

ANA MARGARIDA GONÇALVES TUNA
Mestre em Arquitetura

O POTENCIAL DA RENOVAÇÃO PROFUNDA
DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS EXISTENTES
PARA ALCANÇAR O OBJETIVO nZEB
CASO DE ESTUDO NO BAIRRO DAS PEDRALVAS

MESTRADO EM TECNOLOGIA DE FACHADAS

Universidade NOVA de Lisboa
julho, 2023

O POTENCIAL DA RENOVAÇÃO PROFUNDA DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS EXISTENTES PARA ALCANÇAR O OBJETIVO nZEB

CASO DE ESTUDO NO BAIRRO DAS PEDRALVAS

ANA MARGARIDA GONÇALVES TUNA

Mestre em Arquitetura

Orientador: Doutor Daniel Aelenei,
Professor Associado, FCT-NOVA

Júri:

Presidente: Doutora Ana Catarina Cruz Lopes,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Orientador: Doutor Daniel Aelenei,
Professor Associado, FCT-NOVA

MESTRADO EM TECNOLOGIA DE FACHADAS

Universidade NOVA de Lisboa

julho, 2023

O POTENCIAL DA RENOVAÇÃO PROFUNDA DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS EXISTENTES PARA ALCANÇAR O OBJETIVO nZEB

CASO DE ESTUDO NO BAIRRO DAS PEDRALVAS

Copyright © Ana Tuna, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVATHESIS Word [11].

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com importantes contributos e incentivos pelos quais estou manifestamente grata.

Ao Professor Daniel Aelenei, pela orientação, colaboração, apoio e disponibilidade no decurso do mestrado e durante a realização deste trabalho.

À minha família e aos meus amigos pelo encorajamento e amizade.

"Against the assault of laughter, nothing can stand." (Mark Twain)

RESUMO

Globalmente, os edifícios são um dos principais responsáveis pelo elevado consumo de energia. Na Europa, o parque edificado existente representa 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de CO₂, não estando aqui consideradas as emissões produzidas durante a construção, renovação e fim do ciclo de vida dos edifícios. A maioria destas emissões provêm de edifícios residenciais, que constituem 75% do parque imobiliário europeu e contribuem com 30% das emissões totais de energia da União Europeia. Uma parte significativa do parque edificado da Europa, cerca de um terço, tem mais de 50 anos e 40% dos edifícios foram construídos antes da década de 1960, quando os regulamentos de construção eram limitados ou inexistentes nomeadamente em matéria de regras específicas sobre o isolamento térmico da envolvente dos edifícios. Do ponto de vista das normas de construção atuais, 75% destes edifícios são ineficientes do ponto de vista do desempenho energético. Neste contexto, a solução para melhorar o desempenho energético no setor de construção passa por aumentar o ritmo das renovações profundas dos edifícios existentes, atualmente com uma taxa média de 0,2%, sendo vasto e promissor o potencial deste tipo de intervenção para alcançar poupanças significativas de energia. O presente estudo tem por objetivo apresentar um projeto de renovação energética da envolvente de um edifício/conjunto urbano localizado no Bairro Quinta das Pedralvas, em Lisboa, com vista à melhoria da eficiência energética destes blocos habitacionais construídos na década de 60 ao abrigo da Política de Alojamentos para Famílias Pobres - Decreto-Lei nº 34 486, de 6 de abril de 1945. O presente trabalho pretende, também, avaliar se as novas soluções construtivas apresentadas para a envolvente opaca (fachadas e cobertura) e envidraçada da fração em estudo têm potencial para a conversão deste edifício num edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB).

Palavras-chave: renovações profundas, descarbonização do parque edificado residencial existente, reforço térmico da envolvente, nZEB.

ABSTRACT

Globally, buildings are one of the main contributors to high energy consumption. In Europe, the existing building stock represents 40% of total energy consumption and 36% of CO₂ emissions, not including emissions from construction, renovation, and end-of-life cycle phases. Most of these emissions come from residential buildings, which make up 75% of the European real estate market and contribute 30% of the EU's total energy emissions. A significant portion of Europe's building stock, about one-third, is over 50 years old, and 40% of buildings were constructed before the 1960's when building regulations were limited or non-existent, especially regarding specific rules on thermal insulation of building envelopes. From the perspective of current building standards, 75% of these buildings are inefficient in terms of energy performance. In this context, the solution for improving energy performance in the construction sector is to increase the rate of deep renovation of existing buildings, which currently have an average rate of 0,2%. This type of intervention has vast and promising potential to achieve significant energy savings.

The objective of this study is to present a deep renovation project for the envelope of a building/urban complex located in Quinta das Pedralvas neighbourhood in Lisbon. This project aims to improve the energy efficiency of these housing blocks built in the 1960s under the Policy of Housing for Poor Families - Decree-Law no. 34,486 of April 6, 1945. The present study also aims to evaluate whether new constructive solutions applied to facades, roofs and windows have the potential to convert this building into a *nearly zero energy building* (nZEB).

Keywords: deep renovations, decarbonization of the existing residential building stock, thermal reinforcement of the envelope, nZEB.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVO	1
1.2 ÂMBITO E RELEVÂNCIA	3
1.3 METODOLOGIA	7
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. O IMPACTO DA RENOVAÇÃO PROFUNDA DE EDIFÍCIOS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO	10
2.1 REABILITAÇÃO VS. RENOVAÇÃO PROFUNDA EM EDIFÍCIOS EXISTENTES	10
2.1.1 O conceito de renovação profunda e o objetivo nZEB	11
2.1.2 As vantagens da renovação profunda e as suas principais barreiras.....	14
2.1.3 Medidas para a renovação profunda de edifícios	16
2.2 RENOVAÇÃO PROFUNDA DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS EXISTENTES	18
3. CASO DE ESTUDO	20
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO EXISTENTE.....	20
3.2 ZONAMENTO CLIMÁTICO	30
3.3 REQUISITOS LEGAIS A CUMPRIR	32
3.3.1 Envolvente Opaca	35
3.3.2 Envolvente Envidraçada.....	36
3.4 CÁLCULO DAS NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA	38
3.4.1 Necessidades Nominais de Energia do Edifício Existente	42
3.4.2 Projeto de Renovação Energética - Envolvente Opaca e Parâmetros Característicos	45
3.4.3 Projeto de Renovação Energética - Envolvente Envidraçada e Parâmetros Característicos	65
3.5 ABORDAGEM INTEGRADA PARA A RENOVAÇÃO PROFUNDA E CONCLUSÕES ..	81
4. CONCLUSÃO DO ESTUDO	87
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE SIGLAS

