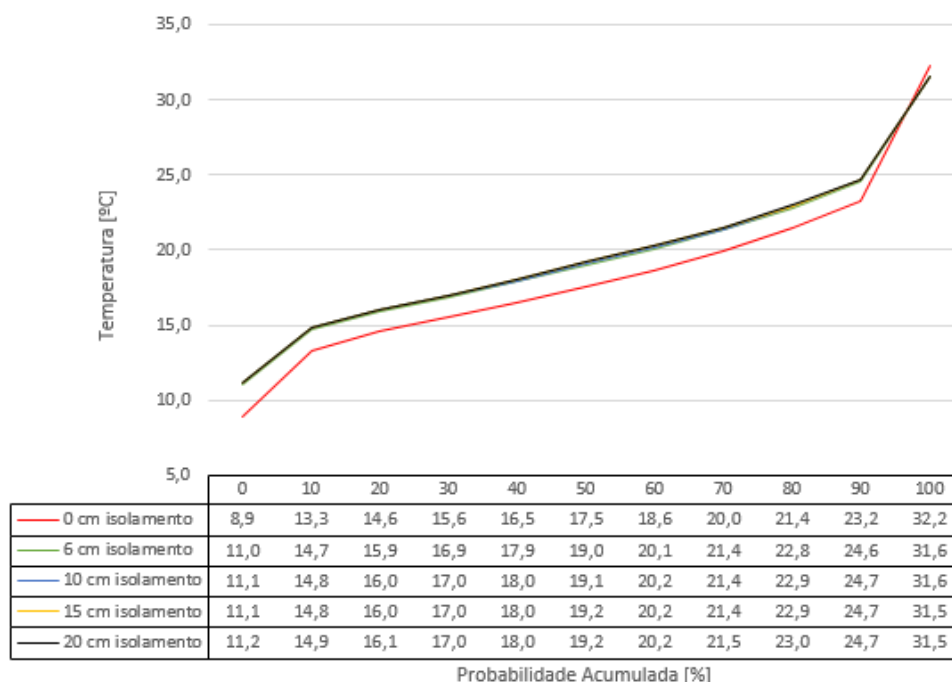


Fig.50 – Curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para todas as simulações

Da análise conjunta das Fig.49 e Fig.50 verifica-se que ao isolar a cobertura com qualquer espessura regulamentar existem mais 10% de temperaturas de conforto (superiores a 20°C), o que implica um aumento ligeiro do conforto sem aquecimento. Com efeito, a melhoria máxima é de 70% para 60% de temperaturas de desconforto o que implicará inevitavelmente que se aqueçam as salas após a reabilitação da cobertura. Assim, não isolando a cobertura e isolando com 6 cm (solução mínima regulamentar, para $\lambda = 0,025 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) a melhoria obtida é a mais significativa, havendo uma coincidência de temperaturas acumuladas para todos os restantes casos de isolamento. Comprova-se também a importância da estação de aquecimento (cerca de 60% de desconforto, a compensar com aquecimento) em relação à estação de arrefecimento (em que existem menos de 10% de temperaturas de desconforto).

Segue-se agora uma análise do desconforto térmico na estação de arrefecimento, durante as aulas e usando uma “estratégia de aquecimento de inverno” (Tabela 22 e Fig.51), com base no IDT (Indicador de Desconforto Térmico) já apresentado no subcapítulo 2.4, pretendendo-se verificar a influência que o isolamento da cobertura tem no sobreaquecimento.

Tabela 22 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno

Espessura de isolamento da cobertura	0 cm	6 cm	10 cm	15 cm	20 cm
N.º total horas aulas ($T > 25^\circ\text{C}$)	94	121	123	124	124
N.º total horas aulas ($T > 25^\circ\text{C}$) em %	6,9	8,9	9,0	9,1	9,1

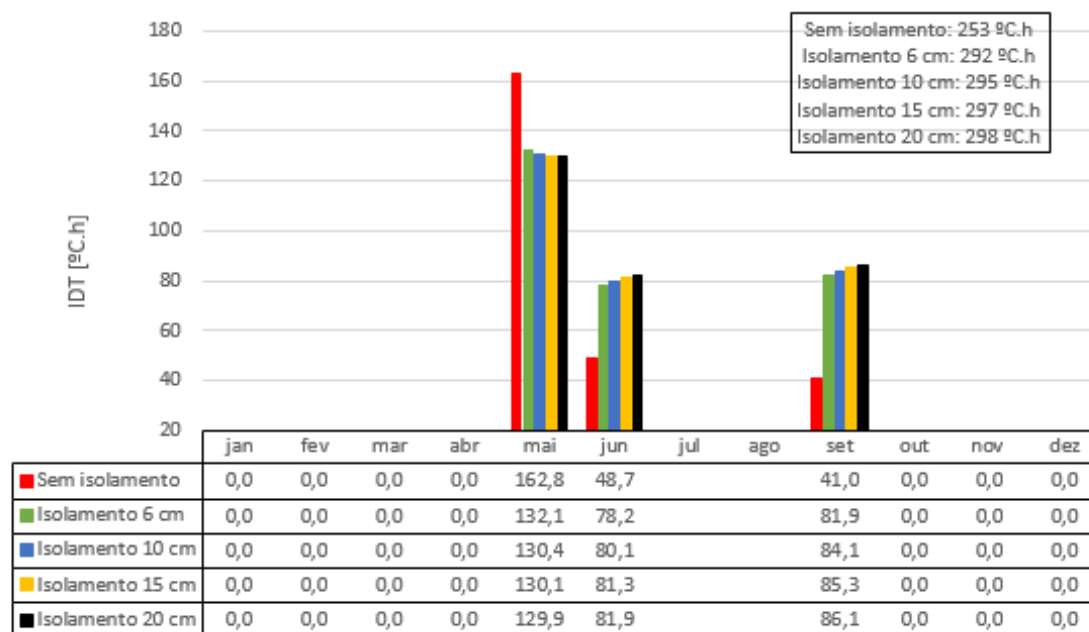


Fig.51 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h)

Da análise conjunta da Tabela 22 e Fig.51 verificam-se diferenças de comportamento entre maio e junho/setembro no desenvolvimento de sobreaquecimento. Por um lado, de 28 a 31 de maio há dias muito quentes, com temperaturas exteriores entre os 25°C e 32°C praticamente durante todo o período do dia em que decorrem aulas, sendo que o isolamento na cobertura impede desta forma o fluxo de calor do exterior para o interior da sala levando a menor IDT. No restante período em que se verifica sobreaquecimento (junho e setembro), a temperatura exterior encontra-se mais “amena” (temperaturas maioritariamente entre os 20°C e 25°C), sendo neste caso maior o sobreaquecimento quando isolamos devido a evitar o fluxo de calor interior (mais quente) para o exterior (mais frio). As várias espessuras de isolamento apresentam um IDT muito semelhante entre si, comprovando-se que as implicações no sobreaquecimento da sala se devem sobretudo à presença ou ausência de isolamento na cobertura pois, os resultados obtidos entre diferentes espessuras de isolamento são semelhantes, o que revela não existir qualquer vantagem no seu aumento relativamente a este critério.

Conforme referido, a eficiência energética é o critério mais importante visto a estação de aquecimento ser a predominante no uso dos edifícios escolares e à necessidade de não só, poupar energia e recursos financeiros no aquecimento, como também contribuir para uma maior sustentabilidade. Quanto aos consumos energéticos mensais estes já foram apresentados individualmente, importando agora fazer uma comparação dos consumos anuais de aquecimento entre as diversas soluções simuladas (Fig.52) e apresentar uma relação entre a poupança de energia obtida em relação à solução inicial (Tabela 23).

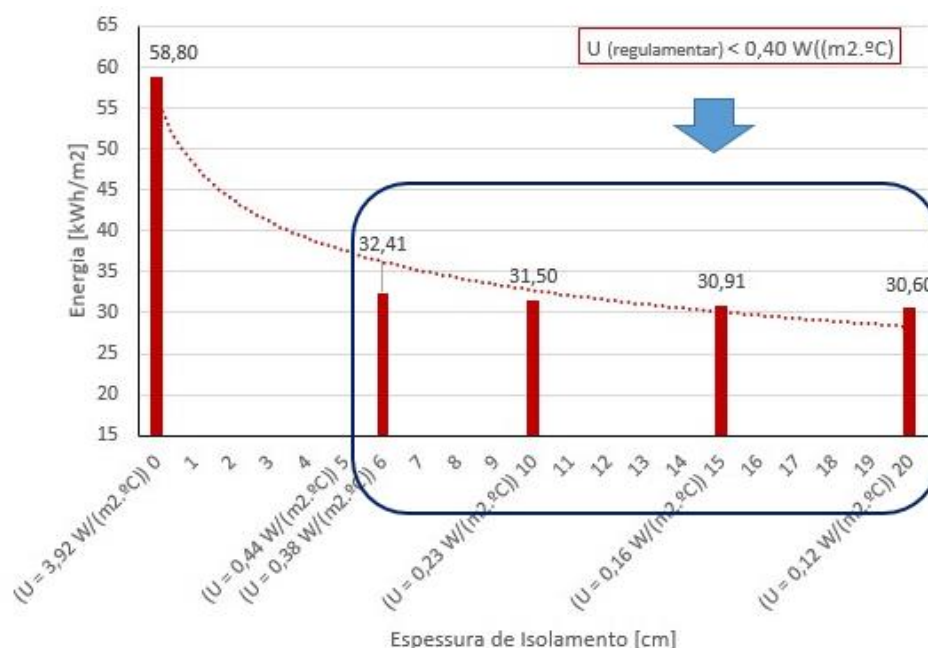


Fig.52 – Consumo energético anual, em kWh/m², de cada solução de isolamento da cobertura, para condições de conforto durante o período de aulas

Tabela 23 – Poupança energética associada a cada solução de isolamento da cobertura

Cobertura sem isolamento ($U_{cob.} = 3,92 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$)	
Consumo Energético	58,80 kWh/(m².ano)
Poupança Energética [%]	
Isolamento 6 cm (32,41 kWh/(m².ano))	44,9
Isolamento 10 cm (31,50 kWh/(m².ano))	46,4
Isolamento 15 cm (30,91 kWh/(m².ano))	47,4
Isolamento 20 cm (30,60 kWh/(m².ano))	48,0

Na Fig.52 utilizou-se a função do EXCEL que tem melhor correlação com os dados apresentados, tendo-se escolhido uma função com $r^2=92,8\%$, embora seja perceptível que provavelmente haverá uma assíntota em 30 kWh/m² de consumo energético anual. Entre 0 cm e 6 cm de isolamento da cobertura, solução mínima regulamentar, o gasto energético para manter condições de conforto é significativamente inferior, consumindo-se apenas quase metade do que originalmente sem isolamento, devido a ter-se baixado bastante o coeficiente de transmissão térmica (U) da cobertura e a esta ter uma grande importância na envolvente exterior.

Isolar a cobertura será fundamental, originando-se poupanças muito significativas porém, é necessário isolar apenas na “medida do justo necessário”. Quanto mais isolarmos, estamos a gastar mais recursos económicos, contudo a vantagem de poupança energética é muito pouco significativa. Deste modo isolar 6 cm é uma solução fundamental e que parece ser a mais interessante do ponto de vista técnico-energético, sendo que isolar 10 cm apesar de não trazer grandes vantagens em relação à solução de 6

cm, poderia eventualmente ser usada se em conjunto com outras intervenções na envolvente que melhorassem o seu desempenho, apenas comprovável através de um estudo económico, mas com viabilidade possivelmente apenas a um prazo muito longo, não sendo por isso aconselhável. Quanto às soluções de 15 cm e 20 cm não apresentam vantagens acrescidas e implicam maiores custos, pelo que não justificam sequer uma análise económica.

No restante estudo de sensibilidade adotou-se a espessura regulamentar de 6 cm de isolamento para a cobertura ($\lambda = 0,025 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$), sendo que em relação às intervenções nos restantes elementos da envolvente (substituição envidraçados, isolamento e colocação de novo pano interior no caso das paredes) será a que apresentará um menor custo/m². Em suma, as soluções com isolamento apresentam particularidades relevantes em relação à solução sem isolamento. Assim, isolando, e com aquecimento gastam significativamente menos energia, e no verão podem apresentar vantagens e/ou inconvenientes conforme o clima. Com efeito, não sobreaquecem tanto em dias muito quentes, mas prejudicam o fluxo de calor da sala para o exterior em tempos mais amenos, levando a um maior sobreaquecimento.

3.4.4. PAREDES EXTERIORES

Conforme referido, a primeira zona a intervir numa reabilitação de uma escola Brandão será a cobertura, não só pelo custo da solução de isolamento, mas também pela necessidade de substituir o fibrocimento existente em muitas escolas. Assim, em termos de reabilitação térmica, deverá ser adotada a espessura de 6 cm ($\lambda=0,025 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$), visto ser a mínima regulamentar com o isolamento térmico adotado neste estudo (naturalmente que soluções de isolamento com características diferentes podem implicar diferente espessura para o cumprimento regulamentar de $U_{\text{cob.}} < 0,40 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$). Esta ação é, na prática, justificável devido ao custo bastante menor de colocação de isolamento sobre a laje de cobertura em relação a outras soluções e por melhorar muito a eficiência energética, razão pela qual para o estudo de sensibilidade das soluções de isolamento das paredes exteriores será já adotada a solução de isolamento da cobertura de 6 cm.

As soluções de paredes a analisar, apresentadas na Tabela 24, pretendem avaliar a influência de diferentes espessuras de isolamento térmico (incluindo a solução mínima regulamentar atual, solução 2). Importante referir que se isolou interiormente uma parede simples, pelo que foi necessário colocar um pano de alvenaria suplementar (11 cm) e reboco interior como forma de sua proteção.

Tabela 24 – Simulações a realizar para o estudo das paredes exteriores poente e nascente

Simulações (consultar Fig.33)	Espessura de isolamento das paredes [cm]	$U_{\text{paredes exteriores}}^*$ [W/(m ² .°C)]	Cumprimento Regulamentar [41] ($U_{\text{máx}} = 0,50 \text{ W/(m}^2.^\circ\text{C)}$)
1ª Simulação (C6-P0-E1)	0	3,03	NÃO CUMPRE
2ª Simulação (C6-P4-E1)	4	0,49	CUMPRE
3ª Simulação (C6-P8-E1)	8	0,27	CUMPRE

* Isolamento em XPS ($\lambda = 0,025 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$) [34]; $R_{\text{si}} = 0,13 \text{ (m}^2.^\circ\text{C)/W}$ e $R_{\text{se}} = 0,04 \text{ (m}^2.^\circ\text{C)/W}$ [39]

3.4.4.1. Simulações

Apresentam-se na Fig.53 a curva probabilidade acumulada de temperaturas interiores em regime de flutuação livre, no período de 1 ano de aulas (1365 h), apenas da 2ª simulação devido aos resultados da 2ª e 3ª simulações (Tabela 24) serem muito semelhantes em termos de temperaturas acumuladas e ao da 1ª simulação já ter sido apresentado na Fig.43; e nas Fig.54 e Fig.55 os consumos energéticos mensais para manter condições de conforto durante o período de aulas da 2ª e 3ª simulação da Tabela 24, respetivamente, tendo na Fig.44 sido já apresentado esses resultados para a 1ª simulação. Novamente, mais à frente, os resultados de todas as simulações serão agrupados de forma a se poder comparar as diversas soluções e retirar conclusões. O conjunto de resultados para cada uma das simulações é o seguinte:

- Simulação 1 (C6-P0-E1)

Da análise da Fig.43 (2ª Simulação das coberturas - isolamento com 6 cm de XPS) constatou-se que, sem aquecimento, cerca de 60% das temperaturas interiores são inferiores aos 20°C desejáveis durante o período de aulas. Nesta solução a gama de valores da temperatura varia entre uma mínima de 11,0°C e máxima de 31,6°C, com média de 19,4°C.

- Simulação 2 (C6-P4-E1)

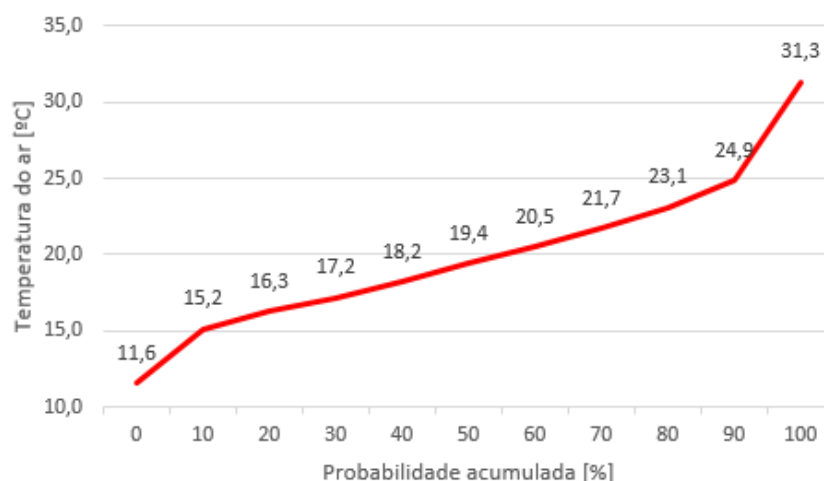


Fig.53 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P4-E1

Da análise da Fig.53 (e comparação com o exposto na 1ª Simulação, C6-P0-E1) verifica-se que, sem aquecimento, passa-se de uma percentagem de 60% para cerca de 55% de temperaturas interiores inferiores aos 20°C desejáveis, durante o período de aulas. Regista-se nesta nova solução uma gama de valores da temperatura entre uma mínima de 11,6°C e máxima de 31,3°C, com média de 19,8°C.

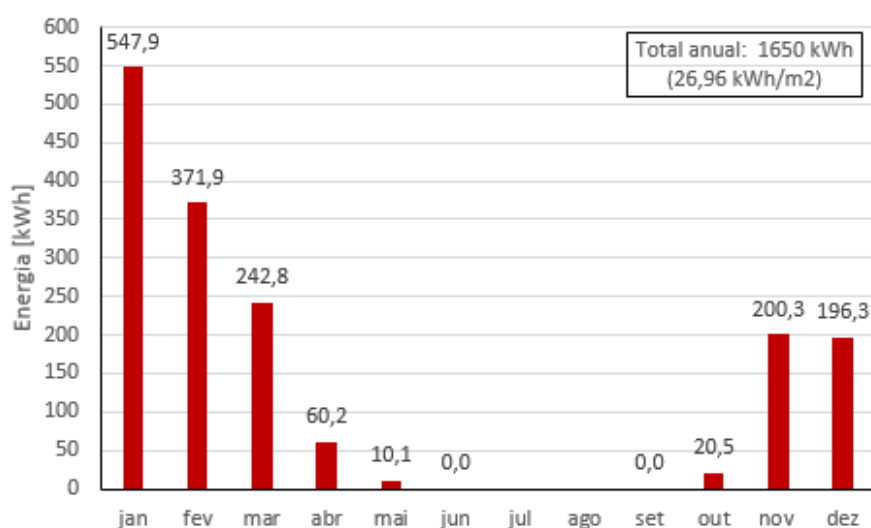


Fig.54 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P4-E1

- Simulação 3 (C6-P8-E1)

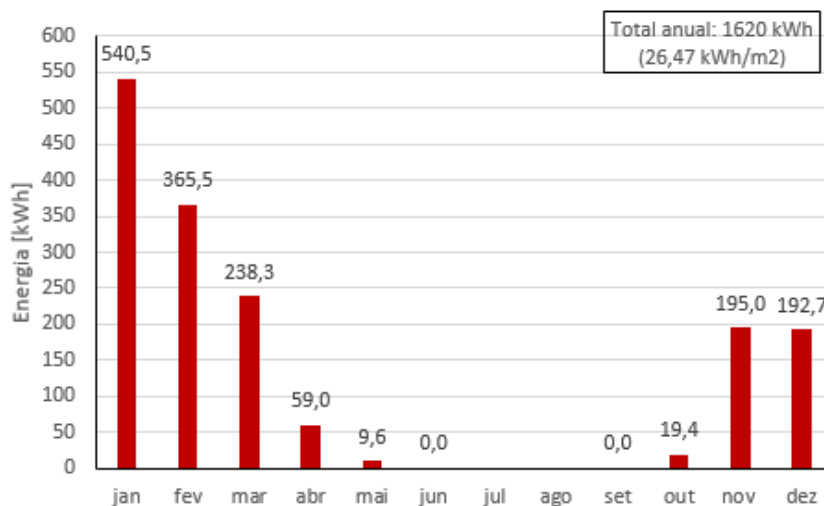


Fig.55 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P8-E1

Relativamente às curvas de probabilidade acumuladas de temperaturas interiores, em regime de flutuação livre e durante o período de aulas, há uma grande semelhança entre as curvas da 2^a e 3^a simulações, pelo que não se justifica a sua repetição. Devemos no entanto referir que ao isolar as paredes exteriores mais de 4 cm (espessura mínima regulamentar) não estaremos a melhorar as condições de conforto interiores no caso de não se aquecer. Estabelece-se assim, o valor máximo de melhoria, equivalente a 55% de desconforto, pelo que o aquecimento durante o período de aulas será inevitável.

3.4.4.2. Análise de resultados

Após a apresentação individual dos aspetos mais relevantes de cada simulação (1ª a 3ª), serão agora apresentados os resultados comparativos das várias soluções de isolamento das paredes exteriores em termos de temperatura interior em flutuação livre/sem aquecimento; analisados os problemas de sobre-aquecimento na estação de arrefecimento; e realizada uma comparação do consumo energético anual e consequente poupança energética que cada solução propicia.

Na comparação do consumo energético anual e poupança energética associada a cada solução foi ainda incluída a solução de isolamento de parede de 2 cm, não regulamentar atualmente, e que permitirá, por um lado, uma melhor aproximação da curva associada aos consumos energéticos das soluções de isolamento intermédias não analisadas (uso de 4 pontos em vez de 3), e por outro permitirá retirar elações sobre se os requisitos atuais serão os mais indicados para soluções de reabilitação de paredes exteriores. Serão obtidas conclusões que permitirão propor as melhores soluções quanto à espessura de isolamento a utilizar nas paredes exteriores, incluindo o caso de parede original simples (Caso de Estudo) ou de uso de parede dupla.

Na Fig.56 são apresentadas as curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores sem aquecimento, e na Fig.57 são comparados, os percentis de temperatura interior correspondente a uma probabilidade de 10% (ou seja, a temperatura mínima expectável em vários dias) e a mediana das várias soluções, por forma a permitir verificar uma evolução mais clara das temperaturas “mínima” e mediana.