GEE - Gases com efeito de estufa
nZEB - nearly zero energy building
RNC 2050 - Roteiro para a neutralidade carbónica 2050
PNEC 2030 - Plano Nacional de Energia e Clima 2030
ELPRE - Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios de Portugal
RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
BPIE - Buildings Performance Institute Europe
ETICS - External Thermal Insulation Composite System
PRR - Plano de Recuperação e Resiliência
SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edifícios existentes em Portugal por época de construção, dados CENSOS 2021	4
Figura 2 - Localização do Edifício em estudo na cidade de Lisboa.....	21
Figura 3 - Vista área do Bairro das Pedralvas em Lisboa.....	21
Figura 4 - Vista aérea da fracção em estudo no Bairro da Pedralvas, Edifício n.º12, Rua 5	22
Figura 5 - Construção do Bairro das Pedralvas na década de 60 (Esquerda) e Edifício-Tipo do Bairro das Pedralvas na atualidade (Direita).....	22
Figura 6 - Perspetiva do Bairro das Pedralvas	22
Figura 7 - Peças desenhadas do Alçado Principal Sul (Esquerda) e Corte Transversal (Direita)	23
Figura 8 - Peças desenhadas do Alçado Posterior Norte (Esquerda) e Alçado Lateral Poente (Direita).....	23
Figura 9 - Perspetivas do Alçado Principal (Sul).....	24
Figura 10 - Perspetivas dos Alçados Lateral e Posterior, Poente (Esquerda) e Norte (Direita)	24
Figura 11 - Perspetiva geral da Rua 5 e da envolvente	25
Figura 12 - Planta do Piso 0.....	28
Figura 13 - Planta dos Pisos superiores e fração em estudo.....	28
Figura 14 - Termograma do Alçado Principal	29
Figura 15 - Termograma do Alçado Lateral.....	29
Figura 16 - Zonamento Climático de Portugal Continental, fonte: Portaria n.º 138-I/2021	31
Figura 17 - Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de U das Fachadas	51
Figura 18 - Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de U das Fachadas	51
Figura 19 - Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U da Cobertura.....	59
Figura 20 - Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U da Cobertura.....	59
Figura 21 - Coeficientes de transmissão térmica de vários tipos de vidro.....	65

Figura 22 – Radiação solar incidente sobre a envolvente envidraçada	66
Figura 23 – Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U dos envidraçados.....	69
Figura 24 – Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U dos envidraçados.....	69
Figura 25 – Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de gV	73
Figura 26 – Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de gV	73
Figura 27 – Cenário A: Fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar gT_{vc} , gV	79
Figura 28 – Alçado Principal Sul proposto (Esquerda), materiais e soluções propostas para a renovação (Direita).....	85
Figura 29 – Alçado Posterior Norte proposta (Esquerda) e Alçado Lateral Poente proposta (Direita).....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese das principais estratégias de renovação	17
Tabela 2 – Critérios para a determinação da zona climática de inverno	30
Tabela 3 – Critérios para a determinação da zona climática de verão.....	30
Tabela 4 – Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento.....	30
Tabela 5 – Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento	30
Tabela 6 – Requisitos dos edifícios de habitação novos. Despacho n.º 6476-E/202133	
Tabela 7 – Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação. Despacho n.º 6476-E/2021	34
Tabela 8 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente opaca dos edifícios de habitação – Portugal Continental, Umáx [W/(m².°C)], Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo I, ponto 1.2.....	36
Tabela 9 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente envidraçada, Uw,máx [W/(m².°C)], Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo I, ponto 2.2.....	36
Tabela 10 – Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares, gtot,máx, Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo I, ponto 2.2 alínea g) e h)	37
Tabela 11 – Valores mínimos da taxa de renovação horária nos edifícios de habitação, Rph _{mín} , segundo a Norma EN 16798 -1, Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo II, ponto 1.2.1 alínea a).....	38
Tabela 12 – Metodologia de cálculo das necessidades nominais de energia.....	40
Tabela 13 – Síntese dos requisitos máximos para a zona climática I1-V2, Portaria n.º 138-I/2021	41
Tabela 14 – Requisitos de conforto térmico e desempenho energético a verificar no estudo	41
Tabela 15 – Caracterização da Envolvente Exterior Opaca: Zona Corrente	42
Tabela 16 – Caracterização da Envolvente Exterior Opaca: Pontes Térmicas Planas	42
Tabela 17 – Caracterização da Envolvente Exterior Opaca: Cobertura Inclínada com desvão ventilado.....	43
Tabela 18 – Caracterização da Envolvente Interior Opaca	43
Tabela 19 – Caracterização da Envolvente Envidraçada	43
Tabela 20 – Síntese dos requisitos máximos para a zona climática I1-V2, Portaria n.º 138-I/2021 e parâmetros do Edifício Existente sem qualquer tipo de intervenção (ITE 50 - LNEC)	43
Tabela 21 – Verificação do conforto térmico e desempenho energético das soluções de origem do Edifício Existente.....	44
Tabela 22 – Metodologia para o cálculo dos indicadores de conforto e desempenho para a envolvente opaca vertical	45
Tabela 23 – Solução 0: Fachada Original	47
Tabela 24 – Solução 1: Sistema de Fachada Ventilada sobre Fachada Original.....	47
Tabela 25 – Solução 2: Sistema de Fachada ETICS sobre Fachada Original.....	47
Tabela 26 – Solução 3: Sistema de Fachada CLT sobre Fachada Original.....	47
Tabela 27 – Síntese das Soluções de Fachada /Zona Corrente a testar	48
Tabela 28 – Solução 0: Fachada Original	49

Tabela 29 – Solução 1: Sistema de Fachada Ventilado sobre Fachada Original	49
Tabela 30 – Solução 2: Sistema de Fachada ETICS sobre Fachada Original.....	49
Tabela 31 – Solução 3: Sistema de Fachada CLT sobre Fachada Original.....	49
Tabela 32 – Síntese das Soluções de Fachada/PTP a testar.....	50
Tabela 33 – Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t das Fachadas variando U	50
Tabela 34 – Metodologia para o cálculo dos indicadores de conforto e desempenho para a Cobertura.....	54
Tabela 35 – Solução 0: Cobertura Original	56
Tabela 36 – Solução 1: Aplicação de XPS sobre OSB sob a pendente na Cobertura Original	56
Tabela 37 – Solução 1: Aplicação de XPS sobre CLT sobre a laje de esteira da Cobertura Original	56
Tabela 38 – Solução 3: Combinação das Soluções 1 e 2 aplicada à pendente e laje da Cobertura Original	57
Tabela 39 – Síntese das Soluções de Cobertura a testar.....	58
Tabela 40 – Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t da Cobertura variando U e considerando que a cobertura não está em sombra.....	58
Tabela 41 – Cenários A e B: Verificação das condições de fronteira para as necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t considerando que 100% da Cobertura está exposta à radiação solar.....	60
Tabela 42 – Cenários A e B: Verificação das condições de fronteira para as necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t considerando que 50% da cobertura está em sombra	62
Tabela 43 – Cenários A e B: Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t da Cobertura variando U e considerando que a cobertura não está em sombra ou tem 50% da área total em sombra.....	62
Tabela 44 – Metodologia para o cálculo dos indicadores de conforto e desempenho para a envolvente envidraçada	66
Tabela 45 – Cenários A e B: Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t dos Envidraçados variando U_w	68
Tabela 46 – Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t dos Envidraçados variando gV	72
Tabela 47 – Valores correntes do fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar gT_{vc} , Despacho (extrato) n.º 15793-K/3013.....	78
Tabela 48 – Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t dos Envidraçados variando gT_{vc}	78
Tabela 49 – Síntese das soluções construtivas para as Envolventes Opaca e Envidraçada a testar	83
Tabela 50 – Verificação das condições de fronteira para as necessidades nominais de energia N_{ic}, N_{vc} e energia primária N_t para Cenários A e B considerando a combinação das soluções construtivas mais eficientes para as Envolventes Opaca e Envidraçada	84

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVO

No âmbito do Pacote Energia Limpa, a Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu, que altera a Diretiva 2010/31/UE sobre o desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética, apresenta o parque imobiliário como objeto de particular atenção face aos elevados consumos de energia e índices de emissão de gases com efeito de estufa (GEE) que totalizam cerca de 36% de todas as emissões de CO₂ na Europa. O artigo 2º-A da mesma Diretiva, determina a obrigação de cada Estado-Membro estabelecer uma estratégia de longo prazo para apoiar a renovação, até 2050, do respetivo parque nacional de edifícios com vista à sua transformação num parque imobiliário descarbonizado e de elevada eficiência energética através de renovações profundas e da sua conversão em edifícios com necessidades nulas ou quase nulas de energia, *Nearly Zero Energy Buildings (nZEB)* [1].

Dando cumprimento às Diretivas Europeias, Portugal assumiu o compromisso de atingir a neutralidade carbónica até 2050 com a aprovação, em julho de 2019, do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050) que estabelece uma trajetória de redução de emissões de GEE entre 45% e 55% até 2030, entre 65% e 75% até 2040 e entre 85% e 90% até 2050, face aos valores registados em 2005 [2]. Em articulação com o RNC 2050, com vista ao cumprimento dos objetivos da descarbonização e da transição energética procedeu-se à elaboração e aprovação, em julho de 2020, do Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030), que estabelece as metas e objetivos a atingir e concretiza as políticas e medidas a adotar até 2030. Para os edifícios, o PNEC 2030 estabelece linhas de atuação específicas com vista à redução da respetiva intensidade carbónica e à promoção da renovação energética do parque imobiliário com particular atenção para o objetivo da implementação do conceito de *nZEB* na construção dos edifícios novos e na transformação dos edifícios existentes [3].

Posteriormente, em outubro de 2020, a Comissão Europeia publica uma nova estratégia para impulsionar a renovação denominada “Impulsionar uma Vaga de Renovação na Europa para tornar os edifícios mais ecológicos, criar emprego e melhorar as condições de vida” [4].

Nesta comunicação é destacada a preocupação quanto à reduzida taxa de renovação anual realizada no parque imobiliário europeu. Os indicadores apresentam uma taxa de renovação energética anual de 1%, com apenas 0,2% dos edifícios a sofrer renovações profundas, sendo estas as que traduzem uma redução significativa do consumo de energia [4].

O ponto 3 da comunicação, "Realizar renovações mais rápidas e profundas para obter melhores edifícios", sublinha a necessidade de renovações rápidas e abrangentes para melhorar a eficiência energética e o conforto dos edifícios na Europa. O objetivo é acelerar o ritmo das renovações e aumentar o seu alcance, para que os edifícios tenham um melhor desempenho e proporcionem melhores condições de vida aos seus ocupantes [4].

Com vista à prossecução dos objetivos europeus e nacionais em alcançar a neutralidade carbónica, promover a eficiência energética dos edifícios existentes e a sua transformação em edifícios nZEB, o Governo português fez aprovar, em fevereiro de 2021, a Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios (ELPRE). Esta Estratégia, compaginada como RNC 2050 e PNEC 2030, visa alcançar uma poupança de energia primária de 11% até 2030 e de 34% até 2050, e reduzir o número de horas de desconforto na habitação em 26% até 2030, e em 56% até 2050.

De forma sucinta, as medidas previstas na ELPRE dividem-se em 7 eixos de atuação: Renovação do Edificado; Edifícios Inteligentes; Certificação Energética; Formação e Qualificação; Combate à Pobreza Energética; Informação e Consciencialização; Monitorização. No que diz respeito ao primeiro eixo, Renovação do Edificado, a ELPRE visa incentivar as ações para a renovação do edificado, mediante a criação de enquadramento financeiro adequado para o efeito, estimulando as renovações profundas no parque edificado existente de forma a reduzir significativamente o consumo de energia através da intervenção nas envolventes dos edifícios, a substituição dos sistemas obsoletos por sistemas eficientes, a promoção da utilização de energia de fontes renováveis, a adoção de soluções técnicas quando adequadas ao objetivo da renovação energética dos edifícios abrangidos [5].

Neste pressuposto, o presente estudo tem por objetivo apresentar um projeto de renovação profunda de um edifício de habitação multifamiliar construído na cidade de Lisboa na década de 1960 ao abrigo das Políticas de Habitação do Estado Novo, e equacionar o seu potencial de conversão num edifício com necessidades nulas de energia, *Nearly Zero Energy Building (nZEB)*, à luz da regulamentação em vigor [6].

1.2 ÂMBITO E RELEVÂNCIA

O maior crescimento e expansão da construção na Europa acontece no rescaldo da II Guerra Mundial até à Primeira Crise do Petróleo, entre 1950 e 1970, em que muitos países experimentaram um desenvolvimento económico e demográfico significativos, traduzindo-se numa maior procura de espaços para habitação, serviços e comércio [7]. Paralelamente, as políticas governamentais e os programas de financiamento de incentivo à construção de novos edifícios traduziram-se no crescimento significativo do sector da construção civil. Este período, de rápido desenvolvimento, teve um impacto duradouro e significativo no ambiente construído em muitas cidades da Europa e contribuiu para alguns dos desafios energéticos enfrentados atualmente.