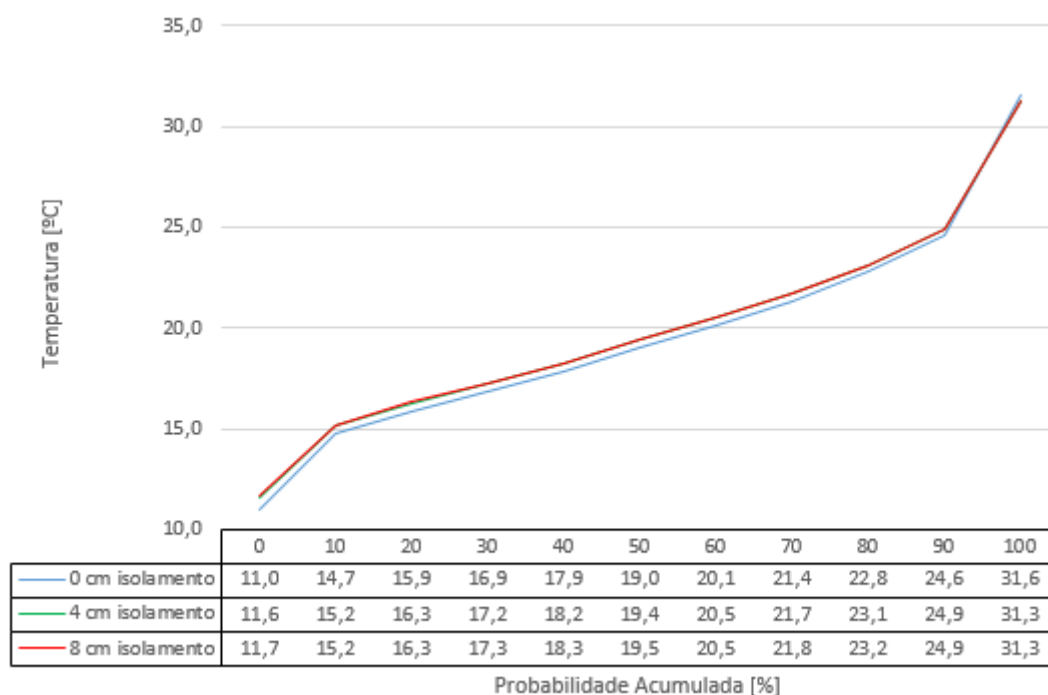


Fig.56 – Curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores, em °C, sem aquecimento, e durante o período de aulas, para todas as simulações de isolamento das paredes exteriores, mas mantendo uma espessura de 6 cm de isolamento da cobertura

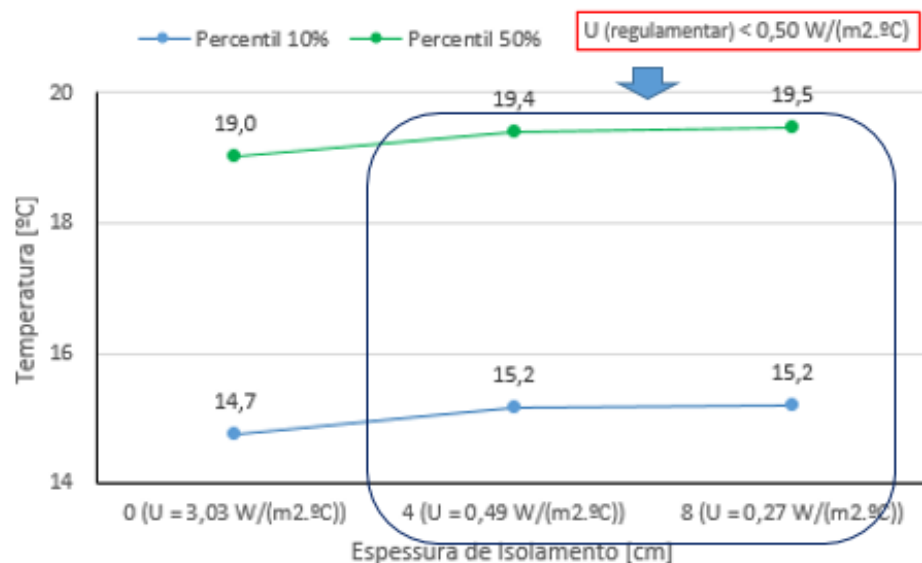


Fig.57 – Percentis de 10% e mediana das temperaturas interiores das simulações de paredes exteriores, em °C, sem aquecimento, para o período de aulas, e adotando uma espessura de isolamento da cobertura de 6 cm

Da análise conjunta das Fig.56 e Fig.57 verifica-se que ao isolar (interiormente) as paredes exteriores com qualquer espessura regulamentar existem mais 5% de temperaturas de conforto (superiores a 20°C), o que implica um aumento ligeiro do conforto sem aquecimento. Com efeito, a melhoria máxima é de 60% para 55% de temperaturas de desconforto, o que implicará inevitavelmente que se aqueçam as salas. Assim, não isolando a parede exterior e isolando com 4 cm (solução mínima regulamentar) a melhoria obtida é a mais significativa, havendo uma coincidência de temperaturas acumuladas para casos de isolamento superiores. De notar, que apesar de as melhorias serem menores que as obtidas na intervenção da cobertura, o valor de U da parede simples inicial é muito elevado e tecnicamente é recomendável a diminuição desse valor.

Segue-se agora uma análise do desconforto térmico na estação de arrefecimento, durante as aulas e usando numa “estratégia de aquecimento de inverno” (Tabela 25 e Fig.58), com base no IDT (Indicador de Desconforto Térmico), já apresentado no subcapítulo 2.4, pretendendo-se verificar a influência que o isolamento das paredes exteriores tem no sobreaquecimento.

Tabela 25 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno

Espessura de isolamento da parede	0 cm	4 cm	8 cm
N.º total horas aulas (T>25°C)	121	134	134
N.º total horas aulas (T>25°C) em %	8,9	9,8	9,8

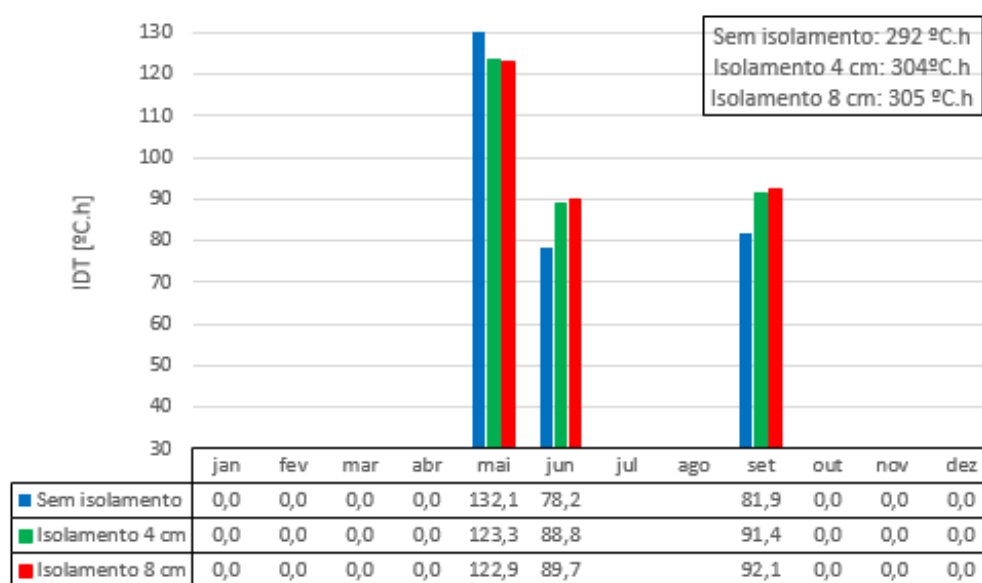


Fig.58 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h)

Da análise conjunta da Tabela 25 e Fig.58 verificam-se novamente diferenças de comportamento entre maio e junho/setembro no desenvolvimento de sobreaquecimento. Por um lado, de 28 a 31 de maio há dias muito quentes, com temperaturas exteriores entre os 25°C e 32°C praticamente durante todo o período do dia em que decorrem aulas, sendo que o isolamento das paredes impede desta forma o fluxo de calor do exterior para o interior da sala levando a menor IDT. No restante período em que se verifica sobreaquecimento (junho e setembro), a temperatura exterior encontra-se mais “amena” (temperaturas maioritariamente entre os 20°C e 25°C), sendo neste caso maior o sobreaquecimento quando isolamos devido a evitar o fluxo de calor interior (mais quente) para o exterior (mais frio).

As várias espessuras de isolamento apresentam um IDT praticamente igual, comprovando-se que as implicações no sobreaquecimento da sala se devem sobretudo à presença ou ausência de isolamento nas paredes exteriores pois, os resultados obtidos entre diferentes espessuras de isolamento são iguais, o que revela não existir qualquer vantagem no seu aumento relativamente a este critério.

Quanto aos consumos energéticos mensais de aquecimento, estes já foram apresentados individualmente, importando agora fazer uma comparação dos consumos anuais entre as diversas soluções simuladas (Fig.59) e apresentar uma relação entre a poupança de energia obtida em relação à solução inicial (Tabela 26). Importa também referir que, na Fig.59 foi ainda incluído o caso de 2 cm de isolamento, não só para a obtenção de uma melhor curva de aproximação com 4 pontos, como também de verificar se uma solução que atualmente não é regulamentar, mas que possa um dia se tornar regulamentar em soluções de reabilitação, possa ser mais eficiente. Tendo em conta a existência prévia de paredes duplas em algumas escolas da tipologia Brandão (embora não seja a do Caso de Estudo), inclui-se também na Tabela 26 uma comparação da poupança energética aproximada das soluções de isolamento para este caso.

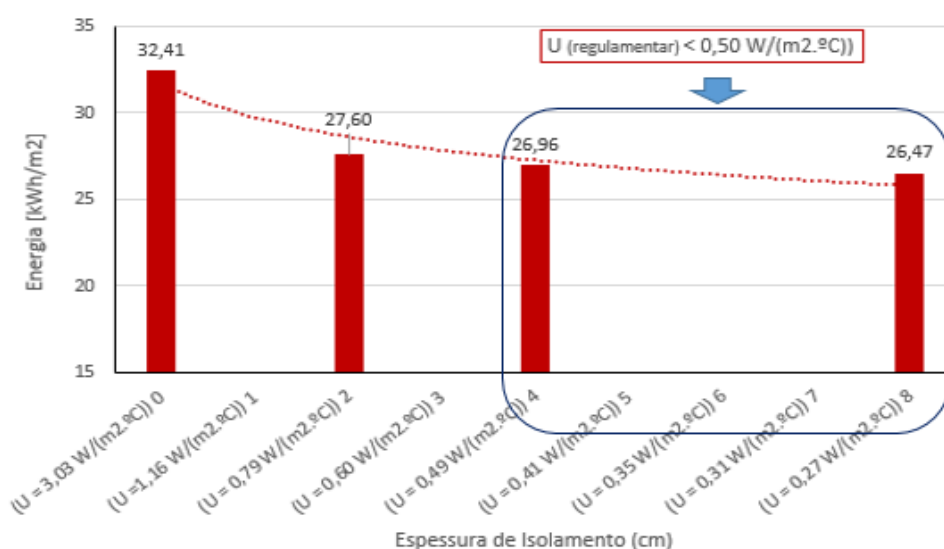


Fig.59 – Consumo energético anual, em kWh/m², de cada solução de isolamento de parede, para condições de conforto durante o período de aulas

Tabela 26 – Poupança energética associada a cada solução de isolamento e para cada tipologia de parede

	Parede tijolo simples sem isolamento (Caso de Estudo) (U = 3,03 W/(m².°C))	Parede tijolo dupla 11+11 com caixa de ar sem isolamento (U = 1,58 W/(m².°C))
Consumo Energético	32,41 kWh/(m².ano)	29,32 kWh/(m².ano)
Poupança Energética [%]		
Isolamento parede 2 cm (27,60 kWh/(m².ano))	14,5	5,9
Isolamento parede 4 cm (26,96 kWh/(m².ano))	16,4	8,0
Isolamento parede 8 cm (26,47 kWh/(m².ano))	17,9	9,7

Na Fig.59 utilizou-se a função do EXCEL que tem melhor correlação com os dados apresentados, tendo-se escolhido uma função com $r^2=90,2\%$, sendo perceptível que haverá uma assíntota em 26 kWh/m² de consumo energético anual.

No caso da parede exterior simples, entre 0 cm e 4 cm de isolamento, solução mínima regulamentar, o gasto energético para manter condições de conforto tem uma variação não desprezável, consumindo-se cerca de menos 16% do que originalmente sem isolamento, devido a ter-se baixado substancialmente o coeficiente de transmissão térmica (U) com a inclusão de isolamento e pano interior de proteção. Por outro lado, quanto mais isolarmos para além da espessura mínima regulamentar, estaríamos a gastar mais recursos económicos, contudo a vantagem de poupança energética é muito baixa. Deste modo, isolar 4 cm numa parede simples parece ser uma boa solução do ponto de vista técnico-energético,

sendo que isolar 8 cm não apresenta vantagens acrescidas e implica maiores custos, pelo que não justifica sequer uma análise económica nem a sua maior exploração ao longo deste estudo de sensibilidade.

A solução de isolamento de 2 cm ($U = 0,79 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) não é regulamentar atualmente, mas também parecia ser uma boa solução visto apresentar valores de consumo energético semelhantes à espessura de isolamento mínima regulamentar. Dada a necessidade de propor intervenções de acordo com o regulamento atual não será mais utilizada ao longo da presente Dissertação. No caso de paredes exteriores duplas ($U = 1,58 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ em vez de $3,03 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) a poupança energética é pouco significativa (inferior a 10%) tendo em conta a pouca expressão das paredes exteriores na envolvente deste tipo de escolas, e para este caso provavelmente os custos de intervenção seriam muito superiores às vantagens atingidas (cerca de metade da poupança energética em comparação com o caso de parede simples).

Apesar de do ponto de vista técnico-energético isolar 4 cm numa parede simples ser uma solução recomendável, do ponto de vista prático é necessário um estudo económico das vantagens de poupança energética geradas ao longo de vários anos em comparação com os custos de intervenção. Apesar de provavelmente ser uma solução com custo unitário (por m^2) bastante elevada por incluir o custo do isolamento, de um pano de alvenaria interior e do seu acabamento, o facto de uma parede simples (solução original) apresentar um coeficiente de transmissão térmica muito elevado deve ser tido em conta. Assim, para a solução final técnico-energética de reabilitação a propor será adotada a solução de 4 cm de isolamento porém, dado que poderá ser uma opção discutível de intervenção, para a análise dos envidraçados optou-se por ainda manter a solução original de paredes.

3.4.5. VÃOS ENVIDRAÇADOS E PROTEÇÕES SOLARES

Antes de se definirem as soluções de envidraçados e proteções solares a simular convém analisar previamente os requisitos presentes na regulamentação portuguesa, para posteriormente se poder confrontar as soluções adotadas com os valores regulamentares. Por outro lado, entendeu-se ser útil analisar a influência do uso das proteções solares ao longo do ano, pelo que as suas condições de utilização serão também descritas previamente e sintetizadas mais à frente.

Quando se decide pela substituição dos envidraçados existentes por novos, estes terão de possuir um U igual ou inferior a $2,80 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ de acordo com [41], para a cidade do Porto (Zona I1 V2, já estabelecida em 2.5).

De acordo com [42], para o cálculo do valor limite do fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção totalmente ativados (g_T), e tendo em conta que a área de envidraçados é superior a 15% da área do pavimento a fórmula a utilizar é a seguinte [42]:

$$g_T \times F_o \times F_f \leq g_{T\text{máx}} \times \frac{0,15}{\left(\frac{A_{\text{env.}}}{A_{\text{pav.}}}\right)} \quad (1)$$

Tendo em conta que em (1), $F_o \times F_f$ nunca deverá ser inferior a 0,9 por forma a contabilizar o efeito de sombreamento provocado pelo contorno do vão [40], admitimos esse valor conservativo para todos os vãos envidraçados. Além disso, o quociente entre a área de envidraçados e a área de pavimento é de 0,282 e o valor de $g_{T\text{máx}}$ é de 0,56 (zona climática V2 e considerando inércia média/forte devido à sala ser constituída por soluções pesadas como laje de cobertura em betão armado e paredes de alvenaria). Deste modo o valor de g_T das soluções a aplicar nunca poderá ser superior ao valor regulamentar 0,33.

Quanto às condições de utilização das proteções solares, para os vãos envidraçados a poente, quer estes não sejam substituídos, quer sejam novos, a proteção solar a poente estará ativa (de acordo com

calendário e horário já estabelecido em 3.3.3) no período coincidente com a incidência de radiação solar direta no interior durante o período de aulas de modo a evitar o desconforto luminoso.

No que respeita aos vãos envidraçados a nascente, atualmente não existe qualquer tipo de proteção solar. Assim, estabeleceram-se duas formas de utilização (A ou B) para as novas proteções solares a colocar a nascente (soluções E2 e E3) de forma a averiguar as vantagens e desvantagens de cada uma para a estação de aquecimento e arrefecimento.

A solução A (proteções totalmente ativas apenas quando a temperatura é superior a 25°C, durante todo o ano) consiste numa utilização das proteções solares mais eficiente e racional do ponto de vista energético durante a estação de aquecimento. Assim, esta visa aproveitar toda a “energia solar gratuita” sob a forma de raios luminosos na estação de aquecimento, permitindo poupanças energéticas e económicas de aquecimento substanciais. A sua consideração é viável visto que para esta orientação a sala não tem atualmente qualquer dispositivo de proteção solar, devido a corresponder ao corredor de acesso à sala, fisicamente ligado à sala de aula, que faz com que seja apenas pontual a incidência dos raios solares na sala de aula propriamente dita. Na estação de arrefecimento, no entanto, esta solução corresponde a um mau uso das proteções solares visto a que a entrada de radiação solar direta incidente durante longos períodos de tempo e apenas se ativar as proteções solares quando se começa a sentir desconforto por temperatura elevada corresponde a uma má prática que leva a acumulação substancial de calor desnecessário.

A solução B, em contrapartida, corresponde a uma má gestão do uso das proteções solares a nascente no inverno, mas adequada para as condições da estação de arrefecimento, uma vez que se previnem situações de sobreaquecimento impedindo antecipadamente a entrada de energia solar promotora de desconforto térmico no “verão”. Assim, estas estão ativas durante todo o ano sempre que exista radiação solar direta incidente durante o período de aulas ou quando a sala não está em uso, mediante calendário e horário estabelecido pelo utilizador tal como para o caso das proteções solares a poente. De notar que este calendário e horário de utilização tem em conta a carta solar e portanto, são específicos para cada orientação dos vãos. Assim, estabeleceu-se que as proteções solares estão fechadas desde as 0 horas até às 13h30/14h30 (incidência solar no período da manhã e inexistência de ocupação noturna) e após o fim das aulas, estando abertas (quando há aulas à tarde) no período entre as 13h30/14h30 e as 18h (período da tarde sem incidência solar, conforme a altura do ano).

3.4.5.1. Simulações

Conforme referido, a primeira zona a intervir numa reabilitação de uma escola Brandão será a cobertura. Esta ação é, na prática, justificável devido ao custo bastante menor de colocação de isolamento sobre a laje de cobertura em relação a outras soluções e por melhorar muito a eficiência energética, razão pela qual para o estudo de sensibilidade das soluções de vãos envidraçados e proteções solares será adotada a solução de isolamento da cobertura de 6 cm.

Serão simuladas três soluções de envidraçados e proteções solares (E1, E2 e E3). A solução E1 corresponde à situação inicial de envidraçados e proteções solares (já analisada aquando da 2ª simulação das coberturas, Tabela 21); na solução E2 e E3 introduzem-se em ambas as orientações proteções solares exteriores móveis de cor clara, visto que para qualquer intervenção de reabilitação que envolva os envidraçados será necessário a substituição das proteções solares danificadas ou inexistentes por novas; e apenas na solução E3 se inclui a solução de vidro duplo com corte térmico. Estas soluções são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 – Simulações a realizar para o estudo dos envidraçados e proteções solares

Simulações (consultar Fig.33)	Descrição dos envidraçados	Propriedades envidraçados [39] e [40]	Descrição das proteções solares	Propriedades proteções solares [40]*
1ª Simulação (C6-P0-E1)	Envidraçado metálico sem corte térmico, vidro simples	$U_w = 6,2$ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ $g_{\perp,vi} = 0,85$	Estore de lâminas interior de cor clara (apenas no vão poente)	$g_T = 0,40$
2ª Simulação (C6-P0-E2)	Envidraçado metálico sem corte térmico, vidro simples	$U_w = 6,2$ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ $g_{\perp,vi} = 0,85$	Proteção exterior móvel de lâminas metálicas e cor clara	$g_T = 0,14$
3ª Simulação (C6-P0-E3)	Envidraçado metálico com corte térmico, vidro duplo de baixa emissividade (0,40)	$U_w = 2,8$ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ $g_{\perp,vi} = 0,75$	Proteção exterior móvel de lâminas metálicas e cor clara	$g_T = 0,09$

* Na verdade como é usado vidro corrente g_{Tvc} é igual a g_T e por isso apresentou-se logo g_T

Relativamente às soluções apresentadas na Tabela 27 há dois aspetos a ressaltar. Por um lado, recorre-se ao valor de U_w do ITE 50 [39] e não ao valor de $U_{w,db}$, conforme já referido, devido à sala de aula não ter ocupação noturna. Por outro lado, as proteções solares exteriores móveis utilizadas não possuem qualquer função de resistência térmica adicional ao vão envidraçado quando ativadas visto que, estes são dispositivos que não podem assegurar a estanquidade ao ar no respetivo contorno, gerando um espaço de ar fortemente ventilado e não contribuindo para o aumento do nível de isolamento dos vãos envidraçados, desempenhando apenas a função de proteção solar/pára-sol.

A confrontação das soluções a adotar descritas na Tabela 27 é feita na Tabela 28, verificando-se que a única solução totalmente regulamentar é a E3, que inclui vidro duplo de baixa emissividade com corte térmico e proteção solar exterior de cor clara.

Tabela 28 – Cumprimento regulamentar das soluções de envidraçados e proteções solares utilizadas

Solução	Propriedades Envidraçados (U_w [W/m ² .°C])	Cumprimento Regulamentar ($U_{w\text{ máx}} = 2,8$ W/m ² .°C)	Propriedades Proteções Solares (g_T)	Cumprimento Regulamentar ($g_T\text{ máx} = 0,33$)
E1	6,2	NÃO CUMPRE	0,40	NÃO CUMPRE
E2	6,2	NÃO CUMPRE	0,14	CUMPRE
E3	2,8	CUMPRE	0,09	CUMPRE

Conforme já referido, serão apresentados dois cenários de utilização das proteções solares a nascente para as soluções E2 e E3. O cenário A corresponde à utilização eficiente das proteções solares a nas-

cente na estação de aquecimento, permitindo a entrada dos raios solares, sendo apenas usada quando a temperatura interior fica acima de 25°C. Por outro lado, para o “verão” permite quantificar o sobreaquecimento em excesso causado pelo seu uso tardio. O cenário B corresponde a analisar o gasto energético de uma má gestão das proteções solares na estação de aquecimento, em que as proteções solares estão ativas sempre que durante as aulas haja radiação solar direta incidente. Por outro lado, constitui um bom princípio de utilização na estação de arrefecimento levando a menor sobreaquecimento em relação ao cenário A.

Apresentam-se nas Fig.60 e Fig.63 as curvas de probabilidade acumulada de temperaturas interiores em regime de flutuação livre/sem aquecimento para uma boa utilização das proteções solares (só assim faz sentido) na estação de aquecimento (cenário A), no período de 1 ano de aulas (1365 h), apenas da 2ª e 3ª simulações devido ao da 1ª simulação já ter sido apresentado na Fig.43; e nas Fig.61/Fig.62 e Fig.64/Fig.65 os consumos energéticos mensais para manter condições de conforto para ambos os cenários (A e B), durante o período de aulas, da 2ª e 3ª simulação da Tabela 28, respetivamente, tendo na Fig.44 sido já apresentado esses resultados para a 1ª simulação. Novamente, mais à frente, os resultados de todas as simulações serão agrupados de forma a se poder comparar as diversas soluções e cenários e retirar conclusões. O conjunto de resultados para cada uma das simulações é o seguinte:

- Simulação 1 (C6-P0-E1)

Da análise da Fig.43 (2ª Simulação das coberturas) constatou-se que, sem aquecimento, cerca de 60% das temperaturas interiores são inferiores aos 20°C desejáveis durante o período de aulas. Nesta solução a gama de valores da temperatura varia entre uma mínima de 11,0°C e máxima de 31,6°C, com média de 19,4°C.

- Simulação 2.1 - C6-P0-E2, Cenário A (Boa gestão inverno, má gestão “verão”)

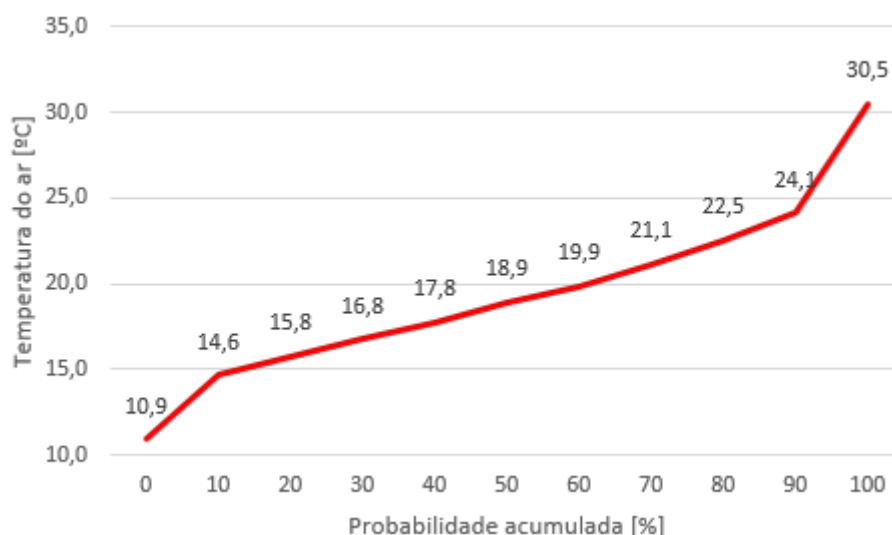


Fig.60 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P0-E2/Cenário A

Da análise da Fig.60 (e comparação com o exposto na 1ª Simulação, C6-P0-E1) verifica-se que, sem aquecimento, a percentagem de 60% de temperaturas interiores inferiores aos 20°C desejáveis durante o período de aulas mantem-se. Regista-se nesta nova solução uma gama de valores da temperatura entre uma mínima de 10,9°C e máxima de 30,5°C, com média de 19,2°C.