Segundo a comunicação da União Europeia, de outubro de 2020, “Impulsionar uma Vaga de Renovação na Europa para tornar os edifícios mais ecológicos, criar emprego e melhorar as condições de vida” [4], o parque imobiliário europeu é caracterizado pela sua heterogenia, traduzindo a diversidade cultural e histórica do continente. Neste âmbito, é igualmente caracterizado por um tecido urbano antigo e de evolução lenta em que 85% do parque edificado, cerca de 220 milhões de edifícios, foram construídos antes de 2001 e entre 85% a 95% dos edifícios existentes na atualidade estarão de pé em 2050. Uma parte significativa do parque edificado da Europa, cerca de um terço, tem mais de 50 anos e 40% de dos edifícios foram construídos antes da década de 1960, quando os regulamentos de construção eram limitados ou inexistentes nomeadamente em matéria de regras específicas sobre o isolamento térmico da envolvente dos edifícios. Após 1970, começaram a surgir as primeiras normas relativas ao desempenho energético de edifícios o que configura um parque edificado construído até então sem quaisquer critérios de eficiência energética.

Do ponto de vista das normas de construção atuais, 75% destes edifícios são ineficientes do ponto de vista do desempenho energético [4, 7, 8].

Em Portugal, os primeiros requisitos e exigências de eficiência energética com vista à avaliação e salvaguarda das condições de conforto térmico aplicadas à construção de novos edifícios e a grandes remodelações foram introduzidas em 1990 através do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro, entretanto revogado.

Este Regulamento constituiu um marco decisivo na melhoria da qualidade da construção em Portugal, evidenciando a necessidade de introduzir um instrumento legal que garantisse melhores condições de salubridade, de higiene, conforto e qualidade na construção dos edifícios em contraste com o parque edificado construído até então [9].

Segundo os dados do Censos 2021, e conforme a Figura 1, apenas 3,1% do parque habitacional em Portugal foi construído na última década, traduzindo-se em 110 784 edifícios construídos entre 2011 e 2021. Segundo a mesma fonte, 53,9% do parque habitacional total português foi construído entre 1946 e 1990, sinalizando um parque imobiliário maioritariamente envelhecido e construído em período anterior ao Decreto-Lei n.º 40/90 [10].

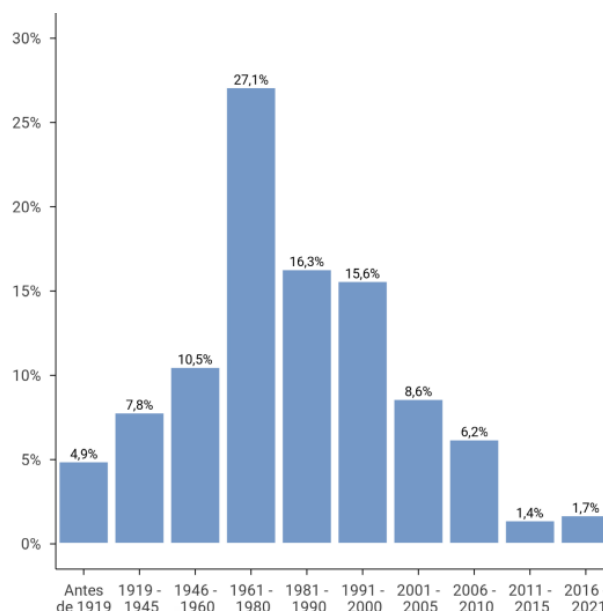


Figura 1 – Edifícios existentes em Portugal por época de construção, dados CENSOS 2021

Na cidade de Lisboa foram recenseados, em 2021, um total de 49 223 edifícios de habitação, dos quais:

- 8 322 construídos antes de 1919;
- 9 205 construídos entre 1919 e 1945;
- 12 146 construídos entre 1946 e 1960;
- 10 504 construídos entre 1961 e 1980;
- 2 285 construídos entre 1981 e 1990;
- 2 974 construídos entre 1991 e 2000;
- 2 966 construídos entre 2001 e 2010;
- 821 construídos entre 2011 e 2021;

O baixo desempenho da envolvente dos edifícios residenciais construídos em Lisboa entre 1946 e 1990, e que, segundo os dados dos Censos 2021, representam 46% do parque habitacional da cidade, apresentam um grande potencial em termos de implementação de soluções técnicas inovadoras para alcançar o objetivo *nZEB*.

Uma abordagem prática à construção sustentável passa por privilegiar a renovação desses edifícios como estratégia principal face a outras abordagens como a demolição e reconstrução, mantendo ou alterando o uso dominante. Muitos destes edifícios podem beneficiar significativamente com renovações profundas alavancando-se nos recentes desenvolvimentos no campo dos materiais e tecnologias que permitem melhorar o desempenho energético, a imagem dos edifícios e potenciar o rejuvenescimento do tecido urbano onde se inserem.

Não obstante as soluções técnicas e arquitetónicas, importa igualmente equacionar de que forma uma abordagem que privilegie a renovação profunda de edifícios existentes pode enquadrar-se nos padrões de conforto e segurança atualmente exigidos pelas Diretivas Comunitárias e Políticas Nacionais e constituir um caminho para a progressiva descarbonização do parque edificado existente e contribuir para a mitigação da pobreza energética com a transformação dos edifícios existentes em edifícios *nZEB*.

Neste enquadramento, o presente estudo tem por objetivo apresentar um projeto de renovação profunda de um edifício habitacional multifamiliar construído na década de 1960 na cidade de Lisboa com vista à melhoria das condições de conforto térmico e desempenho energético de uma das suas frações.

Este estudo propõe analisar e testar um conjunto de soluções construtivas para a envolvente do edifício, equacionando se as novas soluções preconizadas contribuem para:

- Melhorar dos níveis de desempenho energético do edifício e conforto dos seus ocupantes;
- Reduzir a pobreza energética;
- Constituir uma potencial abordagem com vista à progressiva descarbonização do parque edificado existente na cidade de Lisboa;

O presente trabalho pretende também avaliar se as novas soluções construtivas apresentadas para a envolvente opaca (fachadas e cobertura) e envidraçada da fração em estudo têm potencial para a conversão deste edifício num edifício com necessidades quase nulas de energia (*nZEB*).

A realização deste estudo afigura-se particularmente oportuna num período em que se perspetiva uma transformação progressiva e significativa do parque edificado existente assente nos modelos operativos estabelecidos pelas Diretivas Europeias e Políticas Nacionais já mencionadas.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia seguida para a realização do trabalho teve por base a aplicação da legislação em vigor, no âmbito da eficiência energética de edifícios e do sistema de certificação energética, a um edifício multifamiliar localizado na cidade de Lisboa, construído na década de 1960.

A legislação em vigor estabelece os requisitos aplicáveis tanto à conceção como à renovação de edifícios, tendo como objetivo assegurar e promover a melhoria do desempenho energético, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro, em complemento com: o Despacho n.º 6476-E/2021 de 1 de julho; a Portaria n.º 138-I/2021 de 1 de julho; o Despacho n.º 6476-H/2021 de 1 de julho e o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013 de 20 de agosto.

Considerando os parâmetros de conforto e requisitos energéticos consagrados na legislação, foram caracterizadas as soluções construtivas originais do edifício existente (envolvente opaca e envidraçada) e propostas novas soluções construtivas tendo em vista a renovação profunda do edifício em análise.

A formulação de novas soluções construtivas aplicadas às envolventes opaca e envidraçada – fachadas/cobertura e vãos envidraçados – visam promover, em um primeiro momento, uma estratégia de renovação profunda do edifício em estudo que traduza melhorias no conforto e desempenho energético face à solução original. Em um segundo momento, procede-se à verificação se as novas soluções construtivas adotadas permitem converter o edifício em estudo em um edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB) equiparando-o a um edifício de construção nova.

Para tal, foram definidos dois cenários de análise tendo por base a adoção das novas soluções construtivas:

- **CENÁRIO A** - Corresponde à melhoria da eficiência energética do edifício existente através da aplicação dos requisitos de desempenho do Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990;
- **CENÁRIO B** - Corresponde à melhoria da eficiência energética do edifício existente através da aplicação dos requisitos de desempenho do Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação novos e, consequentemente, a verificação se as novas soluções construtivas têm potencial para a conversão do edifício em estudo num edifício nZEB;

Para determinação do desempenho energético do edifício em estudo, foi analisada a fração no último piso habitado, correspondente ao 4º andar - situação, tipicamente, mais desfavorável.

Para a verificação regulamentar dos vários indicadores de desempenho e conforto adotou-se o modelo tradicional da abordagem prescritiva.

Para auxiliar a verificação regulamentar recorreu-se à folha de cálculo utilizada no âmbito da Unidade Curricular "Comportamento Higrotérmico e Acústico de Fachadas" do Mestrado em Tecnologia de Fachadas.

As várias soluções construtivas (originais e propostas) para as envolventes opaca e envidraçada foram caracterizadas, analisadas e comparadas ao nível do seu desempenho energético e impacto no balanço global de energia de uma fração em estudo através da quantificação das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) e dos limites a observar (N_{li} e N_v).

Por fim, de entre as várias soluções construtivas analisadas para as envolventes opaca e envidraçada, propõe-se uma intervenção global, no âmbito de uma renovação profunda.

A solução apresentada combina as melhores soluções parciais - fachadas, cobertura e envidraçados - capazes de converter um edifício construído em 1960, energeticamente ineficiente, num edifício com necessidades quase nulas de energia.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente documento é composto por 4 capítulos, subdivididos em subcapítulos, onde são descritas todas as fases do trabalho desenvolvido:

- O capítulo 1 corresponde à introdução do trabalho, onde são descritos os objetivos, o âmbito e a relevância do estudo;
- O capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica, onde é apresentado o estado do conhecimento no que diz respeito à renovação profunda de edifícios existentes e às soluções construtivas adotadas neste âmbito;
- O capítulo 3 é dedicado ao caso de estudo onde é apresentado um projeto de renovação profunda para a envolvente do edifício localizado no Bairro das Pedralvas e calculados os indicadores de conforto térmico e desempenho energético.
- O capítulo corresponde à conclusão do trabalho, sendo realizada uma reflexão sobre os resultados obtidos e sobre as principais limitações do estudo.

2. O IMPACTO DA RENOVAÇÃO PROFUNDA DE EDIFÍCIOS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO

Neste capítulo é apresentado o estado do conhecimento atual sobre as matérias em análise subdividido em três subcapítulos. No primeiro subcapítulo é enquadrada a temática das renovações profundas (*deep renovation*) no parque edificado existente, o que as distingue das renovações superficiais e de que forma se relacionam com o objetivo nZEB. No segundo subcapítulo são apresentadas quais as vantagens e barreiras desta abordagem. No terceiro subcapítulo são enumeradas algumas medidas de renovação profunda utilizadas na renovação profunda de edifícios.

2.1 REABILITAÇÃO VS. RENOVAÇÃO PROFUNDA EM EDIFÍCIOS EXISTENTES

Globalmente, os edifícios são um dos principais responsáveis pelo elevado consumo de energia. Na Europa, o parque edificado existente representa 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de CO₂, não estando aqui consideradas as emissões produzidas durante a construção, renovação e fim do ciclo de vida dos edifícios [4, 11].

A maioria destas emissões provêm de edifícios residenciais, que constituem 75% do parque imobiliário europeu e contribuem com 30% das emissões totais de energia da União Europeia. Cumulativamente o setor da construção consome 50% dos materiais utilizados na EU, sendo responsável por 30% dos resíduos produzidos [11, 12].

Apesar de na UE, o desempenho energético dos novos edifícios construídos ser elevado, os índices de demolição e construção nova são reduzidos [12, 14].

Neste cenário, estima-se que a construção nova venha a representar uma pequena parte do parque imobiliário construído até 2050 e que os edifícios com 50 anos ou mais continuarão a representar a maioria do parque edificado na Europa em cerca de 90% [4, 12, 13]. Neste contexto, a solução para melhorar o desempenho energético no setor de construção passa por aumentar o ritmo das renovações profundas dos edifícios existentes, atualmente com uma taxa média de 0,2%, sendo vasto e promissor o potencial deste tipo de intervenção para alcançar poupanças significativas de energia [12, 13, 14].

Dependendo do tipo de construção, vários edifícios existentes podem ser alvo de renovações profundas que visem o prolongamento da sua vida útil e, simultaneamente, o cumprimento dos parâmetros de conforto e desempenho energético exigido pela legislação em vigor em cada país. Promover a renovação dos edifícios residenciais como principal forma de intervenção no parque edificado existente e a consequente rentabilização dos recursos já investidos, contribui para a redução das emissões de GEE, minimiza os resíduos da construção, promove a melhoria do conforto térmico e qualidade do ar interior dos espaços habitados e contribui para a conservação da natureza e da biodiversidade.

2.1.1 O conceito de renovação profunda e o objetivo nZEB

O conceito de “renovação profunda” (*deep renovation*) corresponde a um termo chapéu amplamente referido na legislação europeia e nacional, em estudos científicos e na prática corrente. Contudo, segundo Lynn et al. [15] a definição de renovação profunda apresenta variações de largo espectro, nomeadamente no âmbito local, regional e internacional, podendo estas ser categorizadas em sentido amplo ou estrito. Na sua definição mais ampla, os autores caracterizam a renovação profunda como a combinação de várias medidas de renovação integradas numa única estratégia atuante sobre a envolvente dos edifícios e sistemas técnicos em oposição a intervenções independentes e pontuais. Na sua definição mais estrita, o conceito de renovação profunda relaciona-se, sobretudo, com a performance energética dos edifícios. A inconsistência e ambiguidade deste conceito e o seu impacto nas estratégias e projetos de renovação são corroborados pelo *Buildings Performance Institute Europe (BPIE)*. Na comunicação publicada em novembro de 2021: “*Deep Renovation: Shifting from exception to standard practice in EU Policy*”, o BPIE investiga e equaciona o conceito de renovação profunda com o objetivo de enquadrar uma definição mais clara, consistente e operativa para todos os Estados-Membros evitando a discricionariedade na definição e utilização do termo. Em termos gerais, o BPIE agrega na sua definição de renovação profunda as perspetivas, ampla e estrita, evidenciadas por Lynn et al.