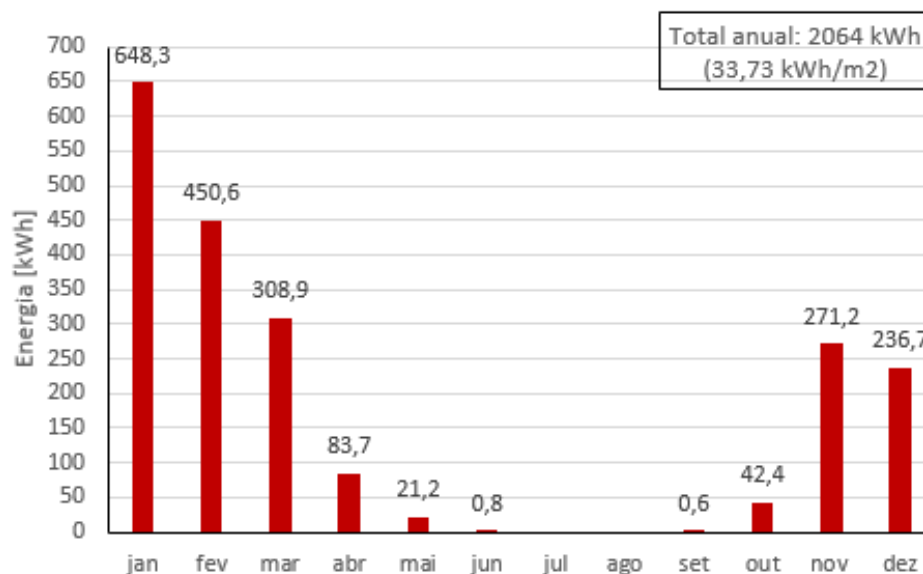


Fig.61 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E2/Cenário A

- Simulação 2.2 - C6-P0-E2, Cenário B (Má gestão inverno, boa gestão “verão”)

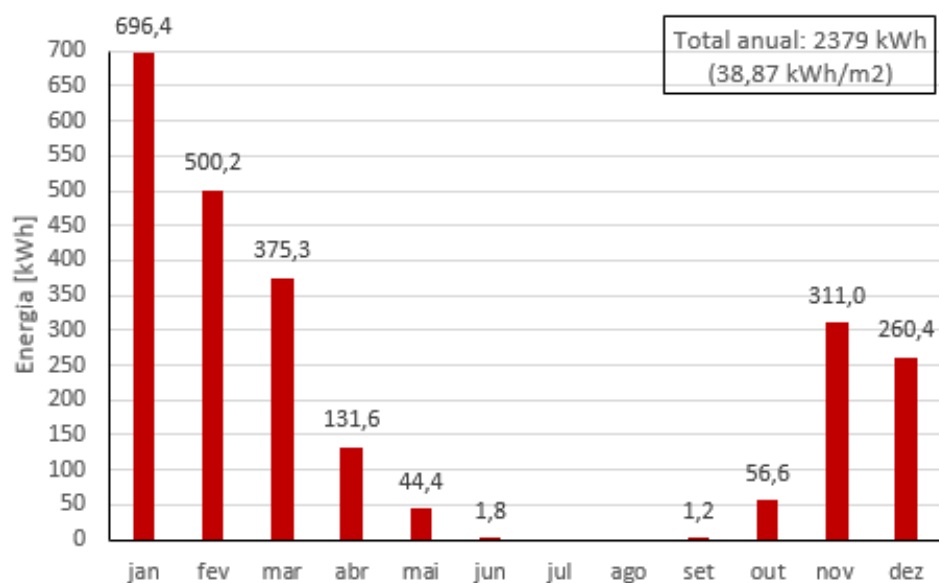


Fig.62 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E2/Cenário B

- Simulação 3.1 - C6-P0-E3, Cenário A (Boa gestão inverno, má gestão “verão”)

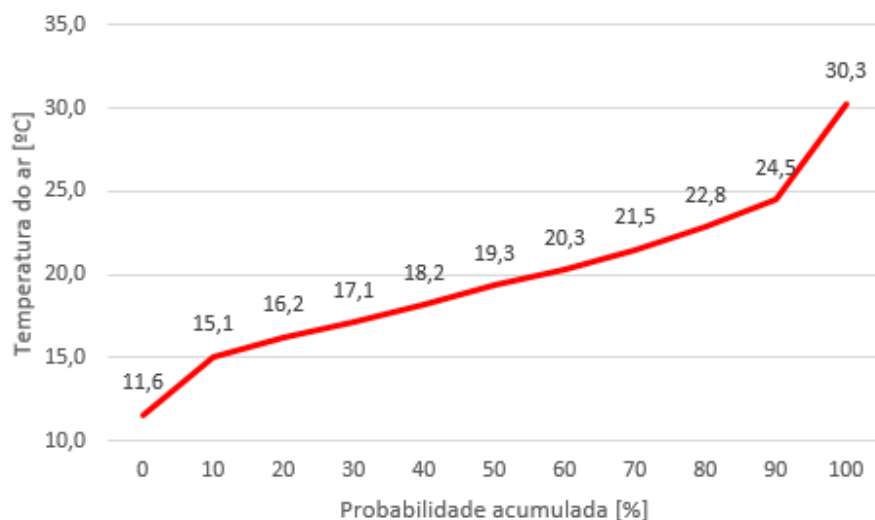


Fig.63 – Curva de probabilidade acumulada de temperaturas interiores, em °C, em regime de flutuação livre (sem aquecimento), e durante o período de aulas (1365 h) para a solução C6-P0-E3/Cenário A

Da análise da Fig.63 (e comparação com a Fig.60) verifica-se que, sem aquecimento, a percentagem de temperaturas interiores inferiores aos 20°C desejáveis durante o período de aulas diminui modestamente de 60% para cerca de 57%. Regista-se nesta nova solução uma gama de valores da temperatura entre uma mínima de 11,6°C e máxima de 30,3°C, com média de 19,6°C.

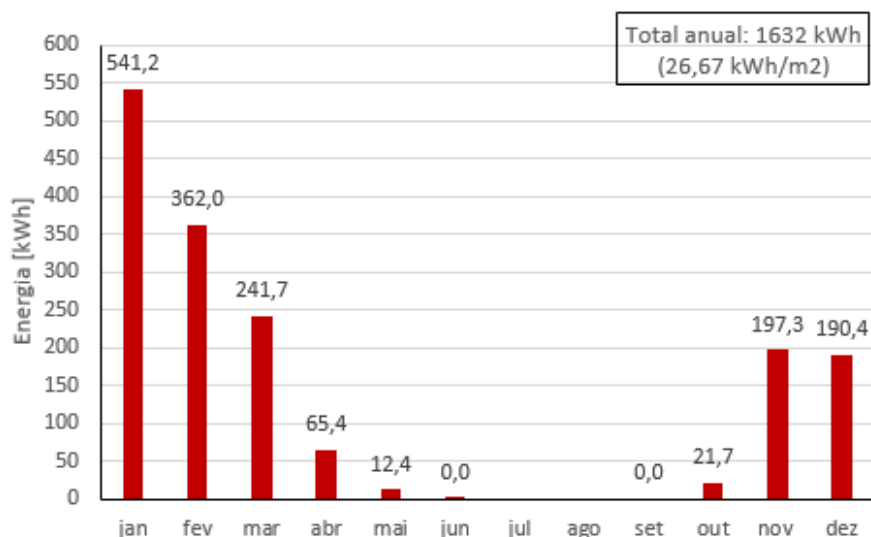


Fig.64 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E3/Cenário A

- Simulação 3.2 - C6-P0-E3, Cenário B (Má gestão inverno, boa gestão “verão”)

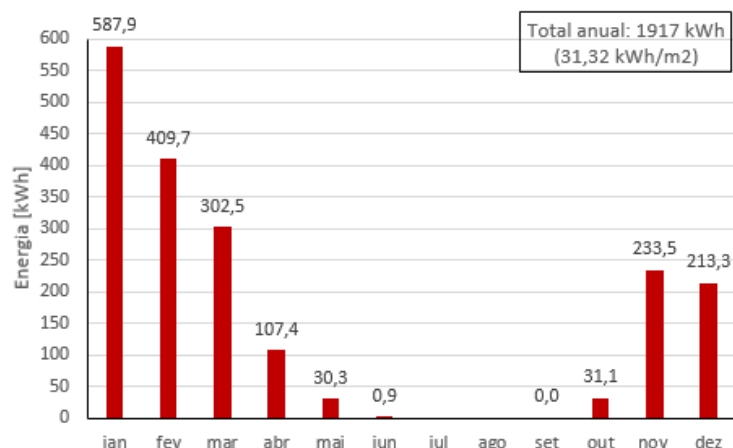


Fig.65 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução C6-P0-E3/Cenário B

3.4.5.2. Análise de resultados

Após a apresentação individual dos aspetos mais relevantes de cada simulação (1ª, 2ª e 3ª, cenários A e B), serão agora apresentados os resultados comparativos das várias soluções de envidraçados e proteções solares e do seu uso em termos de temperatura interior em flutuação livre/sem aquecimento (apenas cenários A); analisados os problemas de sobreaquecimento na estação de arrefecimento; e realizada uma comparação dos ganhos solares, consumo energético anual e consequente poupança energética que cada solução propicia. Serão obtidas conclusões que permitirão propor as melhores soluções quanto ao tipo de envidraçado e proteção solar a adotar e feitas recomendações de uso.

Na Fig.66 são comparados os percentis de temperatura interior correspondente a uma probabilidade de 10% (ou seja, a temperatura mínima expectável em vários dias) e a mediana das várias soluções, por forma a permitir verificar uma evolução mais clara das temperaturas “mínima” e mediana e na Fig.67 são apresentadas as curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores sem aquecimento para o cenário A, uma vez que não aquecendo seria fundamental aproveitar todos os ganhos solares úteis na estação de aquecimento para uma melhoria das condições de conforto, não fazendo qualquer sentido o seu desperdício.

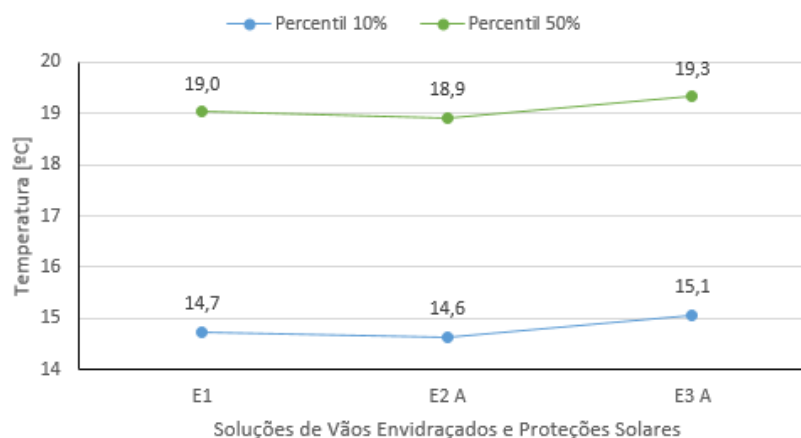


Fig.66 – Percentis de 10% e mediana das temperaturas interiores das soluções da Tabela 28 e cenário A, em °C, sem aquecimento, para o período de aulas, e adotando uma espessura de isolamento da cobertura de 6 cm

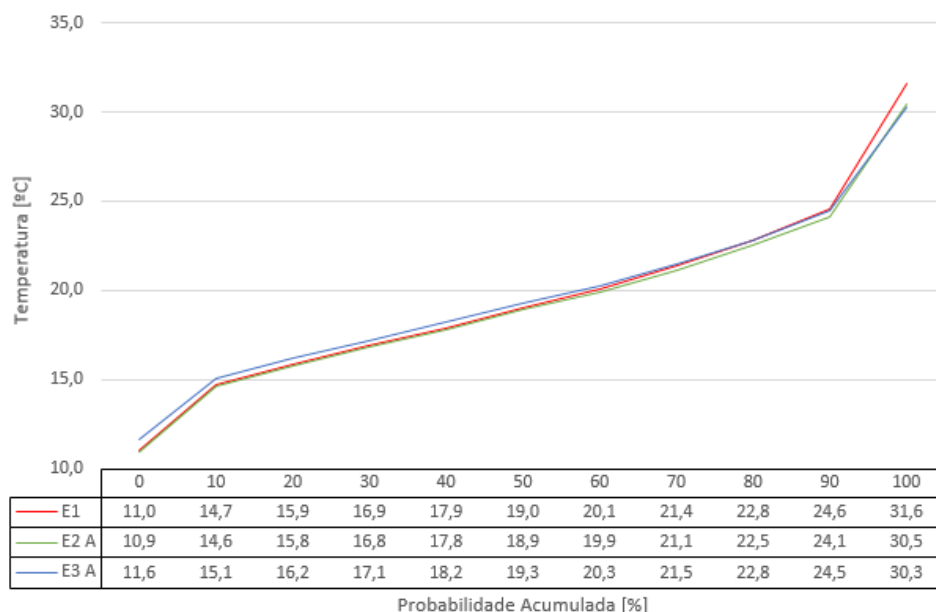


Fig.67 – Curvas de probabilidades acumuladas de temperaturas interiores, em °C, sem aquecimento, e durante o período de aulas, para todas as simulações da Tabela 28 e cenário A, adotando uma espessura de 6 cm de isolamento da cobertura

Da análise conjunta das Fig.66 e Fig.67 constata-se que devido às novas proteções solares exteriores com menor fator solar, as proteções a poente fazem com que a solução E2A tenha menos ganhos solares em comparação com a solução E1 com apenas proteções interiores a poente, refletindo-se em temperaturas ligeiramente inferiores em flutuação livre, mesmo com as proteções a nascente apenas ativas na estação de arrefecimento. Por outro lado, entre as soluções E2A e E2B melhorou-se os envidraçados para uma solução com corte térmico e vidro duplo verificando-se uma ligeira subida da temperatura interior.

Segue-se agora uma análise do desconforto térmico na estação de arrefecimento, durante as aulas usando uma “estratégia de aquecimento de inverno” e para os cenários A e B de uso das proteções solares (Tabela 29 e Fig.68), com base no IDT (Indicador de Desconforto Térmico). Pretende-se verificar a influência que a substituição dos envidraçados e/ou proteções solares tem no sobreaquecimento, mediante os cenários de uso das proteções solares.

Tabela 29 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno

Soluções de vãos envidraçados e proteções solares (incluindo respetivos usos)	E1	E2A	E2B	E3A	E3B
N.º total horas aulas (T>25°C)	121	104	90	112	99
N.º total horas aulas (T>25°C) em %	8,9	7,6	6,6	8,2	7,3

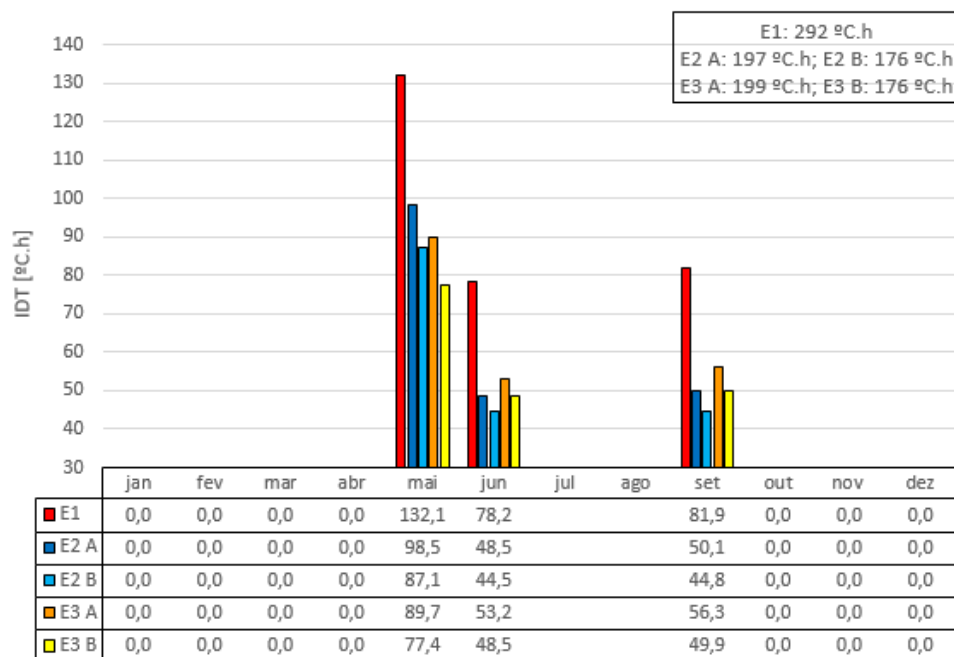


Fig.68 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h)

Em relação ao uso das proteções solares, da análise conjunta da Tabela 29 e Fig.68, constata-se que o cenário B (quer E2B em relação a E2A ou E3B em relação a E3A), em que se previne desde o início do dia a entrada de radiação solar direta por forma a evitar a acumulação de calor que leve ao sobreaquecimento, é o mais eficiente na estação de arrefecimento. O cenário A, apesar de ser muito útil na estação de aquecimento, é bastante mau na estação de arrefecimento, uma vez que apenas ativar as proteções solares quando a sala já está quente, leva a que a partir daquele momento mesmo que muita parte da energia solar incidente já não contribua para o aumento da temperatura (fatores solares das proteções exteriores muito mais baixos que os do vidro), mas os ganhos internos elevados farão com que o aumento de temperatura se processe ainda por algum tempo levando a maiores valores do IDT. Recomenda-se portanto, a utilização dos estores a nascente desde o início do dia para os dias mais quentes, pelo que para a análise dos benefícios das diversas soluções na prevenção do sobreaquecimento será utilizado o cenário B (indicado a verde na Tabela 29).

Em relação às soluções E2B e E3B (colocação de envidraçados com corte térmico e vidro duplo, mantendo o tipo de proteção solar) os valores do IDT são praticamente iguais. Apesar disso, tal como nos casos anteriores de isolamento da envolvente, a melhoria do U dos envidraçados através da sua substituição é benéfica em dias mais quentes, dificultando a entrada de calor do exterior (mês de maio), mas é prejudicial em dias mais amenos, uma vez que dificulta o fluxo de calor do interior da sala, provocado pelos elevados ganhos internos, para o exterior levando ao aumento de temperatura da sala (meses de junho e setembro). Comparando a solução E1 e E2B (colocação de proteção solar exterior, mantendo o envidraçado) verifica-se que a proteção solar pelo exterior e o seu correto uso reduz substancialmente o valor de IDT (cerca de 40%) e o número de horas de desconforto, contribuindo assim fortemente para a melhoria do conforto de verão, pelo que a substituição das proteções solares e a colocação de novas pelo exterior é fundamental.

De modo a sintetizar as conclusões apresentadas, relativamente às soluções de envidraçados e proteções solares na melhoria do “conforto de verão”, é apresentada na Tabela 30 a percentagem de melhoria de cada solução com base no IDT. Incluiu-se na mesma Tabela a solução inicial e a verde as soluções de utilização recomendadas, verificando-se uma melhoria de 40% no “conforto de verão”.

Tabela 30 – Melhoria do “conforto de verão” associada a cada solução de envidraçados e proteções solares

Solução E1 (C6-P0-E1)	
IDT	292 °C.h
Melhoria do conforto verão [%]	
E2 A (197 °C.h)	32,5
E2 B (176 °C.h)	39,6
E3 A (199 °C.h)	31,8
E3 B (176 °C.h)	39,8

Quanto aos ganhos solares, estes permitem na estação de aquecimento poupanças energéticas elevadas mas na estação de arrefecimento são prejudiciais e fonte de sobreaquecimento, importando agora fazer a sua comparação entre as diversas soluções simuladas (Fig.69) para melhor perceção da importância das novas proteções solares exteriores e do seu uso.

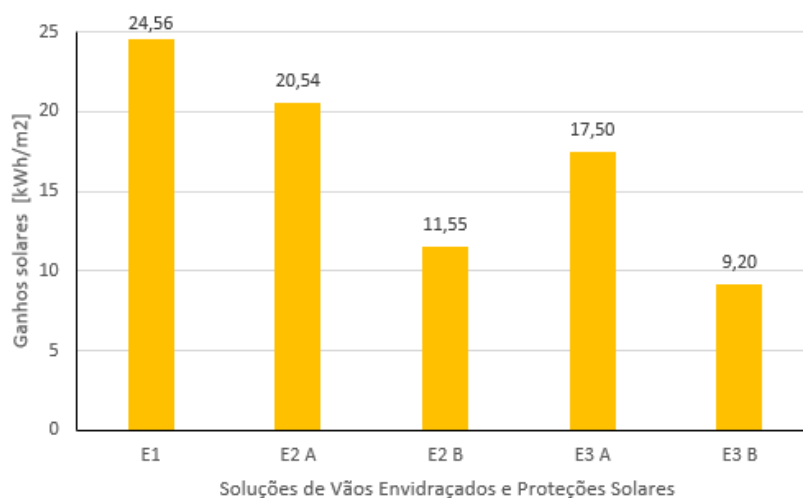


Fig.69 – Ganhos energéticos anuais apenas durante o período de aulas, em kWh/m², de cada solução de envidraçados e proteções solares e cenários A e B, para aquecimento durante o inverno

Na Fig. 69 estão incluídos a maioria dos ganhos solares nos dias de aulas visto que as aulas começam de manhã cedo, às 8h, e terminam normalmente ao final do dia, por volta das 18h, sendo que as diferenças entre as soluções E2 e E3 devem-se ao ligeiramente menor fator solar das proteções solares (quando ativas) e entre o dos vidros simples e duplos, de acordo com o obtido no regulamento.

No cenário de utilização B (e comparação com o A de ambas as soluções) denota-se um elevado decréscimo de ganhos solares, para quase metade, pelo que importa refletir sobretudo sobre as consequências de utilização das proteções solares. Por um lado, há um certo desperdício de “energia solar gratuita” nos meses de aquecimento devido aos estores a nascente estarem fechados, embora não afe-

tem significativamente o conforto luminoso da sala de aula, tendo que ser compensada à custa do aumento do consumo energético para a manutenção das condições de conforto térmico interior. Por outro lado, nos meses de arrefecimento o cenário B apresenta-se com um potencial elevado de prevenção do sobreaquecimento por levar a menores ganhos solares.

Quanto aos consumos energéticos mensais, estes já foram apresentados individualmente, importando agora fazer uma comparação dos consumos anuais de aquecimento entre as diversas soluções e cenários simulados (Fig.70) e apresentar uma relação entre a poupança de energia obtida em relação à solução sem intervenção nos envidraçados e proteções solares (Tabela 31). De notar que para o estudo de sensibilidade das várias soluções da envolvente (que se definiu privilegiar o consumo energético) apenas interessa a consideração do melhor cenário de utilização, pelo que se recorre nesse contexto apenas ao cenário A.