Segundo o estudo, a renovação profunda é um processo multidimensional que visa maximizar a eficiência energética de um edifício, reduzir a sua pegada carbónica e melhorar a qualidade do ambiente interior em função da tipologia do edifício e da zona climática onde este se insere. A renovação profunda de edifícios inclui todos os elementos principais da construção com vista a alcançar a maior economia de energia possível, alavancando nas fontes de energia renováveis a colmatação das necessidades de energia remanescentes. Para atingir este objetivo, o processo de renovação profunda deve enquadrar-se em uma única intervenção ou, quando esta seja impossível, em uma intervenção faseada a fim de evitar impasses e bloqueios de operacionalização e concretização [14].

Apesar de não existir uma definição que vincule juridicamente o conceito de renovação profunda, a Recomendação (UE) 2019/786 da Comissão de 8 de maio de 2019, relativa à renovação dos edifícios, alude: *“As renovações profundas são aquelas que levam a uma renovação que reduz tanto o abastecimento como o consumo de energia final de um edifício numa percentagem significativa em comparação com os níveis registados antes da renovação, conduzindo assim a um alto desempenho energético. De acordo com o documento de trabalho dos serviços da Comissão que acompanha o Relatório da Comissão de 2013 sobre o apoio financeiro à eficiência energética dos edifícios, uma «renovação profunda» pode ser considerada uma renovação que leve a melhorias de eficiência significativas (normalmente, superiores a 60 %)”* [16].

O mesmo documento sublinha a necessidade de serem adotadas estratégias nacionais de renovação a longo prazo de edifícios existentes, facilitando a sua transformação rentável em edifícios com necessidades quase nulas de energia, nZEB, convertendo-os em edifícios descarbonizados e de elevada eficiência energética até 2050. O objetivo nZEB, foi introduzido em 2010, no âmbito a Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu, sendo referido no Artigo 2.º:

“Edifício com necessidades quase nulas de energia», um edifício com um desempenho energético muito elevado, determinado nos termos do anexo I. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades;”

O nível nZEB passou a ser obrigatório, a partir de 31 de dezembro de 2018 para todos os novos edifícios públicos e, a partir de 31 de dezembro de 2020, para todos os novos restantes edifícios construídos.

Em 2018, a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu é alterada pela Diretiva (UE) 2018/844 sendo acrescentado, entre outros pontos, o Artigo 2.º-A, que estende a aplicação do objetivo nZEB a todos os edifícios existentes, residenciais e não residenciais, públicos e privados, no âmbito de uma estratégia de renovação a longo prazo [1].

Com o objetivo de reduzir a ambiguidade do conceito de “renovação profunda” e estabelecer critérios mensuráveis, o relatório *“Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU”*, aponta para diferentes níveis de intervenção em edifícios existentes relacionando-as com a poupança anual de energia primária sem recurso a energias renováveis [2]:

- Abaixo do limite - $X < 3\%$ de poupança de energia;
- Renovações ligeiras - $3\% \leq X \leq 30\%$ de poupança de energia;
- Renovações médias - $30\% < x \leq 60\%$ de poupança de energia;
- Renovações profundas - $X > 60\%$ de poupança de energia;

Na prática, as renovações “abaixo do limiar”, “ligeiras” e “medianas” são prevalentes face às renovações “profundas” traduzindo-se em algumas intervenções independentes e pontuais que não traduzem poupanças de energia significativas - a taxa média anual europeia de renovações profundas é de 0,2%. Apesar de existirem variações nas taxas de renovações profundas entre os vários Estados-Membros, Chipre (0,4%), Espanha e Itália (0,3%) os únicos países com pontuação ligeiramente acima da média da EU, a conclusão é válida para todos os países [14, 18].

- Abaixo do limite - $< 1 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{ano})$ de poupança de energia primária;
- Renovações ligeiras - $19 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{ano})$ de poupança de energia primária;
- Renovações médias - $64 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{ano})$ de poupança de energia primária;
- Renovações profundas - $112 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{ano})$ de poupança de energia primária;

Segundo os mesmos autores, as renovações ligeiras e médias atingem, em média, 13% ou 41% de economia de energia primária em edifícios residenciais e 16% ou 44% em edifícios não residenciais – comparando o desempenho do edifício antes e depois da renovação. As renovações ligeiras e médias concentram-se, maioritariamente, na atualização de equipamentos e sistemas obsoletos, geralmente no final da vida útil ou quando existe falha irreparável, resultando em substituições por tecnologias idênticas, marginalmente melhores, mas limitada no que diz respeito aos ganhos energéticos reais e melhoria significativa no desempenho.

As renovações profundas atingem, em média, aproximadamente 66% de economia de energia primária em edifícios residenciais e não residenciais – comparando o desempenho do edifício antes e depois da renovação [18].

2.1.2 As vantagens da renovação profunda e as suas principais barreiras

Na comunicação publicada em novembro de 2021: *“Deep Renovation: Shifting from exception to standard practice in EU Policy”* [14], a renovação profunda de edifícios, apesar da falta de definição clara, é considerada uma abordagem multidimensional e multifatorial orientada para o objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2015.

Como principais benefícios associados à renovação profunda de edifícios existentes, vários autores referem [15, 17, 19]:

- a) Económicos: as renovações profundas podem ser um estímulo económico na medida em que podem alavancar, direta e indiretamente o emprego, a revitalização e valorização de áreas urbanas obsoletas, a redução dos encargos com energia.
- b) Inclusão Social: as renovações profundas podem fomentar o espírito de pertença ao bairro, à comunidade, tornar todos os cidadãos num dos principais focos do processo de transição energética através da melhoria das condições de habitabilidade, saúde e produtividade, reduzindo a pobreza energética.

- c) Sustentabilidade ambiental: as renovações profundas podem contribuir para mitigar os efeitos adversos da construção no habitat natural, através da reutilização de edifícios existentes, a melhoria do seu conforto térmico e desempenho energético e, consequentemente, garantir menos emissões de GEE, redução dos resíduos produzidos com a demolição de edifícios.
- d) Independência Energética: as renovações profundas podem contribuir para uma menor dependência energética de países exportadores de gás e petróleo.
- e) Oportunidade e Qualidade: as renovações profundas enquanto aspeto diferenciador dos edifícios, traduzindo-se numa maior atratividade para viver ou trabalhar se comparado com edifícios sem qualquer tipo de intervenção ou intervenções pontuais.
- f) Estímulo à Inovação: as renovações profundas podem fomentar a inovação tecnológica com o desenvolvimento de novos processos e técnicas, diretamente ou indiretamente, relacionados com a intervenção em edifícios.