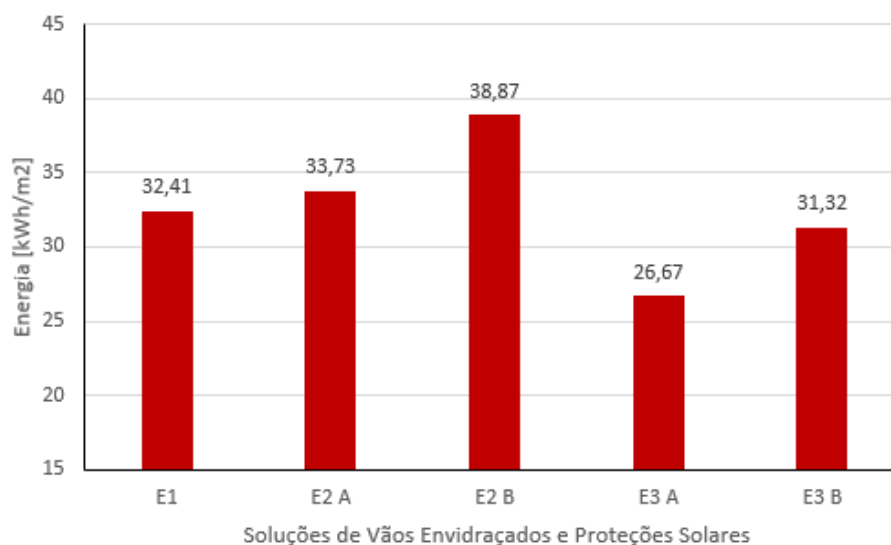


Fig.70 – Consumo energético anual, em kWh/m², de cada solução de envidraçados e proteções solares para os cenários A e B de utilização, com condições de conforto durante o período de aulas

Tabela 31 – Poupança energética associada a cada solução de envidraçados e proteções solares, incluindo-se a azul os cenários de utilização das proteções solares mais favoráveis

Solução E1 (C6-P0-E1)	
Consumo Energético	32,41 kWh/(m².ano)
Poupança Energética [%]	
E2A (33,73 kWh/(m².ano))	-4,1
E2B (38,87 kWh/(m².ano))	-20,0
E3A (26,67 kWh/(m².ano))	17,7
E3B (31,32 kWh/(m².ano))	3,4

Analisando conjuntamente a Fig.70 e a Tabela 31 verifica-se que, em relação às soluções E1 e E2A nos meses de aquecimento, visto nessa altura não estarem ativas as proteções solares exteriores a nascente por não existir sobreaquecimento na sala e o funcionamento dos estores a poente ser o mesmo, o

aumento do consumo energético existente deve-se ao menor fator solar da proteção exterior que permite menores “ganhos solares gratuitos”. Por outro lado, comparando as soluções E1 e E3A, a colocação de envidraçados com corte térmico e vidro duplo representa cerca de 18% (ou 21% comparando com a solução E2A) de poupança energética, tendo assim um impacto significativo numa maior sustentabilidade, razão que seja uma boa solução do ponto de vista técnico-energético e justifique um estudo económico entre o custo inicial da solução e as suas vantagens ao longo do tempo. Já a colocação das proteções solares exteriores é fundamental para a promoção de um melhor conforto de “verão”, conforme já referido.

Mais uma vez se comprova que a forma como se manuseia as proteções solares (a sua boa gestão) tem muita influência, tanto no desempenho energético da sala (diminuição do consumo energético entre 14% e 16%) como no seu conforto de “verão” (melhoria do conforto/IDT entre 7% e 8%). Como o clima proporciona muita energia “gratuita” devida aos ganhos solares, estes podem ser benéficos ou prejudiciais conforme estamos no período de aquecimento ou arrefecimento, pelo que a combinação dos cenários A (a utilizar na estação de aquecimento) e B (a utilizar na estação de arrefecimento) é o mais adequado. Por outro lado, dado que o utilizador influencia muito o consumo energético, conforme mostrado e quantificado, dever-se-ia motivar os alunos para as várias questões da sustentabilidade, entre elas a sustentabilidade energética e a importância do uso das proteções solares.

3.4.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS

3.4.6.1. Solução técnico-energética para a envolvente

Após a análise de cada elemento da envolvente na melhoria do conforto térmico e consumo energético, ou seja, o estudo de sensibilidade de soluções de reabilitação possíveis a adotar na envolvente exterior, é importante sintetizar as principais conclusões e estabelecer-se a melhor solução de reabilitação do ponto de vista técnico energético. Assim, nas Fig.71 e Fig.72 são apresentados os resultados do estudo de sensibilidade realizado relativo ao consumo energético em kWh/(m².ano).

PORTO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
C0												C6												C10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
			P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
			E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
V400	S - N	E - O	58,80	59,68	53,78	X			55,29	56,25	50,20	X			32,41	33,73	26,67	27,60	X			26,96	28,25	20,87	26,47	X			31,50	32,66	25,53	X			25,77	27,08	19,64	X																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Fig.71 – Matriz de sensibilidade das simulações realizadas (parte 1, incluindo seleção solução mais adequada)

		PORTO																								
		C15												C20												
		P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8			
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	
V400	E - O	30,91	32,07	24,91				25,23	26,41	18,97				30,60												
	S - N																									

Fig.72 – Matriz de sensibilidade das simulações realizadas (parte 2)

Na interpretação da Fig.71 e Fig.72 é importante esclarecer que a cruz vermelha foi aplicada em todas as soluções de isolamento de parede com 2 cm (à exceção do caso de isolamento da cobertura de 6 cm, para melhor definição da curva de consumos energéticos para as paredes) devido a esta solução atualmente não ser regulamentar e portanto não se ter analisado, mas ser uma solução a analisar no futuro caso haja alterações na regulamentação aplicada à reabilitação. Por outro lado, as cruces a preto aplicadas em todos os casos de isolamento com 8 cm da parede (à exceção do caso de isolamento da cobertura com 6 cm) deveu-se a na análise de sensibilidade do isolamento das paredes se ter concluído que não justificava isolar as paredes mais que a espessura mínima regulamentar. As cruces a azul aplicadas na espessura de isolamento da cobertura de 20 cm foram aplicadas porque se concluiu que as soluções de isolamento da cobertura de 15 cm e 20 cm implicavam custos mais elevados e não traziam benefícios relevantes (mesmo assim ainda se confirmou essas conclusões realizando a simulação com a espessura de cobertura de 15 cm). Por fim, dado ter-se concluído que em qualquer intervenção de reabilitação a intervenção na cobertura é imprescindível e às soluções de 15 cm e 20 cm não apresentarem com toda a certeza interesse económico excluiu-se através da utilização do preto todas as restantes simulações não analisadas associadas aos casos referidos. Por fim, os valores a preto já foram aparecendo ao longo do estudo de sensibilidade dos variados elementos da envolvente e já devidamente analisados, e os valores a azul são todas as restantes simulações realizadas para a orientação do Caso de Estudo.

No que se refere aos valores presentes na Fig.71 e Fig.72, conclui-se dos valores da orientação inicial que a melhor solução técnico-energética passaria, em princípio, pelo isolamento da cobertura e paredes exteriores com o valor mínimo regulamentar, substituição dos envidraçados por soluções com corte térmico e vidro duplo e colocação de proteções solares pelo exterior. Esta conclusão foi retirada porque a melhoria, em relação à solução base/inicial, da poupança energética atingida de 65 % é muito significativa, não se justificando otimizar mais a solução construtiva da envolvente. Com efeito, o valor obtido de 20,87 kWh/m² corresponde a otimizar 95 % em relação à solução estudada que verifica o menor consumo energético (18,97 kWh/m², C15-P4-E3), o que é um valor muito bom para a situação base de 58,80 kWh/m² (C0-P0-E1). As melhores soluções assegurar a esta principal (e que não serão as mais recomendáveis) seriam as que à melhor solução excluiriam apenas o isolamento das paredes exteriores ou não substituiriam os envidraçados. Simulou-se portanto, apenas esses 3 casos para a orientação Sul/Norte (a verde), tendo-se concluído que a tendência dos valores era semelhante e que portanto a melhor solução correspondia à solução previamente definida (C6-P4-E3).

Apesar de se definir a solução técnico-energética mais eficiente na Fig.71 (C6-P4-E3), é necessário um estudo económico fora do âmbito desta Dissertação (devido a exigir mais tempo) de forma a comparar a solução obtida com outras, numa gama relativamente restrita e aceitável do ponto de vista energético, e que embora possam não ser tão eficientes possam trazer vantagens económicas (soluções a verde, Fig.71). Por outro lado, mesmo se apenas for possível, por motivos económicos, a realização de uma intervenção pontual apenas num elemento construtivo permitiu-se uma flexibilidade nas hipóteses (soluções não preenchidas) que deverão ser analisadas em estudos económicos posteriores, mas prejudicando a poupança no consumo energético.

A melhoria atingida ao longo da otimização da envolvente exterior, percorrendo os valores da matriz de sensibilidade da Fig.71, está presente na Tabela 32, obtendo-se uma poupança energética total, em relação à solução de isolamento do pavimento apenas, de cerca de 65%, ou seja, 37,93 kWh/(m².ano). Tendo em conta que o custo da energia ronda os 0,20 €/kWh obtém-se uma estimativa da poupança anual, para condições de conforto, de cerca de 7,60 € por unidade de superfície.

Tabela 32 – Consumo anual e poupança energética acumulada associada a cada solução de reabilitação dos elementos construtivos da envolvente exterior

	Consumo energético (kWh/(m ² .ano))	Melhoria acumulada [%]
Solução base com pavimentos isolados (C0-P0-E1, cons. Fig. 71)	58,80	-
Isolamento cobertura ($U = 0,38 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$)	32,41	44,9
Isolamento paredes ($U = 0,49 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$)	26,96	54,1
Melhoria dos envidraçados e proteções solares ($U_w = 2,8 \text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$); ($g_T = 0,09$)	20,87	64,5

Ao longo do processo de melhoria de cada elemento da envolvente descrito na Tabela 32 concluiu-se que se deve melhorar termicamente várias soluções simultaneamente, senão as melhorias são menores devido aos elementos em que não se interveio piorarem o seu desempenho (conclusões já retiradas em 3.4.2 a propósito dos fluxos pelos elementos da envolvente aquando do isolamento da cobertura). Objetivamente, pode por exemplo destacar-se a diferença entre C0-P0-E1 para C0-P4-E1 e C6-P0-E1 para C6-P4-E1 da Fig.71, em que ambas correspondem apenas a isolar as paredes exteriores de forma a cumprir o U regulamentar, mas no primeiro caso a melhoria é de apenas 6% (de 58,80 kWh/m² para 55,29 kWh/m²) e no segundo já é de 17% (de 32,41 kWh/m² para 26,96 kWh/m²), unicamente devido a no segundo caso se ter isolado a cobertura, tornando assim mais evidente o isolamento da parede.

O conforto térmico é conseguido à custa de vários fatores, sendo entre eles muito relevante a diminuição do consumo energético de aquecimento. Assim, é de fundamental importância diminuir as perdas pela envolvente e aproveitar devidamente os “ganhos solares gratuitos”. De forma a analisar isoladamente as melhorias energéticas de cada elemento construtivo exterior após a sua melhoria, bem como a importância de cada elemento da envolvente antes (C0-P0-E1) e após intervenção com a solução técnico-energética mais adequada (C6-P4-E3) elaborou-se a Tabela 33 e Fig.73.

Tabela 33 – Perdas de energia através da envolvente e poupança associada a cada solução de intervenção nos elementos construtivos da envolvente exterior, entre a solução base e otimizada

	Solução base* [kWh/ano]	Solução otimizada [kWh/ano]	Melhoria [%]
Pavimento*	760,0	987,5	-29,9
Cobertura	4 437,0	1 954,0	56,0
Paredes Exteriores	561,0	298,0	46,9
Vãos envidraçados e proteções solares	2 223,0	1 468,0	34,0
Total (kWh)	7 981,0	4 707,5	41,0
Total (kWh/m²)	130,41	76,92	

* Isolamento prévio de 3 cm do pavimento ($\lambda = 0,025 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$) [34]

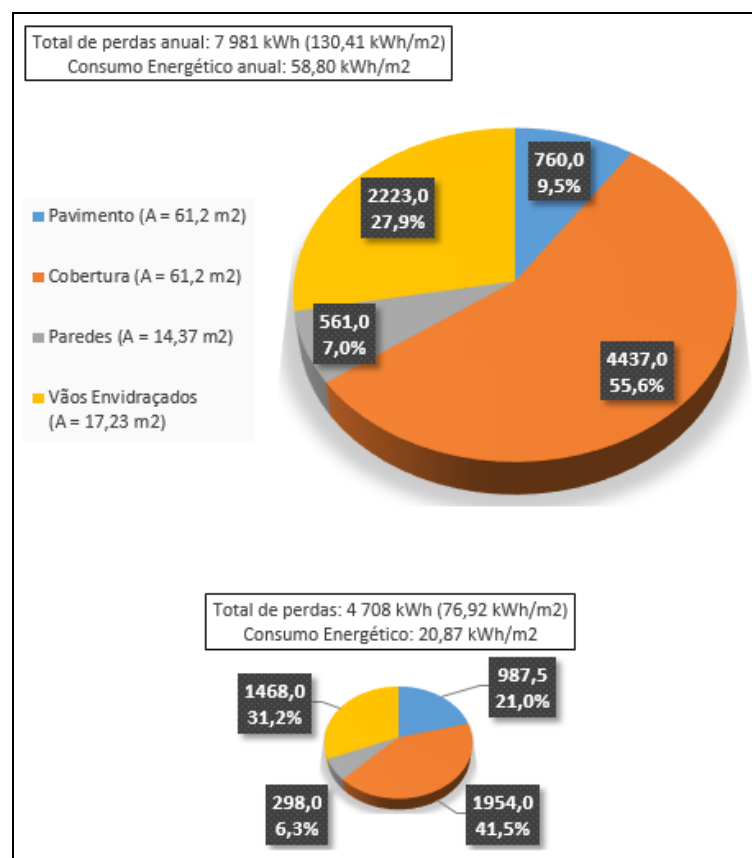


Fig.73 – Perdas pelos vários elementos da envolvente exterior para a solução apenas de pavimento isolado (gráfico superior) e para a solução otimizada (gráfico inferior), no decurso de 1 ano inteiro (8760 h) e em kWh

De acordo com a Tabela 33 e Fig.73, na solução base o peso da cobertura, do ponto de vista energético, é maioritário em relação a todos os restantes elementos da envolvente exterior. É seguida pelos vãos envidraçados, pavimento e por fim pelas paredes exteriores. Em relação à solução otimizada, a importância relativa entre os vários elementos construtivos mantém-se, apesar da cobertura e paredes exteriores diminuírem o seu peso e o pavimento e vãos envidraçados aumentarem. Estes aumentos e diminuições de importância estão relacionados com a razão entre a melhoria energética relativa de cada elemento e da envolvente no seu conjunto, pelo que os envidraçados aumentam a sua importância por terem melhorias abaixo da média e o pavimento por não ter sofrido nova intervenção, tendo piorado o seu desempenho em relação à solução base e duplicado a sua importância na solução otimizada. Este aumento de perdas pelo pavimento deve-se às temperaturas da sala se manterem elevadas durante mais tempo na solução otimizada e levarem a um maior fluxo de calor por este elemento. Assim, será justificável um estudo de sensibilidade do pavimento em trabalhos posteriores mais aprofundado, propondo-se testar as soluções de isolamento de 2 cm e 4 cm em complemento à de 3 cm.

Analisando em particular a Tabela 33, a cobertura é o elemento construtivo que melhora mais em termos de perdas energéticas. De notar que as paredes têm ainda uma melhoria relevante, sendo menor a melhoria dos vãos envidraçados nas perdas energéticas.

Por fim, uma explicação possível para a diminuição do consumo energético em cerca de 65% (Tabela 32) e as perdas pela envolvente exterior reduzirem em 41% apenas (Tabela 33) pode ser a do maior peso das perdas anuais na estação de aquecimento, que ao terem sido diminuídas levou a uma poupança energética mais elevada.

3.4.6.2. Influência da orientação

Através da determinação do consumo energético para manter condições de conforto térmico, estabelecido como critério de comparação de todas as simulações por ser o mais relevante (dado envolver maiores custos e a estação de aquecimento representar a maior parte do período de aulas), foram em 3.4.6.1 estabelecidas três soluções de reabilitação consideradas mais adequadas e através da sua simulação (resultados a verde na Fig.71) para outra orientação da escola/sala de aula (Sul/Norte), concluiu-se que a solução C6-P4-E3 (Fig.71) era a melhor para ambas as orientações.

É importante esclarecer que nas simulações com a nova orientação, a fachada voltada a poente corresponde à nova fachada sul e a fachada voltada a nascente corresponde à nova fachada norte. Assim, de acordo com a carta solar do Porto, os envidraçados voltados a sul têm radiação solar incidente praticamente durante todo o dia, embora com baixa inclinação. De modo a se poder comparar os resultados das diferentes simulações, os envidraçados a sul apresentam o mesmo raciocínio de funcionamento que os voltados a poente. Com efeito, as proteções solares a sul estão totalmente fechadas quando não estão a decorrer aulas, sendo que durante as aulas tendo em conta a baixa inclinação da radiação incidente e que esta está presente praticamente durante todo o dia, considera-se que a sua ativação a 80% satisfaz os critérios de conforto luminoso da sala de aula e impede a radiação solar direta nas mesas de trabalho dos alunos. As proteções orientadas a norte seguem o mesmo princípio de utilização das proteções a nascente, pelo que para o cenário A, de boa gestão de inverno, apenas estarão ativadas acima dos 25°C, significando que estão totalmente abertas durante toda a estação de aquecimento.

Para a melhor solução de reabilitação a adotar em ambas as orientações, serão apresentados e comparados os seus desempenhos em termos de consumo energético e de ganhos solares/sobreaquecimento ao longo do ano, permitindo a discussão dos resultados da melhor solução de reabilitação de escolas da tipologia Brandão a adotar para climas semelhantes ao do Porto.

Na Fig.74 estão presentes os consumos energéticos mensais e anuais para manutenção de condições de conforto térmico, em kWh e kWh/m², para a solução C6-P4-E3 e para as orientações Sul/Norte e Este/Oeste (Caso de Estudo), supondo boa gestão das proteções solares a nascente/norte na estação de aquecimento (cenário A).

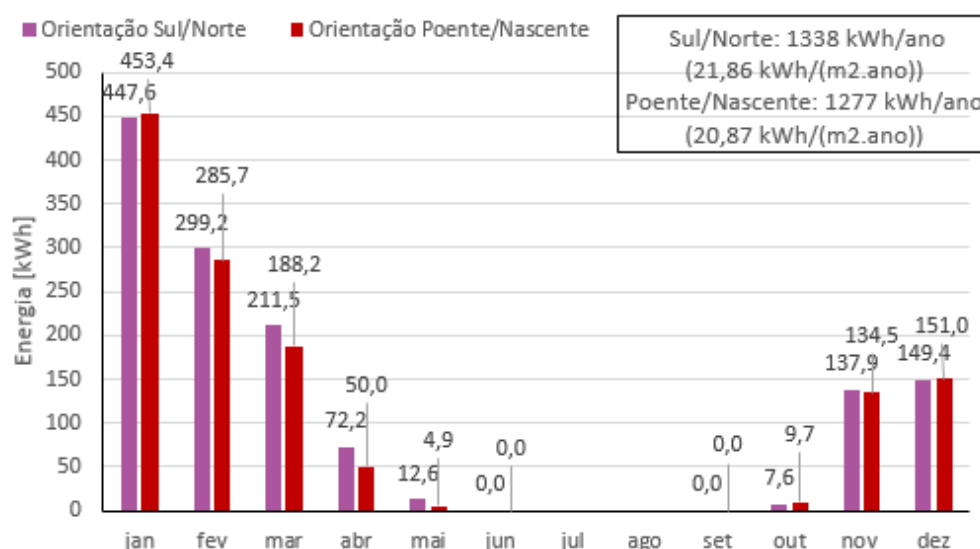


Fig.74 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para a solução de reabilitação otimizada (C6-P4-E3/Cenário A)

De acordo com a Fig.74 verifica-se que o consumo energético de aquecimento é ligeiramente maior na orientação Sul/Norte que na orientação Poente/Nascente, estando esta ligeira diferença relacionada com o uso das proteções solares a sul e consequente condicionamento de “ganhos solares gratuitos”. Há ainda a realçar que o consumo energético mais elevado numa orientação num determinado mês não se mantém superior ao consumo energético da outra orientação para todos os meses.

Quanto aos ganhos solares, estes permitem na estação de aquecimento poupanças energéticas elevadas, mas na estação de arrefecimento são maioritariamente prejudiciais e fonte de sobreaquecimento, importando agora fazer a sua comparação entre ambas as orientações (Fig.75).

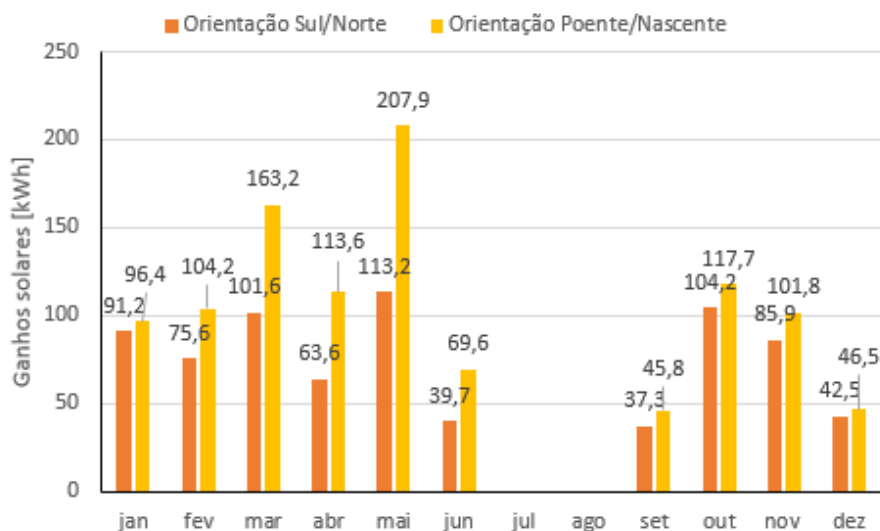


Fig.75 – Ganhos solares mensais durante o período de aulas (1365 h), em kWh, para cada orientação e utilizando a solução técnico-energética otimizada, com aquecimento durante o inverno

No gráfico da Fig.75 pretende-se mais mostrar a variação dos ganhos solares mensais entre as duas orientações do que a sua quantificação real, uma vez que para ambas as orientações foi utilizado o cenário A (o *WUFI PLUS* não permite associar os dois cenários de utilização para períodos do ano distintos apenas numa simulação), em que as proteções solares a nascente/norte estão ativas para temperaturas interiores superiores a 25°C, o que representa o uso correto no inverno, propiciando maiores “ganhos solares gratuitos”, mas um mau uso na estação de arrefecimento (maio, junho e setembro). A título comparativo refere-se que os ganhos da Fig.75 resultam anualmente em 12,33 kWh/m² para a orientação sul/norte e em 17,43 kWh/m² para a orientação poente/nascente, ou seja, bastante superior para esta orientação.

Da Fig.75 conclui-se principalmente que a orientação Poente/Nascente tem maiores ganhos solares que a orientação Sul/Norte durante todos os meses no período escolar, dado que na orientação Sul/Norte as proteções a Sul necessitem de estar fechadas praticamente durante todo o dia devido à incidência direta de radiação solar e o seu período de incidência a Norte ser muito reduzido, enquanto que na orientação Poente/Nascente os envidraçados a Nascente estão sempre abertos na estação de aquecimento e fechados no verão apenas durante os períodos em que ocorre sobreaquecimento, logo existindo a nascente bastantes ganhos solares. Consequentemente, o sobreaquecimento é também maior todos os meses na sala orientada a poente/nascente devido aos maiores ganhos solares propiciarem maiores temperaturas interiores na estação de arrefecimento (meses de maio, junho e setembro).

3.5. ANÁLISE ESTRATÉGIAS VENTILAÇÃO PARA A ENVOLVENTE OTIMIZADA

3.5.1. PROBLEMÁTICA E SIMULAÇÕES A EFETUAR

Após a otimização da envolvente do Caso de Estudo (orientação Poente/Nascente) definida como C6-P4-E3, justifica-se agora para esse caso analisar algumas estratégias de ventilação possíveis e compará-las com a utilizada no estudo de sensibilidade da envolvente.