Como principais barreiras às renovações profundas e à conversão de edifícios existentes em nZEB, D'Agostino et al [17] e D'Oca et al [20] referem:

- a) Barreiras Técnicas: A falta de soluções consistentes e standardizadas e/ou soluções integradas para atender a novos e diferentes padrões e requisitos de construção com vista à poupança energética; falta de mão de obra qualificada para a execução dos trabalhos; soluções técnicas ineficientes; longos processos burocráticos que desencorajam os proprietários; riscos de segurança/vulnerabilidade sísmica associada aos processos de renovação profunda (danos nos imóveis durante os processos de renovação profunda ou falta de informação quanto às condições reais de segurança do edifício); falta de conhecimento técnico e confiança dos utilizadores finais e proprietários quanto à economia real de energia conseguida através de renovações profundas;

- b) Barreiras Financeiras: aos elevados custos iniciais e à relutância dos proprietários em contrair empréstimos para promoverem a renovação energética dos fogos/edifícios; falta de confiança dos potenciais investidores; financiamento disponível insuficiente ou inconsistente; falta de financiamento atrativo para proprietários de baixo a médio rendimentos que, geralmente, não são elegíveis para empréstimos bancários convencionais; os instrumentos financeiros existentes são insuficientes e pouco atrativos.
- c) Barreiras Sociais: demora e complexidade nos processos de tomada de decisão, especialmente nos casos de imóveis com vários proprietários (condomínios); a falta de consenso, entendimento e apoio dos moradores que muitas vezes dificultam a aprovação das intervenções; perturbação durante as obras e/ou realocização de moradores durante a execução dos trabalhos; baixa conscientização sobre a eficiência energética e benefícios não energéticos da renovação; falta de diálogo entre as diferentes partes interessadas.

2.1.3 Medidas para a renovação profunda de edifícios

Conforme referido, as renovações profundas diferem das renovações superficiais por presumirem uma intervenção integrada na qual são combinadas várias estratégias e medidas, implementadas em simultâneo ou faseadas, com vista à melhoria do desempenho energético global dos edifícios. Vários autores [15, 21] referem três categorias de medidas e tecnologias de renovações profundas comumente adotadas, conforme apresentadas na tabela 1:

- Medidas de eficiência energética;
- Recurso a fontes de energia renovável;
- Comunidades de energia renovável – Sistemas de cogeração e aquecimento urbano;

Tabela 1 – Síntese das principais estratégias de renovação

MEDIDAS E ESTRATÉGIAS	EXEMPLOS
Eficiência energética	ENVOLVENTE Reforço do isolamento de fachadas, cobertura e pisos; Substituição de janelas e portas; Instalação de sistemas de proteção solar; Integração de soluções passivas: reforço da ventilação natural e do arrefecimento passivo, aquecimento solar passivo;
Fontes de energia renovável	SISTEMA TÉCNICOS Integração de sistemas renováveis de geração de calor e eletricidade: solar térmico, bombas de calor, fotovoltaico, etc.; Substituição de equipamentos ineficientes;
Comunidades de energia renovável	Ligação a sistemas de aquecimento urbano e/ou a outros sistemas de fornecimento de energia limpa;

Apesar das vantagens das renovações profundas, Perneti et al., [22] referem que, na prática, as intervenções realizadas nos edifícios são pontuais e implementadas sem uma coordenação geral e visão abrangente do desempenho do edifício como um todo, limitando-se a medidas singulares e individualizadas como o reforço do isolamento térmico de paredes e coberturas, a substituição de janelas, a instalação de sistemas técnicos mais eficientes ou a instalação de sistemas fotovoltaicos, que, no balanço global de energia revelam-se medidas insuficientes na melhoria do conforto térmico e desempenho energético dos edifícios existentes alvo de intervenção.

Ainda assim, em cidades fortemente densificadas e consolidadas, as renovações profundas podem constituir a única opção viável na medida em que preservam o funcionamento normal do tecido urbano sem incorrer em custos adicionais e, consequentes disrupções sociais, como a necessidade de realojar os ocupantes dos edifícios, por exemplo. Contudo, atendendo ao elevado número de potenciais intervenções deste tipo, as soluções construtivas e técnicas devem ser flexíveis e de fácil operacionalização [23].

2.2 RENOVAÇÃO PROFUNDA DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS EXISTENTES

A renovações de edifícios existentes com vista à sua conversão em edifícios *nZEB* são caracterizadas por um conjunto de ações que permitem melhorar o desempenho ambiental e energético dos edifícios para níveis superiores aos inicialmente preconizados.

As estratégias e ações que podem traduzir-se num melhor desempenho energético são divididas em três categorias: (1) intervenções na envolvente através da melhoria do isolamento térmico, opção por portas e janelas mais eficientes, controlo ou otimização dos ganhos solares e da iluminação natural, etc.; (2) intervenções nos sistemas técnicos através da adoção de sistemas/equipamentos de climatização eficientes, melhoria dos sistemas de iluminação artificial, substituição dos equipamentos domésticos obsoletos por outros mais eficientes, instalação de sistemas técnicos suportados por energias renováveis, etc.; (3) intervenções ao nível dos sistemas e dispositivos de gestão, controlo e monitorização da energia e dos consumos [24].

A envolvente de um edifício – fachadas, cobertura e envidraçados – corresponde à principal interface através da qual ocorrem as maiores transferências de calor entre o interior dos espaços habitados e o ambiente exterior.

No caso particular da envolvente opaca, fachadas e coberturas, o incremento do isolamento térmico promove um aumento global da resistência térmica do edifício e é considerada uma estratégia robusta e eficaz na redução do fluxo de calor estabelecido entre o interior e o exterior, sendo uma das primeiras estratégias consideradas com vista à melhoria do conforto térmico e desempenho energético de edifícios [25, 26].

Na prática corrente, e no que diz respeito às soluções técnicas utilizadas na renovação energética das fachadas de edifícios existentes, e que têm como princípio o incremento do isolamento térmico, as mais comuns são: ETICS (*External Thermal Insulation Systems*), fachadas ventiladas e sistemas prefabricados de fachadas.

Uma das mais-valias de intervir em fachadas de edifícios existentes recorrendo a estas soluções prende-se ao facto de estas poderem ser realizadas com os edifícios ocupados minimizando o impacto nas dinâmicas e vivências dos agregados que aí habitam.

Na sequência dos impactos social e económico provocados pela COVID-19, foi criado um mecanismo comunitário com vista à mitigação dos efeitos da crise pandémica que impulsionasse a convergência económica e a resiliência das economias da União Europeia.