Com efeito, no subcapítulo anterior foi adotado uma estratégia de ventilação constante durante todo o ano de 400 m³/h (2,58 renovações horárias) porque pretendia ser representativo da utilização de qualquer tipo de novo sistema de ventilação a adotar nas escolas, não se tendo dado maior destaque às estratégias de ventilação porque apenas se pretendia obter a melhor solução de reabilitação construtiva do ponto de vista higrotérmico, e não a quantificação objetiva do consumo energético. Esta estratégia visava representar simultaneamente, por um lado, o caso de utilização da ventilação em períodos bastante além do das aulas, e como se teria apenas em conta o período de aulas (1365 h) e nem se contabilizava a energia gasta por eventuais ventiladores, não se tendo estabelecido nenhum sistema por não se querer definir o melhor funcionamento *a priori*, ou seja, se seria natural por ventilação transversal natural (conjugando fachadas opostas e corredor da sala), misto ou mecânico, o existir ventilação durante bastante mais tempo ou permanentemente seria semelhante; e por outro lado, pretendeu-se incluir o efeito de abertura das janelas na estação de arrefecimento e da ventilação noturna na prevenção do sobreaquecimento.

Tendo em conta as condições apresentadas no estudo de sensibilidade sobre a reabilitação dos elementos da envolvente (entre elas a exclusão de soluções de isolamento da cobertura superiores a 10 cm), e a solução técnico-energética ideal, as segunda e terceira opções melhores e soluções de intervenção mínima, que embora não sejam as mais adequadas possam ser condicionadas por razões económicas reais, apresentam-se na Fig.76 todas as simulações possíveis a realizar envolvendo estratégias de ventilação de 400 m³/h, 600 m³/h, 800 m³/h e 1000 m³/h para ambas as orientações.

PORTO																																							
C0												C6												C10															
PO			P2			P4			P8			PO			P2			P4			P8			PO			P2			P4			P8						
E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3				
V400	E-O	58,80	59,68	53,78	X			55,29	56,25	50,20	X			32,41	33,73	26,67	27,60	X			26,96	28,25	20,87	26,47	X			31,50	32,66	25,53	X			25,77	27,08	19,64	X		
	S-N															27,66	X				29,27	21,86	X						X						X				
V600	E-O																																						
	S-N																																						
V800	E-O																																						
	S-N																																						
V1000	E-O																																						
	S-N																																						

Fig.76 – Matriz de sensibilidade das simulações possíveis e aceitáveis do ponto de vista energético ou económico, incluindo solução de intervenção na envolvente mais adequada a verde

Na Fig.76, conforme já discutido, as cruzes a vermelho representam soluções não regulamentares atualmente e a preto estão simulações cujo interesse económico e energético é muito baixo. Incluiu-se a cinzento soluções possíveis mas que não são aceitáveis numa intervenção de reabilitação de escolas Brandão, nomeadamente não isolar a cobertura. A estratégia de ventilação de 1000 m³/h corresponde a uma estratégia em que a maioria das portas e janelas da sala estão abertas, pelo que só justifica a sua análise no contexto da estação de arrefecimento. Apenas serão analisadas as estratégias de ventilação para a orientação poente/nascente e com a solução da envolvente otimizada (a verde).

Dado que adotando sistemas totalmente mecânicos (requeridos nos casos de ventilação mais elevada) ou mista com ventiladores mecânicos de exaustão envolverem custos energéticos de funcionamento, apesar de estes não serem incluídos na análise, o seu modo de utilização também influencia o consumo energético para aquecimento, pelo que para além da simulação de ventilação permanente, será também agora analisado o caso de uma gestão mais eficiente e económica correspondente à sua utilização constante apenas durante o período de aulas (1365 h) para a solução otimizada (C6-P4-E3).

Conforme apresentado na Fig.76, para cada solução de utilização serão simuladas estratégias de ventilação de 400 m³/h, podendo corresponder a ventilação natural e/ou mista, e utilizada com algumas adaptações (uso de ventilação inteligente) numa reabilitação de um Caso de Estudo [2]; ventilação de 600 m³/h, correspondente aproximadamente ao previsto na regulamentação portuguesa atual (Tabela 8); ventilação de 800 m³/h, correspondente às soluções de reabilitação relativamente recentes, à luz do antigo RECS, que levavam à adoção de sistemas mecânicos e envolventes estanques ao ar (Tabela 8); e ventilação de 1000 m³/h, não só para a obtenção de melhores curvas de correlação do consumo energético, mas sobretudo para verificar a influência da abertura de janelas na prevenção do sobreaquecimento na estação de arrefecimento (comumente designada de “verão”, embora não haja ocupação escolar relevante nas férias do verão) em que os sistemas de ventilação não são por norma utilizados.

Antes de se apresentar os resultados das várias simulações efetuadas considerou-se pertinente avaliar a influência que cada estratégia de ventilação a utilizar, só durante o período de aulas, tem nos valores da humidade relativa (HR) e concentração de dióxido de carbono (CO₂). Para o efeito são apresentadas na Fig.77 as curvas acumuladas da percentagem de HR e na Fig.78 as curvas de probabilidade acumulada da concentração de CO₂ (indicador da QAI), ambas para o período de aulas (1365 horas).

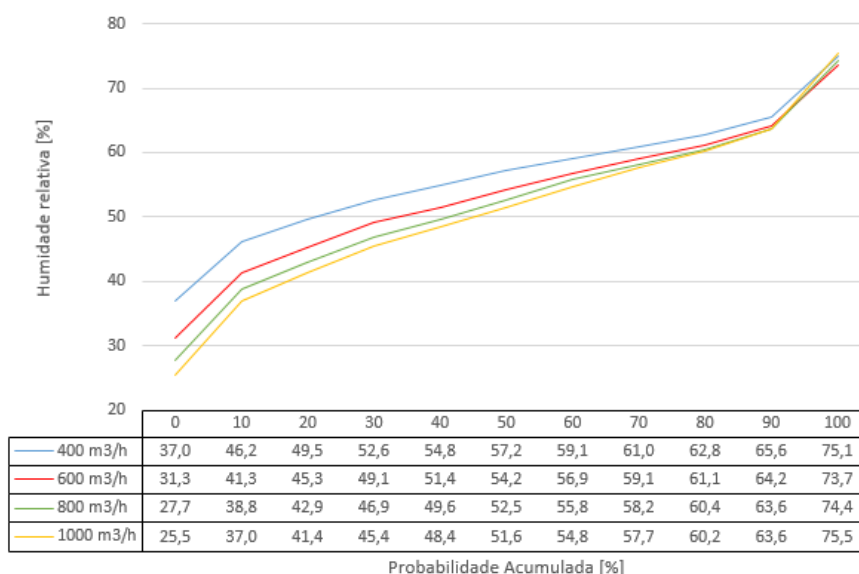


Fig.77 – Curvas de probabilidades acumuladas da HR interior durante as aulas, variando a ventilação

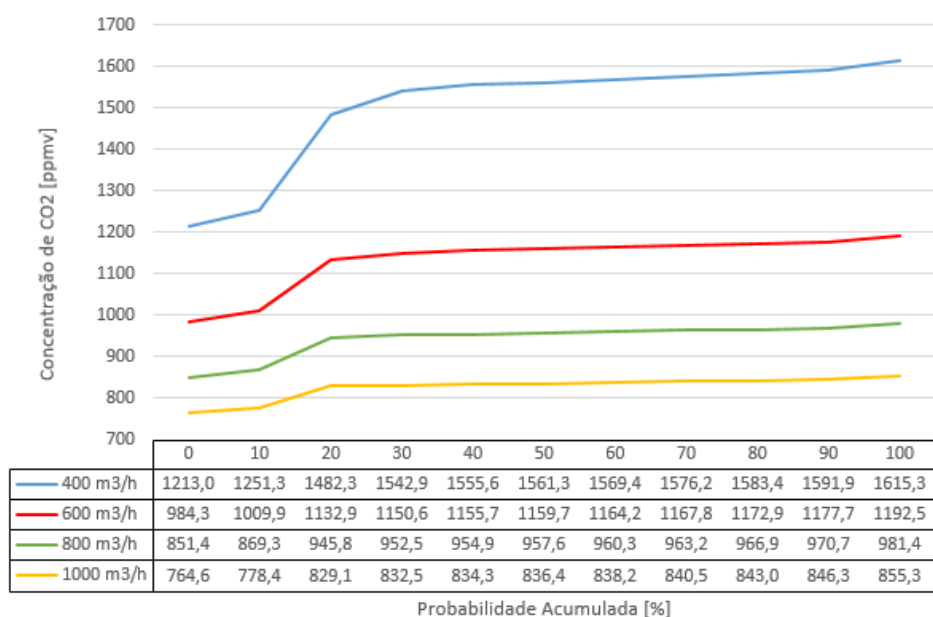


Fig. 78 – Curvas de probabilidades acumuladas da concentração de CO₂ interior durante as aulas, variando os caudais de ventilação

Relativamente à Fig. 77 conclui-se que quanto maior é o caudal de ventilação horário menor é, em geral, a humidade relativa da sala. Contudo, o seu valor máximo pode aumentar com o aumento do caudal de ventilação devido à maior entrada de humidade do exterior nas alturas do ano em que a humidade absoluta exterior seja superior à existente no interior da sala de aula, como ocorrerá certamente em alguns dias do inverno. O aumento da ventilação de 400 m³/h para ventilações superiores não terá grande influência na humidade relativa, atingindo-se valores bastante bons em qualquer uma das estratégias de ventilação.

Relativamente à Fig. 78, os maiores caudais de ventilação levam a uma menor concentração de poluentes devido ao ar exterior possuir concentrações bastante inferiores e permitir portanto baixar a sua concentração no ar interior, sendo o seu efeito mais significativo entre as estratégias de 400 m³/h e 600 m³/h, esta última prevista no atual regulamento e cumprindo as concentrações de poluentes máximas de 1250 ppmv durante todo o ano. Por outro lado, constata-se uma variação da gama de valores da concentração de CO₂ mais elevada ao usar-se a ventilação de 400 m³/h comparativamente a outras estratégias, sendo constituída por sistemas que ao tentar encontrar o equilíbrio entre a ventilação natural e mecânica permitem uma maior flutuação na concentração deste poluente; já para ventilações mais elevadas este controlo é mais eficaz, sendo a gama de variação mais restrita.

Na estratégia proposta de 400 m³/h a grande maioria da concentração de CO₂ é inferior a 1600 ppmv, permitindo soluções de ventilação mista em que a otimização da envolvente tem uma importância elevada. O regulamento alemão limita a sua concentração a um valor em torno de 1500 ppmv, tendo a regulamentação portuguesa passado do valor absoluto de 1000 ppmv do RCCTE para uma concentração média de 1250 ppmv. A variação destes valores justifica estudos que permitam avaliar a relação entre a QAI e a saúde e concentração dos ocupantes das salas de aula e quantificar objetivamente a concentração de poluentes limite. Pensa-se que eventualmente a estratégia de 400 m³/h, com concentração máxima de cerca de 1600 ppmv possa ser aceitável, permitindo maiores vantagens económicas, ou então o uso de um sistema de velocidade ajustável que possa aumentar pontualmente o caudal de ventilação.

3.5.2. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

3.5.2.1. Simulações

Como forma de sintetizar as simulações a realizar no âmbito do estudo das estratégias de ventilação é apresentada na Tabela 34 as várias estratégias de ventilação a adotar, utilizando a solução técnico-energética otimizada aplicada ao Caso de Estudo, tendo sido incluídos os valores tanto em m^3/h como em renovações horárias (rph) para uma sala com volume útil de 155 m^3 .

Tabela 34 – Simulações a realizar para o estudo de estratégias de ventilação

	Caudal de ventilação (m^3/h)	Caudal de ventilação (rph)
Estratégia 1	400	2,58
Estratégia 2	600	3,87
Estratégia 3	800	5,17
Estratégia 4*	1000	6,46

* Corresponde à abertura de portas e janelas, sendo apenas justificável a sua análise para a estação de arrefecimento

Para cada estratégia da Tabela 34 serão apresentadas duas alternativas/cenários de gestão do sistema de ventilação (quer seja natural, misto ou mecânico). A alternativa A corresponde ao funcionamento contínuo, ou seja, independentemente da ocorrência de aulas, da ventilação estabelecida, representando uma má gestão ou condições de “verão”. A alternativa B corresponde ao funcionamento dos sistemas apenas durante o período de aulas, com a ventilação estabelecida para cada estratégia, mediante calendário e horário estabelecidos pelo utilizador no programa. Nesta alternativa, nos períodos sem aulas, em que os sistemas não estão em funcionamento, foi estabelecido como sendo 10 % da ventilação em serviço da estratégia 1, ou seja $40 \text{ m}^3/\text{h}$, o valor correspondente às infiltrações e exaustões naturais existentes na sala com as janelas e portas fechadas.

Para se compreender melhor a influência da ventilação no consumo energético, apresenta-se previamente na Fig.79 os consumos energéticos “fixos” durante o período de aulas, ou seja, o consumo que a sala teria para manter condições de conforto numa hipotética situação de ventilação nula ($0 \text{ m}^3/\text{h}$).

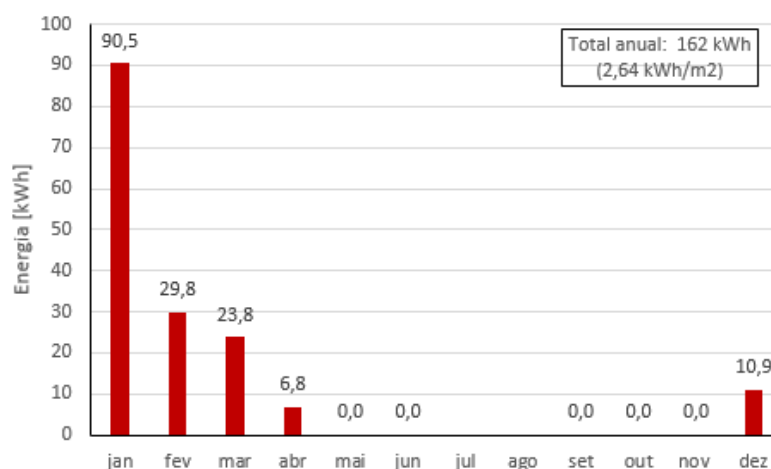


Fig.79 – Consumos energéticos mensal e anual “fixos” para manter condições de conforto durante as aulas

Da análise da Fig.79 constata-se que o mês de janeiro é aquele em que existem as maiores “perdas fixas” (no conjunto dos envidraçados e elementos opacos da envolvente), sendo a energia necessária superior à soma da dos restantes meses do ano.

Apresentam-se nas Fig.80, Fig.82 e Fig.84 os consumos energéticos mensais totais para manter condições de conforto térmico durante o período de aulas, da 1ª à 3ª estratégias da Tabela 34, respetivamente, e cenários A e B de ventilação; e nas Fig.81, Fig.83 e Fig.85 os ganhos e perdas por ventilação com condições de conforto térmico, no período de 1 ano de aulas (1365 h), também da 1ª à 3ª estratégias e cenários A e B de ventilação. Ambos têm como objetivo mostrar a evolução e justificar o consumo energético ao longo dos vários meses. Novamente, mais à frente, os resultados de todas as estratégias de ventilação serão agrupados de forma a se poder comparar as diversas soluções e retirar conclusões. O conjunto de resultados para cada uma das estratégias é o seguinte:

- Estratégia 1 – Ventilação de 400 m³/h

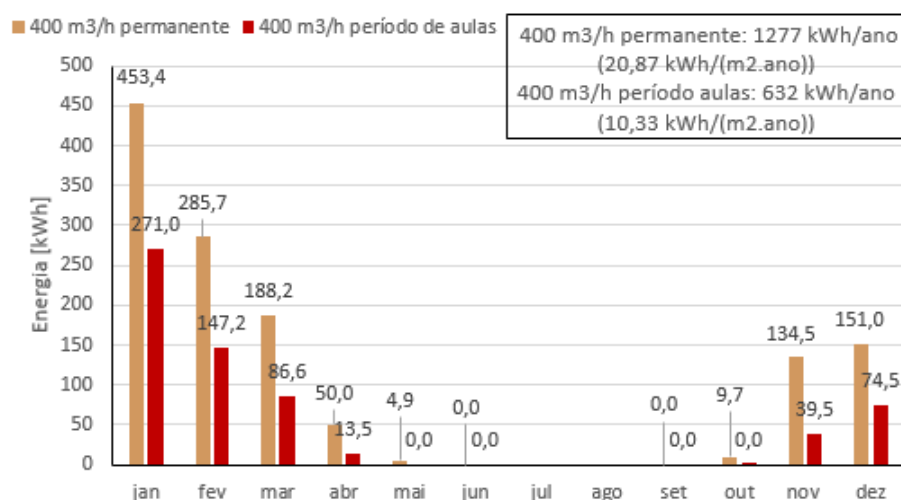


Fig.80 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)

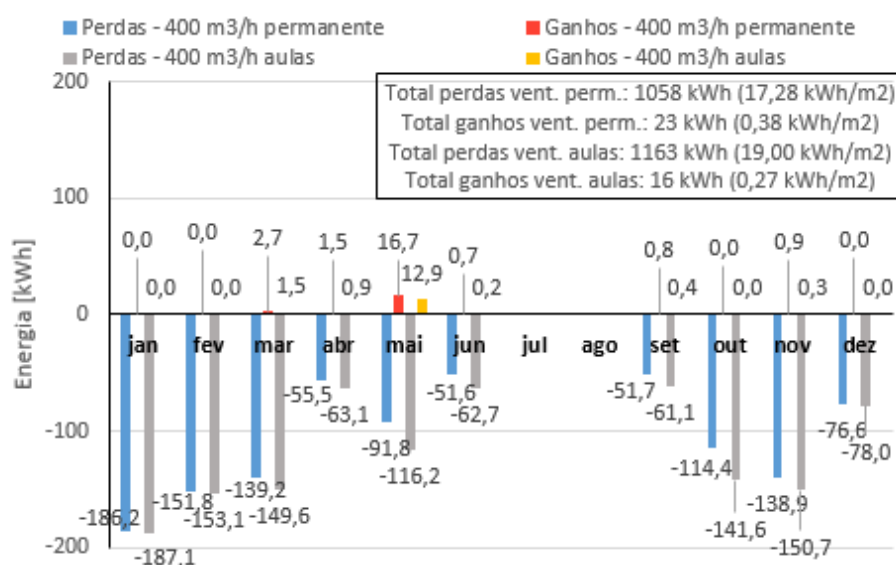


Fig.81 – Perdas e ganhos mensais e anuais por ventilação (em kWh e kWh/m²), durante o período de aulas (1365 h), e para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)

- Estratégia 2 – Ventilação de 600 m³/h

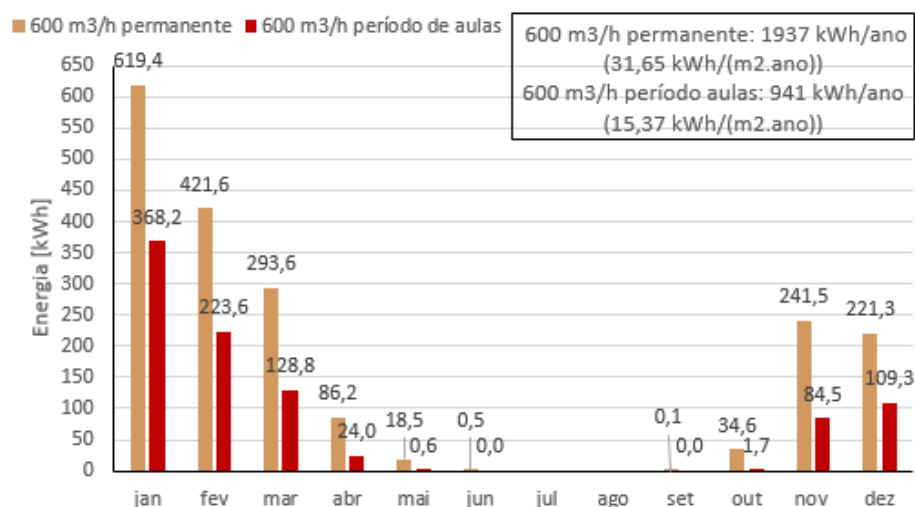


Fig.82 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)

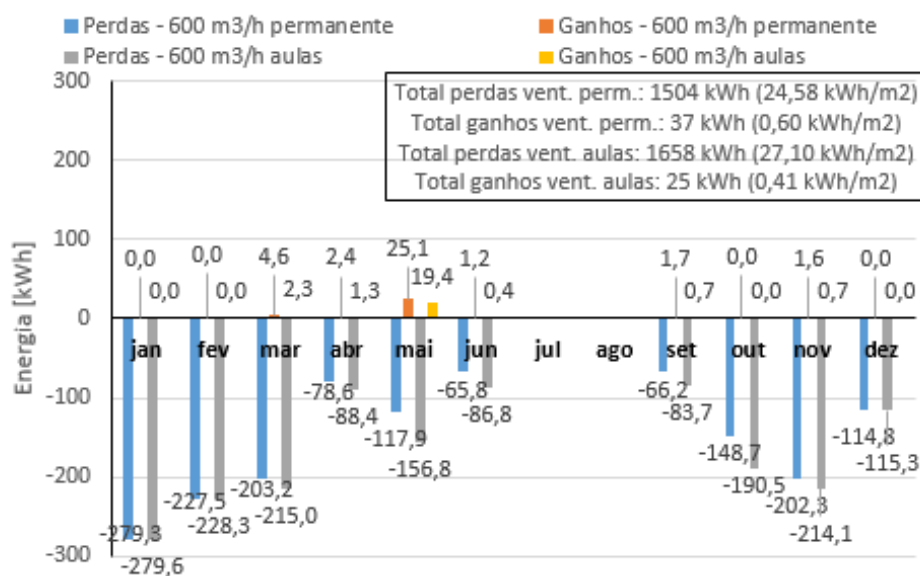


Fig.83 – Perdas e ganhos mensais e anuais por ventilação (em kWh e kWh/m²), durante o período de aulas (1365 h), e para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)

- Estratégia 3 – Ventilação de 800 m³/h

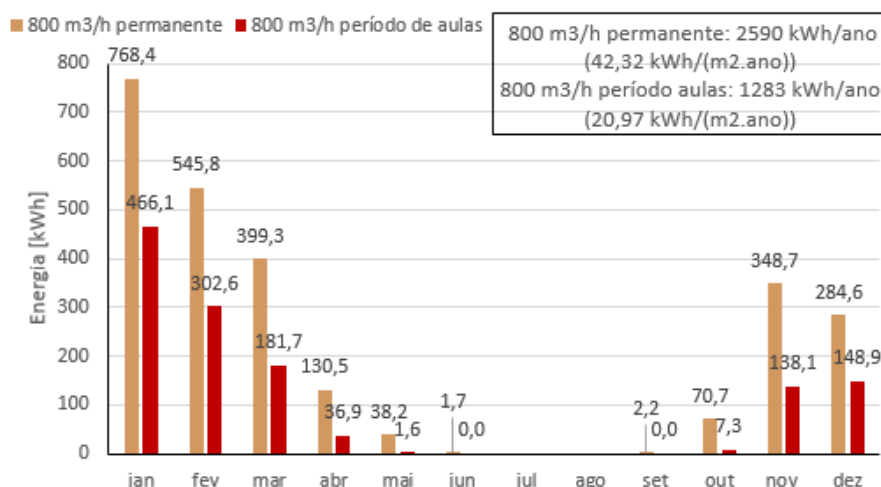


Fig.84 – Consumos energéticos mensal e anual (em kWh e kWh/m²) para manter condições de conforto durante o período de aulas (1365 h), para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)

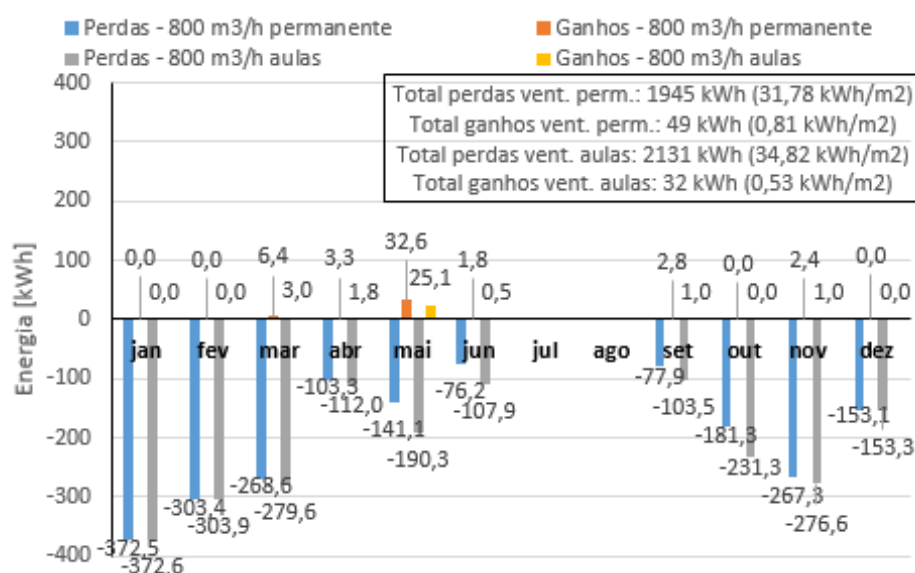


Fig.85 – Perdas e ganhos mensais e anuais por ventilação (em kWh e kWh/m²), durante o período de aulas (1365 h), e para os dois cenários de ventilação estabelecidos (A e B)

Em todos os gráficos de comparação dos consumos energéticos mensais das várias estratégias de ventilação para os cenários A e B (Fig.80, Fig.82, Fig.84) constata-se que o consumo energético anual de aquecimento é praticamente o dobro no caso de ventilação permanente face a ventilação apenas durante as aulas, mesmo sem se contar com a energia para o funcionamento de eventual equipamento mecânico.

Nos gráficos de comparação das perdas e ganhos mensais das várias estratégias de ventilação para os cenários A e B (Fig.81, Fig.83, Fig.85) os valores positivos correspondem a ganhos provenientes do exterior por ventilação e os valores negativos correspondem à dissipação do calor do interior da sala para o seu exterior. Os ganhos por ventilação registados durante as aulas em alguns meses ocorrem

nos casos em que a temperatura interior da sala (sempre igual ou superior a 20°C durante as aulas) é inferior à do exterior, levando à entrada de ar quente proveniente do exterior. Estes verificam-se mais no caso de ventilação permanente do que no caso em que a ventilação apenas é utilizada durante o período de aulas, uma vez que é expectável que em certas alturas com comportamento semelhante ao “verão” o arrefecimento noturno baixe um pouco a temperatura interior, mesmo sem esta ficar inferior a 20°C, ficando assim as salas ligeiramente mais frias o que permite durante as aulas um maior fluxo do exterior mais quente. Por outro lado, apesar de se verificarem perdas por ventilação ligeiramente superiores durante o período de aulas no caso de utilização de ventilação apenas nesse período, a ventilação utilizada permanentemente leva a maiores perdas globais, que se dão sobretudo fora do período de aulas.

3.5.2.2. Análise de resultados

Após a apresentação individual dos aspetos mais relevantes de cada estratégia de ventilação (1ª a 3ª), serão agora apresentados os resultados comparativos das várias simulações (estratégias de ventilação e cenários de utilização) em termos de consumo energético anual; de perdas e ganhos de calor anuais; e analisados os problemas de sobreaquecimento na estação de arrefecimento, incluindo a estratégia 4 (1000 m³/h) que prevê a abertura de janelas de forma a permitir uma ventilação cruzada elevada durante todo o dia (24 horas), permitindo avaliar o efeito do arrefecimento por ventilação noturna. Serão obtidas conclusões que permitirão discutir as melhores estratégias de ventilação (a concretizar com soluções do mercado) e sua utilização.

A eficiência energética foi muito importante para a otimização da envolvente visto a estação de aquecimento ser a predominante no uso dos edifícios escolares e à necessidade de não só, poupar energia e recursos financeiros no aquecimento, como também contribuir para uma maior sustentabilidade. Nesta fase, a par deste requisito são também definidas exigências de ventilação/qualidade do ar interior principalmente em termos da limitação de concentração de poluentes, pelo que existiu previamente já a preocupação em apenas analisar estratégias que garantam boa QAI, que terão necessariamente que ser maiores que as existentes antes da reabilitação da escola. Assim, apenas com a concretização desses requisitos, a eficiência energética voltou a poder ser o critério mais relevante.

Quanto aos consumos energéticos importa agora fazer uma comparação dos consumos anuais de aquecimento entre as diversas estratégias e cenários de ventilação (Fig.86), tendo nesta fase a estratégia de ventilação 4 sido inserida de forma a permitir definir com o máximo rigor a curva de consumos energéticos para todas as simulações (embora a sua aplicação apenas faça sentido na estação de arrefecimento). O cenário de ventilação nula representa as “perdas constantes” pela envolvente compensadas por aquecimento, estando estas obviamente incluídas em todos os restantes consumos dos cenários de simulação.

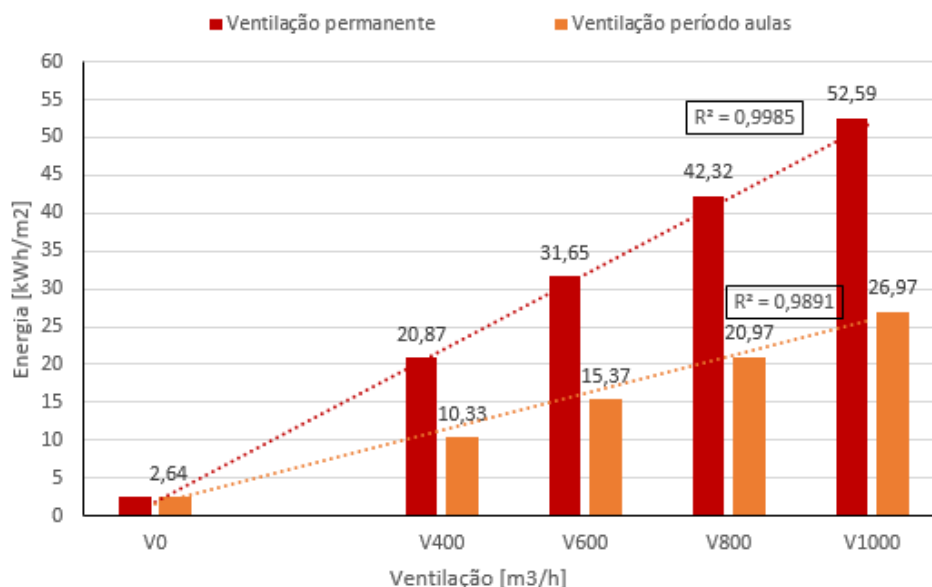


Fig.86 – Consumo energético anual, em kWh/m², de cada estratégia e cenário de ventilação, para condições de conforto durante o período de aulas

Analisando a Fig.86 constata-se que há uma correlação praticamente linear ($r^2=1$) para a correspondência entre o aumento de ventilação, em m³/h, e o consumo energético anual, em kWh/m², para ambos os cenários, sendo o consumo hipotético “fixo” de 2,64 kWh/m² por ano. Assim, aumentando a ventilação muito além de um valor mínimo aceitável, estamos a aumentar o consumo energético abruptamente, possivelmente desnecessário visto que com a ventilação de 400 m³/h é possível obter uma razoável QAI. Concretizando, a aplicação de sistemas de ventilação mecânica que visem atingir um caudal de ventilação de 800 m³/h, já aplicados em soluções de reabilitação de edifícios escolares do passado recente, resultaria num consumo energético duplo da solução de ventilação mista de 400 m³/h defendida, dada a relação linear entre a ventilação e o consumo energético.

Quanto à gestão do uso da ventilação constata-se que a sua utilização estritamente durante o período de aulas evita o desperdício de energia, não só para o funcionamento dos ventiladores em períodos sem ocupação, mas sobretudo o desperdício do aumento desnecessário de energia consumida para o aquecimento da sala de aula durante o período de aulas (cerca do dobro). Espera-se contudo que numa situação real o consumo energético possa variar numa situação intermédia entre as curvas vermelha e laranja, mas que o ideal seja que se aproxime o mais possível da curva laranja, correspondente a uma boa gestão. Assim, defende-se uma gestão eficiente e cuidada dos sistemas de ventilação a adotar, devendo ser tido em atenção que apenas devem ser utilizados durante o período de aulas.

Quanto aos ganhos e perdas de energia por ventilação, relevantes condicionantes diretos do consumo energético, importa agora fazer a sua comparação entre as diversas estratégias e cenários de ventilação (Fig.87) para aquecimento durante o período de aulas, tendo nesta fase a estratégia de ventilação 4 sido inserida de forma a permitir definir com o máximo rigor a curva de ganhos e perdas para todas as simulações (embora a sua aplicação apenas faça sentido na estação de arrefecimento).

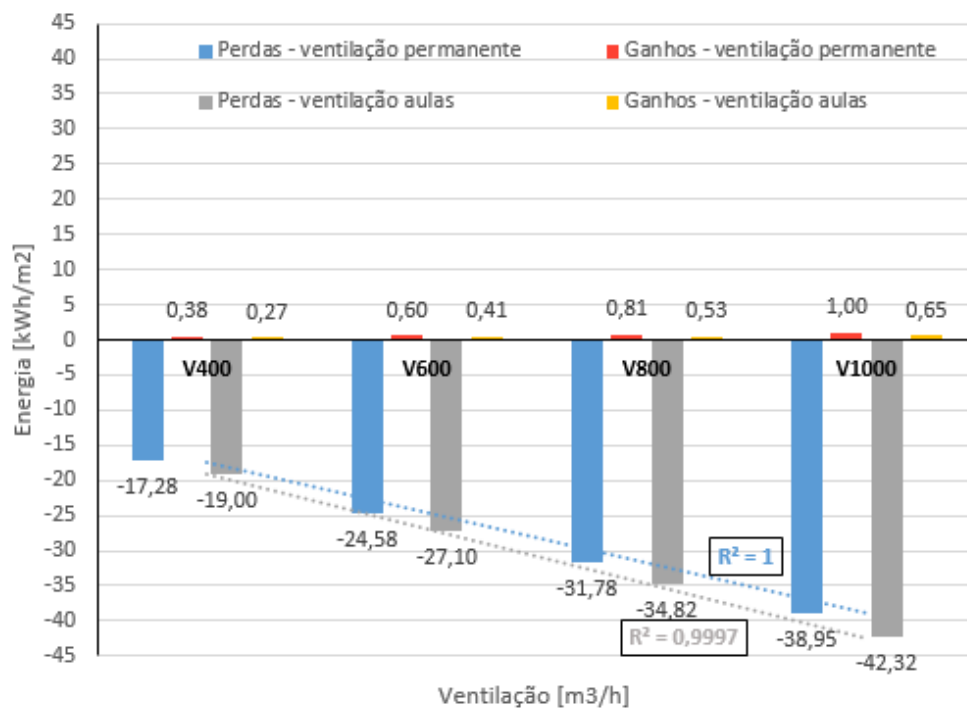


Fig.87 – Perdas e ganhos anuais por ventilação, em kWh/m², com condições de conforto durante o período de aulas, para as estratégias e cenários de ventilação estabelecidos

Através da análise da Fig.87 verifica-se que para todas as simulações os ganhos de energia por ventilação provenientes do exterior representam apenas uma parcela residual, sendo fundamental refletir principalmente sobre as perdas de energia anuais e consequente aumento do consumo energético.

Tal como o consumo energético, as perdas para ambos os cenários de ventilação aumentam linearmente com o caudal de ventilação. As perdas são prejudiciais na estação de aquecimento por retirarem calor da sala e obrigarem ao maior consumo de energia para a reposição das condições de conforto térmico, apesar de serem úteis no “verão” para prevenir o sobreaquecimento arrefecendo a sala durante os períodos em que a temperatura exterior é mais amena. Assim, a estratégia 1 (400 m³/h) deve ser adotada na estação de aquecimento e a estratégia 4 (1000 m³/h) apenas na de arrefecimento.

Por outro lado, as perdas de energia nos cenários de ventilação permanente, face à restrita ao período de aulas, serão maiores no total, mas ocorrerão sobretudo fora do período de aulas, não estando contabilizadas na Fig.87. Assim, o aumento ligeiro das perdas, com ventilação apenas no período de aulas em comparação com o cenário de ventilação permanente, ficam a dever-se a situações pontuais. Por exemplo, podem corresponder a dias de aulas em que a temperatura interior é superior a 20°C e se encontra em flutuação livre, sendo a temperatura interior mais elevada no caso em que não existiu ventilação fora do período de aulas, levando dessa forma a um maior fluxo no início das aulas ao ligar a ventilação. De facto, o valor próximo das perdas energéticas entre ambos os cenários no período de aulas devem-se às condições interiores serem semelhantes devido ao aquecimento para obter conforto térmico. Contudo, embora as perdas apresentadas sejam similares, parecendo que o cenário de ventilação não tem influência no consumo energético, tal não é de todo verdade, estando o contraste perfeitamente espelhado nas curvas da Fig.86, em que o consumo energético praticamente duplica devido às perdas que ocorrem por ventilação no cenário do seu uso fora do período de aulas.

Dado na estação de arrefecimento os sistemas de ventilação com dispositivos mecânicos estarem na maioria dos dias desligados (devido à menor estanqueidade causada pelas janelas das salas estarem abertas e como forma de poupança de energia) e os vãos envidraçados permanecerem abertos, quer durante o período de aulas, quer em períodos sem aulas, de forma a tentar fazer face ao sobreaquecimento optou-se por considerar o cenário em que a ventilação é constante durante todo o ano para cada estratégia de ventilação. Recorreu-se aos resultados fornecidos pelas mesmas simulações referentes aos consumos energéticos, ou seja, dado que não é possível a conjugação no *WUFI* da estratégia de utilização das proteções solares a nascente mais adequada na estação de arrefecimento com a de aquecimento na mesma simulação tomou-se essa opção, tendo consciência que os valores apresentados para o desconforto serão por excesso, mas que se pretende sobretudo obter uma relação entre ventilação e sobreaquecimento e não tanto quantificar objetivamente o seu valor.

Procura-se assim investigar de que forma a ventilação das salas pela abertura de mais ou menos janelas pode ou não contribuir para o seu arrefecimento e o evitar de problemas de sobreaquecimento sem recurso a sistemas mecânicos de arrefecimento, sendo os resultados apresentados na Tabela 35 e Fig.88 baseados no IDT e número de horas de desconforto de “verão”.

Tabela 35 – Total de horas de aulas em que há problemas de sobreaquecimento, com aquecimento no inverno

Estratégia ventilação permanente	400 m ³ /h	600 m ³ /h	800 m ³ /h	1000 m ³ /h
N.º total horas aulas (T>25°C)	123	97	89	82
N.º total horas aulas (T>25°C) em %	9,0	7,1	6,5	6,0

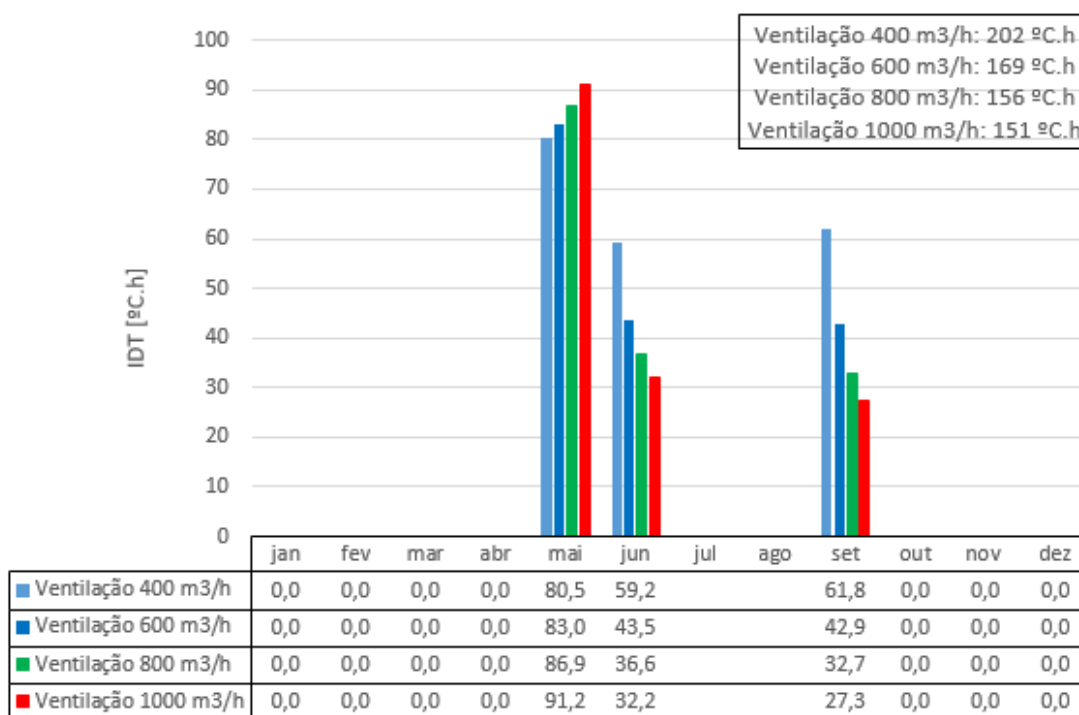


Fig.88 – Indicador de Desconforto Térmico (IDT) mensal e anual, para uma estratégia de aquecimento de inverno, e durante o período de aulas (1365 h)

Da análise conjunta da Tabela 35 e Fig.88 verificam-se novamente duas tendências. No mês de maio, em que se registam temperaturas exteriores mais altas, o aumento de ventilação através da abertura de mais janelas irá contribuir para o aumento da entrada de calor e consequência no aumento do sobreaquecimento. Este caso particular permite retirar elações para os casos de climas com a estação de arrefecimento mais severos, com temperaturas exteriores mais elevadas e em que muita ventilação já não é recomendável, sendo aí necessários sistemas mecânicos de arrefecimento. Por outro lado, no caso de meses com climas exterior mais ameno, o aumento de ventilação irá contribuir para a diminuição do sobreaquecimento, sobretudo nos períodos noturnos. De um modo geral, para o clima do Porto resultou uma diminuição do IDT, ou seja, verificou-se uma diminuição do sobreaquecimento com o aumento da ventilação, sendo essa diminuição maior sobretudo entre 400 m³/h e 600 m³/h, não sendo absolutamente indispensável o uso de sistemas mecânicos de arrefecimento.

3.5.3. ANÁLISE CRÍTICA

Na Fig.89 são apresentados os resultados que completam o estudo realizado, sobre as estratégias de ventilação para a solução otimizada da envolvente (a verde) mas, apesar de que ventilações mais elevadas exigirão sistemas mecânicos que tendem a ter um maior controlo de utilização e a ser usados em períodos próximos do período de aulas, foi apresentado o cenário de ventilação contínua como forma de manter uma uniformidade comparativa de valores com as simulações anteriormente realizadas no estudo de sensibilidade de otimização da envolvente.

PORTO																																								
C0												C6												C10																
			P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8			P0			P2			P4			P8				
			E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3					
V400	E - O		58,80	59,68	53,78	X			55,29	56,25	50,20	X			32,41	33,73	26,67	27,60	X			26,96	28,25	20,87	26,47	X			31,50	32,66	25,53	X			25,77	27,08	19,64	X		
	S - N																																							
V600	E - O																																							
	S - N																																							
V800	E - O																																							
	S - N																																							
V1000	E - O																																							
	S - N																																							

Fig.89 – Matriz de sensibilidade das simulações possíveis e aceitáveis do ponto de vista energético ou económico e resultados das estratégias de ventilação analisadas

Foi tentado estabelecer uma relação entre o consumo energético total, os consumos energéticos “fixos” e perdas por ventilação para uma boa gestão da ventilação, mas não foi possível obter correlações diretas entre o consumo de energia e as perdas por ventilação dado que, apesar de as perdas por ventilação serem pequenas fora do período de aulas, no cenário dos ventiladores estarem desligados, elas existem e não foram quantificadas neste estudo (cujo objetivo era a análise do período de aulas apenas), pelo

que a soma da energia “fixa” consumida (hipotética ventilação nula todo o ano) com as perdas por ventilação podem ser superiores ou inferiores à energia consumida para um determinado mês da estação de aquecimento. Serão superiores nos casos em que a inércia da envolvente otimizada consegue não só compensar as perdas por ventilação que ocorrem fora do período de aulas como também manter a temperatura da sala elevada durante mais tempo durante o período de aulas, poupando energia (como no caso do mês de janeiro com ventilação de 400 m³/h). Por outro lado, poderão ser inferiores, ou seja, o consumo energético ser mais elevado, por exemplo no caso de a inércia da sala não conseguir compensar as perdas por ventilação, devido ao ambiente exterior estar a uma temperatura muito baixa e a ventilação ser elevada (como no caso mês de janeiro com ventilação de 800 m³/h). Além do referido, pode-se também verificar que a soma das perdas por ventilação com o consumo energético “fixo”, no caso de utilização dos ventiladores apenas durante o período de aulas, é superior à energia consumida ao fim do ano dado muitas perdas por ventilação serem benéficas na estação de arrefecimento como forma de evitar o sobreaquecimento, impedindo assim o estabelecimento de qualquer relação direta entre perdas por ventilação e consumo energético.

Apesar de não se ter quantificado, mas se poder subentender com o referido no parágrafo anterior, no caso da ventilação se manter desligada nos períodos sem ocupação (boa gestão), a sala com a envolvente energeticamente otimizada permanecerá com temperaturas mais elevadas durante maiores períodos de tempo e a envolvente libertará menos energia devida à sua inércia. Esta energia armazenada não libertada no caso de uma sala devidamente isolada, servirá como reserva durante o período de aulas e permitirá manter a temperatura de conforto durante mais tempo e assim poupar energia. Assim, a gestão do uso dos ventiladores é um poderoso instrumento, não só para a poupança no seu funcionamento desnecessário, mas também para a gestão de energia consumida para aquecimento, no caso de envolventes otimizadas e com bastante influência no consumo energético.

As relações lineares entre consumo energético e caudal de ventilação obtidas na Fig.86 permitem comprovar que, conforme já referido no capítulo 2 desta Dissertação e em muita bibliografia, em escolas reabilitadas no passado com soluções de ventilação mecânica que proporcionam caudais próximos dos 800 m³/h a fatura energética tenha aumentado significativamente e justificado que certas escolas não tenham os sistemas de ventilação em funcionamento. Com efeito, passar de escolas não reabilitadas com envolvente energeticamente deficiente com elevado peso nas perdas da envolvente e ventilação escassa para escolas com envolvente otimizada, mas em que o peso principal é o da ventilação, com caudais superiores aos necessários (800 m³/h), fez-se com que a otimização realizada não tenha permitido diminuir o consumo energético. Deve então ser repensado qual deverá ser o valor de ventilação mais adequado entre os 400 m³/h defendidos neste trabalho (mas que apesar de parecerem aceitáveis carecem de comprovação científica) e os 600 m³/h estabelecidos atualmente no RECS.

Após todo o estudo de otimização da envolvente e da melhor estratégia de ventilação a adotar, 400 m³/h apenas durante os períodos de ocupação, obteve-se para a sala do Caso de Estudo um consumo anual de 10,33 kWh/m². Será necessário aquecimento de novembro a abril, sendo o seu valor máximo, registado em janeiro, de 271 kWh para condições de conforto térmico interior com temperaturas sempre superiores a 20°C durante as aulas. Cenários para os seus custos, aplicados à totalidade de um edifício escolar, serão apresentados no capítulo seguinte.

Como última nota neste âmbito, pretende-se referir que as estratégias de ventilação escolhidas não pretenderam ser exaustivas, mas antes destacar a importância da ventilação e justificar um estudo mais detalhado com recurso aos vários sistemas de ventilação existentes no mercado e também tipos de utilização distintos dos cenários abordados (por exemplo, sistemas inteligentes cuja ventilação varia de sala para sala e conforme a concentração de poluentes, através do uso dos mais recentes avanços de domótica aplicados a este domínio).

4

RECOMENDAÇÕES PARA A REABILITAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS ESCOLARES

4.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Após a realização de um estudo de sensibilidade do desempenho higrotérmico de soluções de reabilitação de cada elemento da envolvente dos edifícios escolares do tipo Brandão, para diferentes orientações e para o clima do Porto ou semelhantes, obtiveram-se várias conclusões relevantes. Com efeito, concluiu-se sobre as soluções construtivas a adotar numa reabilitação da envolvente exterior energeticamente otimizada deste tipo de edifícios, tal como recomendações de utilização com vista à obtenção de edifícios que proporcionem condições de conforto térmico e qualidade do ar interior (QAI) aos seus ocupantes, tendo em vista a eficiência energética e durabilidade das soluções propostas.

Assim, este capítulo está dividido em duas partes principais. Numa primeira parte será apresentada de forma resumida a importância de intervenções de reabilitação dos variados tipos de edifícios escolares e as estratégias comumente adotadas na elaboração dos projetos de reabilitação, ou seja, reabilitação construtiva ou funcional. Na segunda parte, após este pequeno enquadramento, serão apresentadas propostas para a reabilitação térmica da envolvente exterior dos edifícios do tipo Brandão, com base nas soluções de reabilitação que se demonstraram mais eficientes obtidas no estudo numérico com o *WUFI PLUS*, discutidas soluções de ventilação e realizados cenários de custos para aquecimento.

4.2. PRINCÍPIOS DA REABILITAÇÃO CONSTRUTIVA E REABILITAÇÃO FUNCIONAL

As estratégias a seguir nos trabalhos de reabilitação de um edifício escolar poderão passar pela reabilitação funcional, ou simplesmente pela reabilitação construtiva.

Nas intervenções do primeiro tipo, ou seja a reabilitação funcional, são realizadas intervenções profundas, inclusivamente associadas a reestruturações arquitetónicas, com vista a serem dadas respostas às exigências atuais recomendadas pelo Ministério da Educação e, inclusivamente permitir a abertura do espaço escolar à comunidade através do incentivo à criação de espaços flexíveis e multifuncionais. Muitas escolas do parque escolar não intervencionado não tiveram os devidos cuidados de manutenção e, além disso, foram-se desajustando das necessidades do ensino ao longo do tempo. Assim, para além de uma reabilitação da envolvente é também exigida a modernização tecnológica no apoio a uma melhor transmissão de conhecimentos, melhores aprendizagens e promoção de um ensino de maior qualidade.

Por outro lado, a reabilitação construtiva consiste apenas na intervenção ao nível da envolvente, dos elementos interiores e das instalações de modo a melhorar o conforto, aumentar a eficiência energética e resolver os problemas mais gerais dos edifícios. Esta envolve menor complexidade que a reabilitação funcional, sem alteração funcional/arquitetónica e resulta em intervenções mais baratas, satisfazendo parcialmente a regulamentação em vigor visto que, para o estado atual do parque escolar não reabilitado a intervenção apenas na envolvente não é suficiente. A reabilitação construtiva envolve sinteticamente intervenções na envolvente exterior, no interior, nas instalações e arranjos exteriores, não sendo prevista a adaptação dos espaços às mais recentes exigências da sociedade.

Em particular, para o edifício escolar do Caso de Estudo de finais da década de 70 do século passado, e para muitos da mesma tipologia, tendo em atenção a idade do edifício, e em geral apresentarem mau estado de conservação e desajustes face às exigências atuais, é recomendável uma reabilitação funcional abrangente e não apenas construtiva. Nesta Dissertação não serão especificadas todas as intervenções a realizar na escola em estudo, querendo-se deixar apenas a nota de que a reabilitação térmica da envolvente objeto de recomendações de reabilitação neste capítulo não esgota todo o estudo e projetos de reabilitação de que os edifícios escolares desta tipologia necessitam [22] e [23].

4.3. PROPOSTAS PARA A REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS DO TIPO BRANDÃO

Após a conclusão da conveniência de isolamento do pavimento, no estudo de sensibilidade da envolvente exterior foram analisadas as espessuras de isolamento mais adequadas para a cobertura e paredes exteriores, bem como o tipo de vãos envidraçados e proteções solares a adotar. As soluções otimizadas obtidas estão descritas na Tabela 36, sendo que cada elemento da envolvente cumprirá os requisitos regulamentares atualmente em vigor.

Tabela 36 – Solução energeticamente otimizada da envolvente para cada elemento construtivo e respetivo cumprimento regulamentar

	SOLUÇÃO ADOTADA	CUMPRIMENTO REGULAMENTAR
PAVIMENTO	3 cm isolamento térmico* sobre a laje de pavimento ($U = 0,67 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$)**	SOLUÇÃO REGULAMENTAR (sem requisitos)
COBERTURA	6 cm isolamento térmico* sobre a laje de cobertura ($U = 0,38 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$)	SOLUÇÃO REGULAMENTAR ($U_{\text{máx}} = 0,40 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$)
PAREDES EXTERIORES	4 cm de isolamento térmico* na caixa de ar de “parede dupla” ($U = 0,49 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$)	SOLUÇÃO REGULAMENTAR ($U_{\text{máx}} = 0,50 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$)
VÃOS ENVIDRAÇADOS	Envidraçado metálico com corte térmico e vidro duplo de baixa emissividade ($U_w = 2,8 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$)	SOLUÇÃO REGULAMENTAR ($U_{w \text{ máx}} = 2,8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
PROTEÇÕES SOLARES	Proteção exterior móvel de lâminas metálicas e cor clara ($g_T = 0,09$)	SOLUÇÃO REGULAMENTAR ($g_{T \text{ máx}} = 0,33$)

* Isolamento em XPS ($\lambda = 0,025 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) [34]; ** Valor adotado no *WUFI PLUS*

Importa agora definir a solução construtiva, com todas as diversas camadas constituintes, a adotar em cada elemento construtivo, bem como tecer recomendações com vista à sua maior durabilidade.

A diminuição do coeficiente de transmissão térmica do pavimento em contato com o solo (U) demonstrou trazer benefícios consideráveis em termos de diminuição de perdas de calor e da diminuição do consumo energético. Assim, a reabilitação térmica do pavimento mostrou ser necessária, tendo-se adotado a espessura de isolamento de 3 cm sobre a laje de pavimento. Para a aplicação do isolamento térmico será necessário demolir o pavimento existente numa espessura de cerca de 10 cm. Deve posteriormente regularizar-se o suporte, realizar-se a aplicação de uma barreira pára-vapor, e colocar-se os 3 cm de isolamento térmico, a que se deve seguir a execução de uma camada de microbetão ou betoni-lha armada, que servirá de suporte ao revestimento final.

Conforme apresentado na Tabela 14 (ver 3.1.1.) a sala é constituída inicialmente por duas soluções de coberturas: a solução de cobertura da sala de aulas propriamente dita, constituída por uma cobertura ligeiramente inclinada com desvão fortemente ventilado (Solução 1); e a solução de cobertura do corredor da sala constituída por uma cobertura plana (Solução 2).

Para a cobertura da sala de aulas propriamente dita terão de ser retiradas as placas de fibrocimento (contém fibras de amianto, cuja libertação é muito prejudicial à saúde humana), para seguidamente se colocar a espessura mínima regulamentar de isolamento térmico sobre a esteira horizontal da sala, e colocadas novas placas em chapa metálica. De referir ainda que de forma a garantir boas condições térmicas no “verão”, a cobertura em desvão deverá ser fortemente ventilada para a chapa metálica poder assumir não só a função de proteção face às intempéries do ambiente interior, mas também de pára-sol.

A solução compreendida entre o desvão fortemente ventilado e o interior da sala é apresentada na Fig.90. Importante deixar a nota de que com o isolamento utilizado a solução mínima regulamentar é de 6 cm, mas no caso de se utilizar outro isolamento com outras propriedades, por exemplo com $\lambda = 0,037 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$, previstos para o XPS no ITE 50 [39] a espessura mínima regulamentar seria de 9 cm!

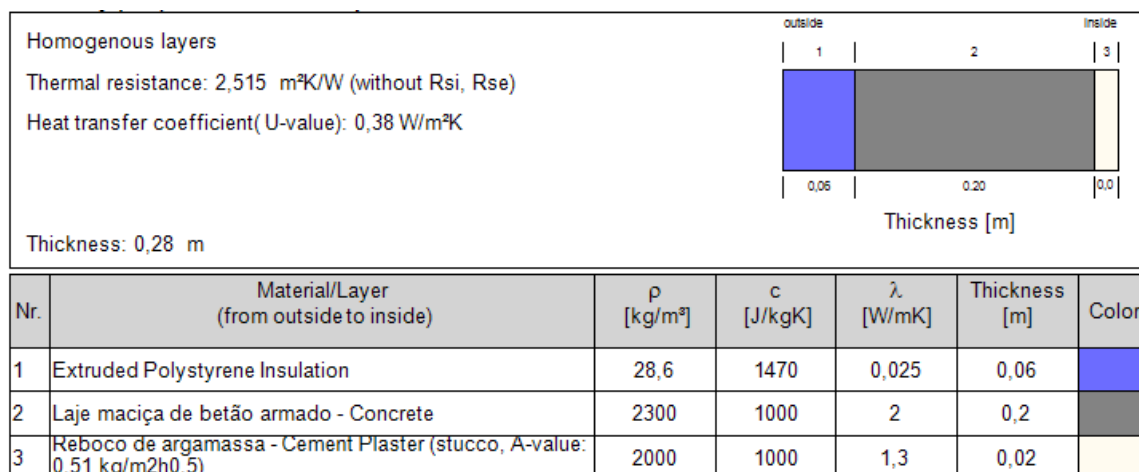


Fig.90 – Caracterização construtiva da cobertura reabilitada sobre a sala de aula [34]

A segunda solução de coberturas corresponde à cobertura do corredor da sala de aula, já não coberta pela chapa metálica superior. Nesta é proposta uma cobertura plana invertida, em que o isolamento térmico é colocado sobre a impermeabilização de modo a protegê-la, evitando que esta esteja sujeita a amplitudes térmicas consideráveis que levem à sua fissuração e consequentes infiltrações. O isolamen-

to térmico a colocar, na mesma de 6 cm como para a solução anterior, está sujeito a condições especiais, pelo que para além da especificação do coeficiente de transmissão térmica (U) é necessário efetuar uma seleção exigencial que tenha em conta as condições especiais de contacto com água e de compressibilidade. Com efeito, as coberturas invertidas requerem a aplicação de um isolante térmico com células fechada e uma proteção pesada sobre o mesmo com as devidas juntas construtivas, por exemplo ladrilhos hidráulicos modulares, de forma a impedir que elas se desloquem e a protege-las contra a incidência direta da radiação solar.

Na Fig.91 é apresentada a solução de cobertura invertida proposta e na Fig.92 encontra-se uma foto do autor de uma cobertura de um bloco de aulas da mesma escola do Caso de Estudo em que existiu já uma intervenção na cobertura que seguiu este procedimento, mas que apresenta apenas 3 cm de poliestireno expandido extrudado (XPS), inferior ao exigido atualmente devido a estar de acordo com regulamentação anterior.

Homogenous layers		outside					inside	
Thermal resistance: 2,596 m ² K/W (without R _{si} , R _{se})		1	2	3	4	5		
Heat transfer coefficient (U-value): 0,37 W/m ² K								
Thickness: 0,41 m		0,03	0,06	0,1	0,20	0		
		Thickness [m]						

Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ. [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Ladrilho hidráulico simples - Concrete Screed, bottom layer	2100	1000	1,5	0,03	
2	Extruded Polystyrene Insulation	28,6	1470	0,025	0,06	
3	Camada de forma/regularização - Concrete	2000	1000	1,65	0,1	
4	Laje maciça de betão armado - Concrete	2300	1000	2	0,2	
5	Reboco de argamassa - Cement Plaster (stucco, A-value: 0.51 kg/m ² h0.5)	2000	1000	1,3	0,02	

Fig.91 – Caraterização construtiva da cobertura invertida reabilitada sobre o corredor sala de aula [34]



Fig.92 – Vista geral da cobertura intervencionada da sala de aula e respetivo corredor (à esquerda), e pormenor da impermeabilização, isolamento térmico e respetiva proteção da cobertura invertida (à direita)

Em relação às paredes exteriores, estas são constituídas por panos simples de alvenaria com um coeficiente de transmissão térmica (U) muito elevado, sendo recomendado o seu reforço térmico. Por razões arquitetónicas relacionadas com as faces de tijolo maciço à vista característico desta tipologia de escolas (Fig.16) é proposto o isolamento pelo interior, sendo necessário prever uma solução de proteção do isolamento térmico a colocar. Esta proteção interior é normalmente concretizada ou pela colocação de um forro interior em placas de gesso cartonado ou pela execução de uma contra-fachada, normalmente em alvenaria.

É preciso ter em conta que a execução de um novo pano de alvenaria interior (em conjunto com a colocação do isolamento) retira 17 cm ao longo de todo o desenvolvimento da parede, que mesmo em salas de aula como a do Caso de Estudo que são maiores do que a média de outras escolas de outras tipologias, representa ainda um espaço considerável que é retirado à sala. Contudo, pensa-se que um pano de alvenaria interior seja a melhor solução a usar nas escolas por ser mais robusta em relação ao gesso cartonado e oferecer maior resistência a eventual vandalismo.

A proposta de reabilitação da parede exterior passa então pela colocação de um forro contínuo de 4 cm de poliestireno expandido extrudido (XPS), ou outro material isolante com espessura que permita cumprir os requisitos regulamentares, e execução um pano de alvenaria interior com 11 cm rebocado, sendo boa prática prever uma caixa de ar de com cerca de 2 cm entre o isolamento em contacto com o pano interior e o pano exterior de alvenaria através de espaçadores, de forma a permitir a drenagem da parede e prevenir eventuais infiltrações, tal como o apresentado na Fig.93. Importante referir, que dado que se trata de uma solução de reabilitação, em que o isolamento não é colocado diretamente contra um pano de alvenaria, e a colocação do isolamento afastado de 2 cm pode ser difícil de concretizar na prática, no modelo simulou-se a situação mais conservadora em que não existia caixa de ar, o que levou a um $U = 0,49 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ligeiramente superior ao apresentado na Fig.93.

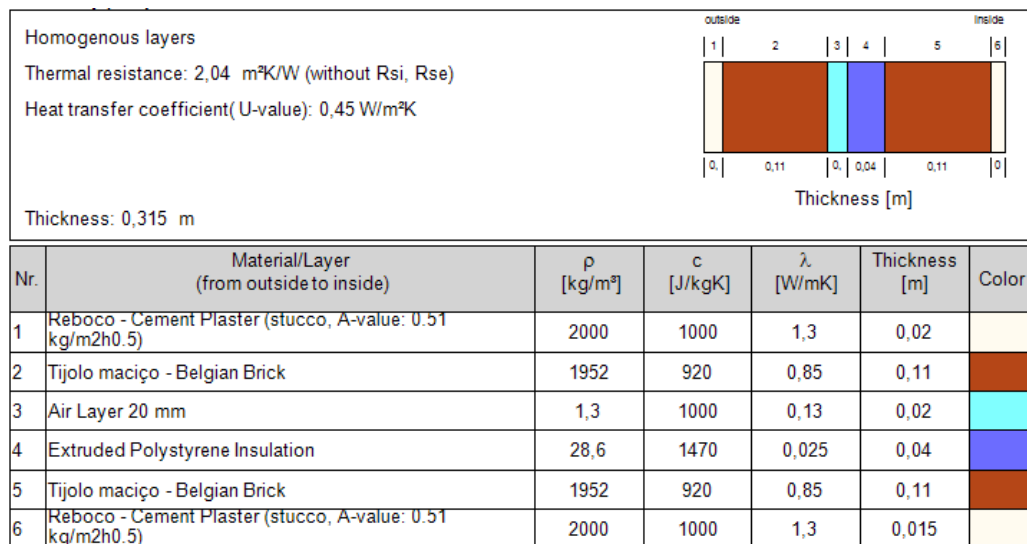


Fig.93 – Caracterização construtiva da parede exterior reabilitada, com aplicação de uma contra fachada [34]

Em relação aos envidraçados existentes propõe-se a sua substituição por envidraçado mais eficientes, nomeadamente envidraçados metálicos com corte térmico e vidro duplo de baixa emissividade de modo a permitir um melhor desempenho térmico e cumprir o regulamento atual (requisitos do U_w). Assim, na Fig.94 inclui-se uma solução de envidraçados com vidro duplo, existente no bloco administrativo da escola em estudo.

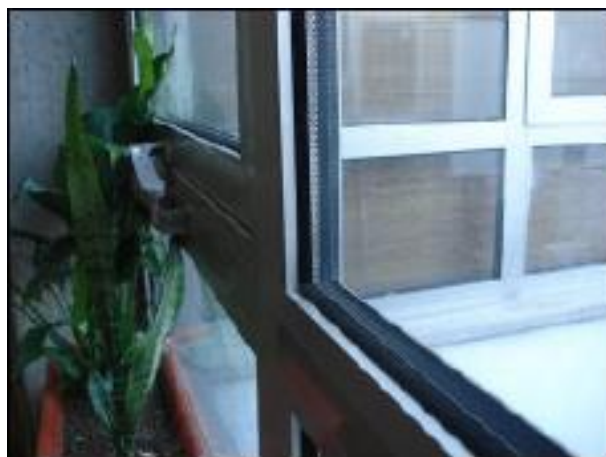


Fig.94 – Exemplo de solução de envidraçados com vidro duplo existente na escola do Caso de Estudo

Tal como evidenciado na Fig.94, devem ser colocados alguns envidraçados que prevejam caixilharia com folhas móveis e/ou mecanismos de abertura que possibilitem a ventilação interior da sala pela abertura das suas folhas, sobretudo para prevenção do sobreaquecimento na estação de arrefecimento através por exemplo do recurso à ventilação noturna. Além disso, devem ser adotadas aberturas superiores de admissão de ar de modo a permitir uma admissão natural de ar novo na estação de aquecimento (com extração controlada por sistema mecânico), mas evitadas correntes de ar indesejáveis que perturbem os seus ocupantes. De notar que as aberturas a adotar devem ter em atenção diversas exigências, em especial requisitos acústicos e de estanquidade à água.

Quanto às proteções solares, estas deverão ser constituídas por uma proteção exterior móvel de lâminas de cor clara do tipo *Brise Soleil* a aplicar em todos os vãos, quer nos que não tem atualmente qualquer proteção solar, quer nos que tem as proteções interiores danificadas a retirar. Exemplos de proteções solares ajustáveis de acordo com o que o utilizador pretende estão representadas na Fig.95.



Fig.95 – Exemplos de soluções de proteções solares pelo exterior

Para as proteções solares é recomendável a adoção de estratégias de utilização diferenciadas para a estação de aquecimento e arrefecimento. Com efeito, apesar de as proteções solares da sala de aula propriamente dita necessitarem de estar, para cada orientação, sempre ativas durante todo o período de aulas em que há radiação solar direta incidente nas mesas de trabalho dos alunos e de forma a evitar o desconforto luminoso, estando abertas quando tal não se verifique; em relação às proteções do corredor da sala (atualmente não possuem proteção solar), estas deverão permitir o total manuseamento por

parte do utilizador, para no inverno estarem sempre abertos de modo a permitir acumular “ganhos solares gratuitos” e baixar o consumo energético, e no “verão” de forma a prevenir o sobreaquecimento, deverão estar ativos desde o início do dia de modo a prevenir a entrada de radiação solar que juntamente com os significativos ganhos internos, resultantes da ocupação e utilização de equipamentos diária, poderão levar ao longo do dia a temperaturas elevadas causadoras de desconforto térmico para os seus ocupantes.

As simulações realizadas relativamente a algumas estratégias de ventilação possíveis permitiram verificar que existe uma relação linear direta entre o aumento do caudal de ventilação e o consumo energético para aquecimento, bem como que é recomendável a utilização dos sistemas de ventilação com dispositivos mecânicos apenas durante o período de aulas de modo a poupar energia para o funcionamento dos ventiladores e para aquecimento. Face à importância em termos de consumo energético que os caudais de ar novo regulamentares previstos e consequentes concentrações de CO₂ máximas tem no desempenho global dos edifícios escolares, e à variabilidade de valores entre regulamentos portugueses ao longo do tempo e europeus aconselha-se a realização de um estudo aprofundado sobre as reais necessidades de ventilação das salas de aula face à diminuição do número de alunos e tamanho das turmas prevista nas próximas décadas, para serem garantidas condições de saúde e aprendizagem adequadas de acordo com as possibilidades económicas atuais do país.

Alguns da bibliografia mais relevante neste âmbito e mais atual ([2] e [10]) refere a importância de uma intervenção focada na melhoria do desempenho da envolvente do edifício associada a uma ventilação predominantemente natural, que embora levando a maiores flutuações das condições ambientais interiores apresentam custos de utilização muito inferiores face à utilização de sistemas integralmente mecânicos [10]. Assim, na reabilitação do Caso de Estudo apresentado em [2], e cujo sistema de ventilação será recomendado para a reabilitação das escolas do tipo Brandão com algumas adaptações, foi utilizado um sistema de ventilação misto com admissão natural e extração auxiliada por ventiladores mecânicos de velocidade variável (escalões de funcionamento) para cada sala, ajustáveis conforme a concentração dos poluentes medida em cada momento. Este sistema permitiu combinar as propriedades dos sistemas de ventilação natural e mecânico, permitindo minimizar o consumo energético de aquecimento e utilização e superar as limitações dos sistemas de ventilação natural garantindo uma boa QAI.

Conforme se verificou no capítulo anterior, a otimização da envolvente exterior em conjunto com os ganhos internos e solares registados não é suficiente para se atingir o conforto térmico de 20°C proposto pelo regulamento para a estação de aquecimento durante todos os períodos de ocupação, sendo por isso necessário aquecer as salas com o recurso a sistemas de aquecimento adequados a instalar. Em relação aos sistemas de arrefecimento, e dado o clima do Porto ser um clima relativamente ameno, não foram previstos sistemas de arrefecimento devido à ventilação transversal provocada pela abertura de janelas em fachadas opostas durante a estação de arrefecimento (estando os sistemas de ventilação desligados), em períodos menos quentes e sobretudo noturnos, permite um arrefecimento que garante que nos períodos de aulas em que a temperatura exterior é mais elevada se mantenham condições de conforto interior, prevenindo-se na maior parte do tempo o sobreaquecimento.

Após a apresentação da estratégia e recomendações de reabilitação propostas que otimizam a envolvente, e admitindo uma ventilação de 400 m³/h durante o período de aulas conforme estabelecido em 3.5.2, considera-se importante agora apresentar os custos da energia. Estes são analisados para aquecimento na sala inicial; na sala base, com isolamento do pavimento com 3 cm de isolamento térmico; e após a intervenção no pavimento, coberturas, paredes e vãos envidraçados, com a apresentação da consequente poupança económica total obtida.

De acordo com o estudo do pavimento sintetizado na Fig.38, com a matriz de sensibilidade da envolvente exterior obtida na Fig.89, e o estudo dos cenários de ventilação obtidos na Fig.86 obtém-se um consumo energético anual de 76,11 kWh/m² e 10,33 kWh/m² antes e após a intervenção em todos os elementos da envolvente, respetivamente. Atendendo a que a sala simulada tem 61,2 m² o consumo anual será de 4658 kWh e 632 kWh por sala para os dois casos referidos, devendo, no entanto, ser ressaltado que os valores obtidos podem variar mais ou menos até cerca de 10% devido à orientação das várias fachadas das várias salas de aulas dos blocos.

Por outro lado, tendo em conta que o custo atual da energia ronda os 0,20 €/kWh, os custos anuais de aquecimento de uma sala tipo antes e após intervenção rondam os 932 € e 126 € respetivamente. A simulação da sala tipo na orientação poente/nascente, atendendo à pouca variabilidade dos consumos energéticos entre orientações obtida em 3.4.6.2, permite extrapolar a energia necessária para o aquecimento de um bloco de aulas e, de uma forma mais abrangente, de uma escola Brandão consoante o número de blocos de aulas que possui. Através da planta tipo de um bloco de aulas, já apresentada na Fig.17, verifica-se que um bloco de aulas tipo tem 7 salas, pelo que se apresentam na Tabela 37 os custos anuais de aquecimento de uma escola Brandão para o clima do Porto ou semelhantes consoante o número de blocos, para a situação antes e após intervenção, e a poupança anual obtida com a intervenção.

Tabela 37 – Custos anuais de aquecimento (€) de escolas Brandão para o clima do Porto ou semelhantes consoante o número de blocos de aulas, antes e após a intervenção de reabilitação, e a poupança anual obtida

	Custos para a solução inicial [€]	Custos para a solução base [€]*	Custos para a solução otimizada [€]	Poupança total conseguida [€]
1 Sala (61,2 m ²)	932	720	126	806
1 Bloco de aulas (7 salas)	6 521	5 038	885	5 636
2 Blocos de aulas (14 salas)	13 042	10 076	1 770	11 272
3 Blocos de aulas (21 salas)	19 562	15 114	2 656	16 906
4 Blocos de aulas (28 salas)	26 083	20 152	3 541	22 542
5 Blocos de aulas (35 salas)	32 604	25 190	4 426	28 178
6 Blocos de aulas (42 salas)	39 125	30 228	5 311	33 814
7 Blocos de aulas (49 salas)	45 645	35 266	6 196	39 449

* Isolamento prévio de 3 cm do pavimento ($\lambda = 0,025 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$) [34]

De acordo com a Tabela 37 para o Caso de Estudo, com 4 blocos de aulas, passa-se de um custo anual de aquecimento de cerca de 26 000 € para cerca de 3 500 €, o que representa uma poupança estimada de 22 500 € anuais, pelo que as ações de melhoria energética demonstraram elevados benefícios financeiros.

Por último, é ainda importante referir que aquando da visita à escola em estudo constatou-se que para a obtenção de melhores condições, principalmente acústicas e de privacidade das aulas, será necessário a criação de uma separação física entre o corredor da sala e a sala de aula propriamente dita, pois apesar de existirem portas entre ambas as salas anexas poderá sempre ser necessário alguém sair/entrar numa sala no decorrer de uma aula, tendo que desde a entrada no bloco de aulas até à sua sala passar pelo corredor de todas as outras, o que não é agradável para o normal decorrer de uma aula (Fig.96). Esta separação estará pontualmente aberta aquando do decorrer de aulas práticas de Educação Visual/Tecnológica por forma a permitir o uso do lavatório existente no corredor ou dos anexos. Por outro lado, durante todo o restante período ela estará fechada e, tendo em conta o tipo de isolamento que a separação faz do corredor (se impede ou não a circulação de ar), poderá ser necessário pensar nas consequências práticas e adaptar o estudo desta Dissertação, visto que devido à sala de aulas ter menor área será necessária menor energia para aquecimento contudo, dado o menor volume, a concentração de poluentes será maior obrigando a caudais de ventilação mais elevados.



Fig.96 – Corredor de circulação da sala em estudo, onde é visível a ligação física entre este e a sala de aula, bem como a necessidade de atravessar outras salas para se chegar à entrada

4.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram realizadas recomendações para a reabilitação térmica da envolvente de edifícios escolares do tipo Brandão de zonas com clima semelhante ao do Porto, com base no estudo numérico desenvolvido no capítulo anterior, tendo-se concluído em síntese que:

- As estratégias a seguir nos trabalhos de reabilitação de um edifício escolar poderão passar pela reabilitação funcional, ou simplesmente pela reabilitação construtiva. Para edifícios do tipo Brandão é recomendável uma reabilitação funcional abrangente e não apenas construtiva;
- Para os pavimentos é recomendada a adoção de 3 cm de isolamento térmico (XPS) sob o massame de suporte do revestimento de piso;

- Para ambas as coberturas, cobertura ligeiramente inclinada e cobertura plana é proposto a espessura de isolamento mínimo regulamentar, neste caso de 6 cm de XPS ($\lambda=0,025 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$), sobre a laje. No caso da cobertura ligeiramente inclinada devem ser substituídos os painéis de fibrocimento por metálicos e deve ser garantido que o desvão é fortemente ventilado. Para o segundo caso prevê-se uma cobertura invertida com isolamento sobre a impermeabilização, sobre os quais se deve colocar uma solução pesada de ladrilhos hidráulicos para sua proteção;
- Para as paredes exteriores é proposta uma solução de isolamento pelo interior mínima regulamentar de 4 cm de XPS, associada a uma contra-fachada em alvenaria de 11 cm rebocada e caixa de ar de 2 cm entre o isolamento e pano exterior;
- Em relação aos envidraçados, os existentes devem ser substituídos por novos envidraçados metálicos com corte térmico e vidro duplo de baixa emissividade regulamentares, com aberturas superiores de admissão de ar e folhas móveis para permitir a ventilação no “verão”;
- Quanto às proteções solares, deverão ser substituídas por uma proteção exterior móvel de lâminas de cor clara do tipo *Brise Soleil* a aplicar em todos os vãos. É recomendável a adoção de estratégias de utilização diferenciadas para a estação de aquecimento de modo a diminuir o consumo energético e arrefecimento para prevenir o sobreaquecimento;
- Quanto aos sistemas, propõe-se um sistema de ventilação misto de velocidade variável para cada sala, ajustáveis conforme a concentração de poluentes; e um sistema de aquecimento adequado. Não é proposto um sistema de arrefecimento, dado tratar-se de um clima ameno, recomendando-se boa ventilação transversal na prevenção do sobreaquecimento;
- Para o Caso de Estudo, com 4 blocos de aulas, passa-se de um custo anual de aquecimento de cerca de 26 000 € para cerca de 3 500 €, o que representa uma poupança estimada de 22 500 € anuais, pelo que as ações de melhoria energética demonstraram elevados benefícios financeiros;
- É recomendável a criação de uma separação física entre o corredor e a sala de aulas.

5

CONCLUSÕES

5.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

O objetivo principal desta Dissertação era o da obtenção de uma solução técnico-energética adequada para a reabilitação da envolvente exterior dos edifícios escolares do tipo Brandão, garantindo conforto e eficiência energética, e para climas semelhantes ao da cidade do Porto. Para a concretização do objetivo principal foram estabelecidos objetivos intermédios relacionados com a obtenção de informação para uma melhor compreensão da realidade dos edifícios escolares e do seu potencial mercado de reabilitação futuro; analisados alguns conceitos principais da Física das Construções relacionados com o conforto e eficiência energética, fundamentais para o desenvolvimento e interpretação de um estudo numérico higrotérmico; utilizado um software de cálculo do comportamento higrotérmico global em regime dinâmico avançado (*WUFI PLUS*) para a realização de um estudo de sensibilidade; e por fim a concretização das soluções de reabilitação obtidas através de recomendações de reabilitação associados a princípios da Tecnologia das Construções. As conclusões principais obtidas no decurso deste trabalho são as seguintes:

- Apesar de se estimar que durante os próximos anos haja uma diminuição do número de alunos em todo o país e para todos os ciclos de estudo, e consequentemente que muitas escolas possam vir a encerrar ou a ser reestruturadas até 2022, será imprescindível reabilitar nos próximos anos um número muito elevado de escolas que se mantenham em serviço;
- Existem atualmente incentivos à reabilitação dos edifícios escolares, materializados pelo financiamento através de fundos europeus e provenientes do Orçamento do Estado para a Educação, em particular o investimento de 200 milhões de euros no âmbito do programa PORTUGAL 2020 para a reabilitação e modernização de 200 escolas por todo o país;
- As principais tipologias de edifícios do parque escolar a reabilitar foram construídas após 1969 e são sobretudo dos tipos Brandão, Blocos 3x3 e Monobloco, estando grande parte delas com um elevado estado de degradação por falta de cuidados de manutenção;
- A grande variabilidade nos custos energéticos existentes nos variados edifícios escolares indica que apesar de os consumos energéticos poderem ser considerados baixos e dependentes do tipo de gestão de cada escola, a eficiência energética pode ser aumentada, sendo a reabilitação uma oportunidade estratégica para a sua efetiva concretização, reduzindo perdas e utilizando soluções economicamente sustentáveis;
- A especificidade dos edifícios escolares e suas condições de utilização exige cuidados especiais relacionados com o conforto térmico e QAI. Para um desempenho e condições de saúde adequadas dos seus ocupantes a temperatura interior deverá estar compreendida entre 20°C e 25°C e relativamente às condições de ventilação deverão ser considerados caudais de ar novo adequados para evitar uma concentração excessiva de poluentes;

- Os edifícios escolares a reabilitar não se encontram adaptados às diversas condições climáticas do país, pelo que para manter uma temperatura de conforto adequada apresentam baixa eficiência energética. Nos projetos de reabilitação a realizar dever-se-á corrigir os problemas do projeto tipo inicial, através da conceção de uma envolvente e recurso a sistemas eficientes e adaptados à condição climática em que a escola se insere;
- A reabilitação dos edifícios escolares é imprescindível e deve ser encarada como um processo de compatibilização de várias condicionantes relacionadas com a eficiência energética, o conforto térmico, a qualidade do ar interior (QAI), os custos iniciais, de exploração e manutenção das soluções adotadas e a respetiva durabilidade. Além disso será uma oportunidade excepcional para melhorar as condições de utilização e garantir uma maior sustentabilidade dos edifícios reabilitados;
- Para a quantificação do desempenho higrotérmico das escolas tipo Brandão para o clima do Porto e realização de um estudo de sensibilidade da envolvente exterior foi simulado o comportamento de um modelo de sala de aula tipo de um bloco de aulas que constituiu o Caso de Estudo. Para o efeito recolheram-se as várias potencialidades de resultados que o programa oferece; definiram-se os dados climáticos exteriores necessários; estabeleceram-se as condições de utilização e os princípios de simulação que regem o clima interior; e abordou-se as propriedades higrotérmicas dos materiais necessários e a caracterização construtiva dos elementos da envolvente;
- Devem ser tratadas vários elementos da envolvente simultaneamente, caso contrário as melhorias serão mais baixas devido aos elementos não intervencionados piorarem ligeiramente o seu desempenho. Este facto realça a importância da simulação em regime dinâmico em contraponto com uma “análise estática” ou baseada exclusivamente no comportamento previsto na regulamentação;
- A melhoria dos elementos da envolvente contribuirá para um aumento das condições de conforto interior em regime de flutuação livre na estação de aquecimento (maioritária no uso dos estabelecimentos escolares), contudo os valores de conforto obtidos não são satisfatórios e o aquecimento será inevitável para uma temperatura de conforto regulamentar de 20°C;
- Em relação ao sobreaquecimento verifica-se que através da diminuição do coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente, para obtenção de um melhor conforto e poupança energética na estação de aquecimento, poderá piorar-se ligeiramente o comportamento de “verão”, não sendo este agravamento muito significativo face à pequena quantidade de ocupação na estação de arrefecimento (por exemplo, não existência de ocupação nas férias do verão). Constata-se também, através da análise mensal, que apesar de em climas amenos poder ser ligeiramente prejudicial por dificultar a libertação do calor produzido pelos elevados ganhos internos, para climas quentes este maior isolamento contribuirá para um melhor comportamento de “verão”, visto que na estação de arrefecimento impede a entrada de calor exterior e o consequente aumento de temperatura;
- Através da análise dos consumos energéticos de aquecimento constata-se que para um clima de inverno ameno (Porto, zona climática I1), maior isolamento implicará, em geral, maiores custos e não trará benefícios acrescidos. Assim, apesar de isolar ser fundamental, devemos apenas isolar o justo necessário, sempre atendendo à nossa realidade económica e climática;
- Apesar de os valores regulamentares para os coeficientes de transmissão térmica de coberturas e envidraçados poderem ser considerados adequados numa intervenção neste âmbito, o mesmo não se pode dizer em relação aos valores pouco flexíveis em relação à reabilitação de elementos opacos verticais/paredes exteriores, uma vez que para o cumprimento regulamentar

serão necessários custos elevados de reabilitação e cuja melhoria energética pode não tornar a intervenção rentável a curto/médio prazo;

- As proteções solares pelo exterior revelam melhorias muito significativas no conforto de “verão” nas várias orientações e o seu uso tem implicações muito importantes no consumo energético e comportamento de “verão”. Com efeito, é recomendado um cuidado na sua utilização para permitir que não haja desaproveitamento desnecessário de “ganhos solares gratuitos” na estação de aquecimento, e que por outro na estação de arrefecimento estes sejam maioritariamente impedidos de forma a prevenir o sobreaquecimento;
- A implementação das soluções de reabilitação exterior propostas, para as condições de utilização previstas neste estudo, permite obter poupanças energéticas de aquecimento relevantes de cerca de 65%. Tem-se a convicção que esta otimização, levando a menores gastos, será uma excelente razão para aquecer devidamente as salas e permitir condições de conforto adequadas, aproveitando-se corretamente os ganhos internos e os “ganhos solares gratuitos”;
- Para a estação de aquecimento, a cobertura é a que leva a poupanças energéticas mais significativas (sendo também o elemento construtivo que tem mais importância na envolvente exterior, em termos de área e perdas), seguido da melhoria dos vãos envidraçados e por fim das paredes exteriores (apesar de individualmente melhorarem muito o seu próprio desempenho a nível de perdas, a contribuição para a diminuição do consumo energético é baixa devido à sua menor importância na envolvente);
- De um modo geral, dado que é necessário as proteções solares na orientação Sul estarem quase sempre parcialmente ativadas para permitirem melhores condições de luminosidade interiores, a orientação sul/norte em relação a poente/nascente apresenta um consumo energético ligeiramente mais elevado devido aos menores “ganhos solares gratuitos” que recebe;
- Apesar de a ventilação ter muita influência no consumo energético em condições de conforto, é necessário garantir um caudal de ar novo adequado, de modo a garantir a QAI e assim boas condições de saúde e aprendizagem. Face à variação de valores de caudal de ar mínimo e de concentração máxima de poluentes entre diversa regulamentação, e como esta variável implica custos elevados, é recomendada a realização de estudos cuidados neste âmbito para se garantir as condições adequadas de QAI, tendo em conta as condições económicas atuais do país;
- Não é proposto um sistema de arrefecimento dado tratar-se de um clima ameno, recomendando-se boa ventilação transversal na estação de arrefecimento pela abertura das janelas, aproveitando as temperaturas exteriores mais amenas e o arrefecimento noturno na prevenção do sobreaquecimento. Através da análise dos caudais de ventilação concluiu-se também que em climas mais quentes, maior ventilação levará a um maior sobreaquecimento, devendo para esses casos ser previsto um sistema de arrefecimento;
- Foram propostas estratégias de reabilitação otimizadas para os vários elementos da envolvente, que envolvem a aplicação de isolamento mínimo regulamentar em XPS, quer nas coberturas, quer nas paredes exteriores. Nas coberturas o isolamento deverá ser sobre a esteira horizontal de um desvão fortemente ventilado ou em forma de cobertura invertida devidamente protegido. No caso das paredes exteriores o isolamento deverá ser interior, através da aplicação de uma contra-fachada e garantida uma caixa de ar de 2 cm. Devem ainda ser substituídos os envidraçados existentes por novos metálicos, com corte térmico e vidro duplo de baixa emissividade regulamentares com aberturas superiores de admissão de ar e as proteções solares exteriores previstas devem ser móveis de lâminas de cor clara a aplicar em todos os vãos;
- Quanto aos sistemas de ventilação, propõe-se um sistema de ventilação misto de velocidade variável para cada sala, ajustáveis conforme a concentração de poluentes.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dada a importância desta área da Engenharia Civil, nomeadamente as necessidades e os incentivos existentes à reabilitação dos edifícios escolares, pensa-se que a elaboração de estudos energéticos sobre a envolvente como o desenvolvido na presente Dissertação tem muita importância, a vários níveis, e devem ser aprofundados para outras condições e tipologia de edifícios, dado que cada otimização estudada representa que possam ser criadas condições para que muitas escolas representadas tenham uma melhoria da eficiência energética científica e tecnicamente fundamentada. Assim, neste âmbito sugerem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Para o mesmo modelo de escola, dada a impossibilidade de tempo para a realização de um estudo técnico-económico adequado no âmbito desta Dissertação, sugere-se que para as várias hipóteses de reabilitação economicamente/termicamente aceitáveis estabelecidas na matriz de sensibilidade da Fig.89 numa gama restrita de soluções, se concretizem as soluções-tipo estabelecidas que pretendem ser representativas, baseadas em documentos técnicos, nomeadamente o REH e o ITE 50, com soluções reais de mercado e se realize um estudo económico de viabilidade e do respetivo período de retorno das medidas de melhoria;
- Com base nos resultados apresentados de necessidades energéticas mensais seja dimensionado um sistema de aquecimento economicamente adequado face às necessidades de conforto;
- Embora o estudo da envolvente da sala de aula como um todo tenha sido fundamental e suficiente no caso da criação de uma separação física entre a sala e o corredor permeável ao ar, seria interessante analisar as consequências e alterações que implica uma separação que impeça bastante a circulação de ar e ofereça resistência térmica, tal como o caso de uma solução de parede divisória interior em alvenaria;
- Estender o estudo desenvolvido no âmbito das escolas Brandão a outros climas e regiões do país;
- E por fim, estender o estudo realizado e as 4 propostas anteriores aos vários tipos de escolas portuguesas representativas do parque escolar a reabilitar nomeadamente, as escolas de blocos 3x3 e monobloco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INE - INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA - *Projeções de população residente 2012-2060*. Destaque - informação à comunicação social, Março, 2014, INE, Lisboa.
- [2] CARDOSO, V.E.M. *Reabilitação de edifícios escolares - Caracterização do desempenho higro-térmico em serviço*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014
- [3] DGEEC - DIREÇÃO-GERAL DE ESTATÍSTICAS DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA - *Previsão do número de alunos em Portugal por regiões, 2013-2019*. Estudos - Previsão do Número de Alunos no Ensino Básico e Secundário, 2014, DGEEC, Lisboa.
- [4] DGEEC - DIREÇÃO-GERAL DE ESTATÍSTICAS DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA - *Previsão do número de alunos em Portugal e por regiões, 2015-2021*. Publicações - Previsão do Número de Alunos no Ensino Básico e Secundário, 2016, DGEEC, Lisboa.
- [5] DGEEC - DIREÇÃO-GERAL DE ESTATÍSTICAS DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA - *Estatísticas da Educação - Breve síntese de resultados*. Publicações - Dados Estatísticos, 2016, DGEEC, Lisboa.
- [6] DGEEC - DIREÇÃO-GERAL DE ESTATÍSTICAS DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA - *Educação em Números 2016*. Publicações - Dados Estatísticos, 2016, DGEEC, Lisboa.
- [7] <http://www.pordata.pt/Municipios/Estabelecimentos+nos+ensinos+pr%C3%A9+escolar++b%C3%A1sico+e+secund%C3%A1rio+p%C3%BAblico+por+n%C3%ADvel+de+ensino-214>. Acedido fevereiro 2017.
- [8] Freitas, V.P., Miranda A. M., Bento, R. *Escolas*. Caderno de Síntese Tecnológica - Reflexão sobre a estratégia de Reabilitação em Portugal, 2015, PTPC - PLATAFORMA TECNOLÓGICA PORTUGUESA DA CONSTRUÇÃO, Porto
- [9] TORRES, F.M.C. *Análise técnico-económica das soluções construtivas utilizadas na reabilitação de escolas*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012
- [10] ALMEIDA, R.M.S.F. *Avaliação do desempenho higrotérmico do parque escolar reabilitado*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011
- [11] <https://www.portugal2020.pt/Portal2020/o-que-e-o-portugal2020>. Acedido maio 2017
- [12] NORTE 2020. *Desenvolvimento das infra-estruturas de formação e ensino - AVISO Nº NORTE-73-2016-02*, 2016, NORTE 2020, Porto
- [13] <https://www.portugal2020.pt/Portal2020/portugal-2020-investe-milhoes-na-reabilitacao-e-modernizacao-de-200-escolas-publicas-2>. Acedido maio de 2017
- [14] <http://www.portugal.gov.pt/pt/ministerios/medu/noticias/20170424-medu-investimento-escolas.aspx>. Acedido maio de 2017
- [15] <http://www.jornaldenegocios.pt/economia/educacao/detalhe/obras-em-200-escolas-custam-tanto-como-14-da-parque-escolar>. Acedido maio de 2017

- [16] FARIA, D.J.A. *Caracterização do desempenho higratérmico em serviço de edifícios escolares reabilitados*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013
- [17] LUCAS, H.M.P. *Factores determinantes para a construção sustentável de escolas*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011
- [18] EDUCAÇÃO, M. Presidência do conselho de ministros e ministério da educação. *Diário da República*, I Série Decreto-Lei n.º 144/2008 de 28 de julho, Lisboa, 2008.
- [19] http://www.pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=2240&tabela=leis&so_miolo=. Acesso maio de 2017
- [20] CUSTÓDIO, M.G.G. *Eficiência Energética em Edifícios Escolares*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, IST – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2011
- [21] BORGSTEIN, E.H., LAMBERTS, R., HENSEN, J.L.M. *Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review*. *Energy and Buildings*, 15/setembro/2016, Pág. 734 - 755, Elsevier B. V.
- [22] LFC - LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES - *Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 Dr. Leonardo Coimbra Filho*. Relatório CMP/LFC-IC - 197.08.2009, 2009, Porto.
- [23] LFC - LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES - *Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 de Paranhos*. Relatório CMP/LFC-IC - 197.07.2009, 2009, Porto.
- [24] LFC - LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES - *Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 do Viso*. Relatório CMP/LFC-IC - 197.06.2009, 2009, Porto.
- [25] LFC - LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES - *Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 Pêro Vaz de Caminha*. Relatório CMP/LFC-IC - 197.04.2009, 2009, Porto.
- [26] LFC - LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES - *Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 Manoel de Oliveira*. Relatório CMP/LFCIC - 197.05.2009, 2009, Porto.
- [27] LFC - LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES - *Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 Irene Lisboa*. Relatório CMP/LFC-IC - 197.03.2008, 2008, Porto.
- [28] LFC - LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES - *Consultoria à Reabilitação de Escolas Básicas do 2.º e 3.º Ciclo. Escola EB 2,3 Nicolau Nasoni*. Relatório CMP/LFC-IC - 197.02.2008, 2008, Porto.
- [29] ALMEIDA, R. M. S. F., RAMOS, N. M. M., SIMÕES, M. L., FREITAS, V.P. *Energy and water consumption variability in school buildings: Review and application of clustering techniques*. *Journal Performance of Constructed Facilities*., 2014, pag. 1-04014165, ASCE

- [30] ALMEIDA, R. M. S. F., RAMOS, N. M. M., SIMÕES, M. L., FREITAS, V.P. *Variability of energy and water consumption of school buildings*. Proc., 2nd Central European Symp. on Building Physics, 2013, Vienna Univ. of Technology, Áustria
- [31] PAULA, P.R.F. *Avaliação do desempenho higrotérmico de casas de gesso no Brasil*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017
- [32] ALMEIDA, R. M. S. F., FREITAS, V. P. *Indoor environmental quality of classrooms in Southern European climate*. Energy and Buildings, 20/junho/2014, Pág. 127-140, Elsevier B. V.
- [33] REH - *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação - Parâmetros para o zonamento climático*. Diário da República, 2.ª série — N.º 234, Despacho n.º 15793 - F/2013, dezembro, Lisboa, 2013.
- [34] WUFI® PLUS V.3.0.3.0
- [35] <https://wufi.de/en/software/wufi-plus/>. Acedido maio de 2017
- [36] KRAWCZYK, D.A. *Theoretical and real effect of the school's thermal modernization - A case study*. Energy and Buildings, 11/junho/2014, Pág. 30-17, Elsevier B. V.
- [37] ANTRETTTER, F., FINK, M., PAZOLD, M., RADON, J., WINKLER, M. *WUFI® Plus 3.0 – Manual*, 2015, Fraunhofer IBP
- [38] <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Material> Acedido maio de 2017
- [39] SANTOS, C.A.P., MATIAS, L. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE 50*, 2006, LNEC, Lisboa, Portugal.
- [40] REH - *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação - Parâmetros térmicos*. Diário da República, 2.ª série — N.º 234, Despacho n.º 15793 - K/2013, dezembro, Lisboa, 2013.
- [41] REH - *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação - Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções*. Diário da República, 1.ª série — N.º 207, Portaria n.º 379-A/2015, outubro, Lisboa, 2015.
- [42] REH - *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação - Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções*. Diário da República, 1.ª série — N.º 232, Portaria n.º 349-B/2013, novembro, Lisboa, 2013.