O Conselho Europeu instituiu o *Next Generation EU*, que por sua vez estabeleceu o Mecanismo de Recuperação e Resiliência com o objetivo de garantir um crescimento sustentável a longo prazo, no qual se enquadra o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) português. O PRR é um instrumento estratégico da política pública do país que tem como objetivo implementar um conjunto de reformas e investimentos que permitirá ao país aumentar a competitividade da sua economia e reforçar a convergência com a Europa ao longo da próxima década. O PRR tem um período de execução até 2026 e permitirá a Portugal aceder a um volume de cerca de 50 mil milhões de euros (M€) no período de 2021 a 2029 [27].

As três dimensões estruturantes do PRR enquadram-se: a) Resiliência; b) Transição Climática; c) Transição Digital.

No âmbito da Transição Climática, relevante para este trabalho, a componente 13 “Eficiência Energética em Edifícios” prevê um investimento global de 610 M€, dos quais 300 M€ são destinados à eficiência energética de edifícios residenciais.

Neste campo, e da responsabilidade do Fundo Ambiental, *“pretende-se a promoção de investimentos numa significativa vaga de renovação energética de edifícios residenciais, o fomento da eficiência energética e de recursos, o reforço da produção de energia de fontes renováveis em regime de autoconsumo e o combate à pobreza energética”* [27].

A ação que compreende as *“melhorias passivas ao nível da envolvente, através por exemplo, do isolamento térmico das paredes, coberturas e dos envidraçados”* assume particular interesse no âmbito deste trabalho ao respaldar o caso de estudo analisado no Capítulo 3.

3. CASO DE ESTUDO

No presente capítulo é apresentado um projeto de renovação profunda de um edifício multifamiliar localizado no Bairro Quinta das Pedralvas, sito na Rua 5, n.º 12, construído na década de 1960 na cidade de Lisboa. O presente estudo tem como objetivo apresentar soluções técnicas e arquitetónicas aplicadas à envolvente do edifício com vista à melhoria da sua eficiência energética e à sua potencial conversão num edifício nZEB.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO EXISTENTE

O Bairro da Quinta da Pedralvas, onde se insere o edifício e fração em estudo, foi construído na década de 60 ao abrigo dos programas de habitação e realojamento promovidos pelo Estado Novo. A construção deste Bairro teve por base as Políticas de Alojamentos para Famílias Pobres – Decreto-Lei nº 34-486, de 6 de abril de 1945 [28] – com a missão de construir casas de rendas reduzidas. A sua construção teve início em 1961/62, englobando doze prédios de renda mínima tendo ficado concluído em 1967. Segundo o Plano Diretor Municipal em vigor, o edifício localiza-se em Área de Reabilitação Urbana com qualificação de Espaço Central e Habitacional (Traçado Urbano C Consolidado) (figuras 2, 4, 5 e 6).

O edifício multifamiliar escolhido como caso de estudo, corresponde ao edifício n.º 12, estando orientado segundo o eixo Norte-Sul (figuras 4, 7 e 11).

O edifício é composto por um total de cinco pisos acima do solo correspondendo a 10 frações, correspondendo a uma *“edificação de carácter económico em que, sem prejuízo das condições de habitabilidade e de durabilidade, se procurou diminuir o custo da construção, pelo melhor aproveitamento possível do espaço, pela redução das áreas de compartimentos (obedecendo, no entanto, aos limites regulamentares, com as tolerâncias admitidas pelo Ministério das Obras Públicas) e pelo emprego de acabamentos modestos, embora cuidados e duráveis, a fim de diminuir as despesas de conservação”* [29].



Figura 2 - Localização do Edifício em estudo na cidade de Lisboa

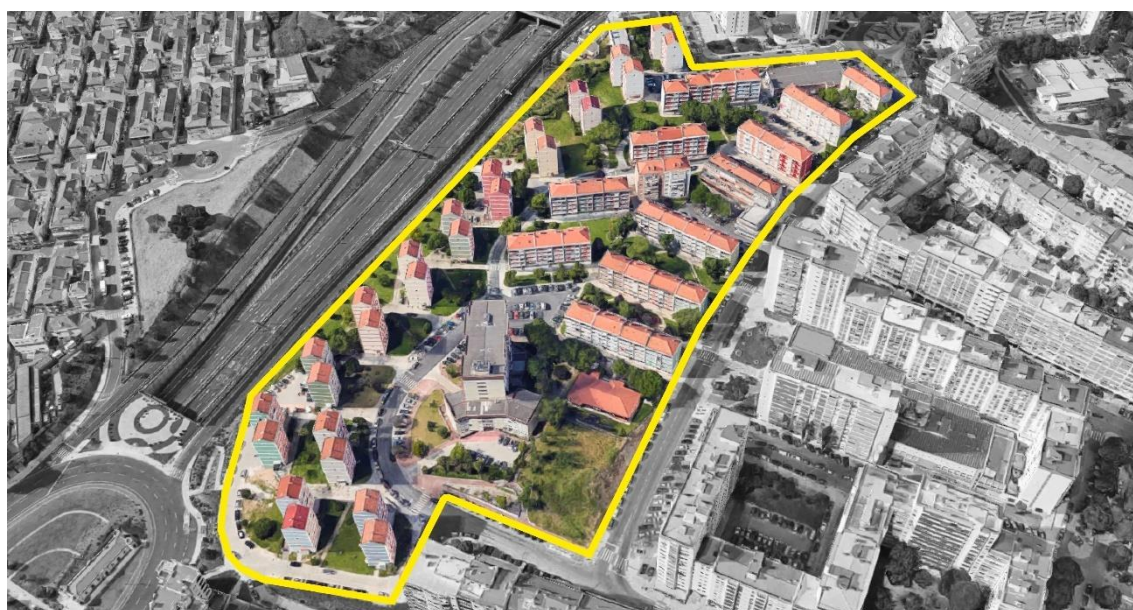


Figura 3 - Vista área do Bairro das Pedralvas em Lisboa

O edifício em estudo faz o remate da banda contínua do conjunto urbano onde se insere, com a fachada orientada a Poente totalmente desimpedida. O edifício apresenta uma implantação retangular com 13,0 x 11,5 metros e uma cércea de 14,35 metros.



Figura 4 – Vista aérea da fracção em estudo no Bairro da Pedralvas, Edifício n.º12, Rua 5



Figura 5 – Construção do Bairro das Pedralvas na década de 60 (Esquerda) e Edifício-Tipo do Bairro das Pedralvas na atualidade (Direita)



Figura 6 – Perspetiva do Bairro das Pedralvas



Figura 7 - Peças desenhadas do Alçado Principal Sul (Esquerda) e Corte Transversal (Direita)



Figura 8 - Peças desenhadas do Alçado Posterior Norte (Esquerda) e Alçado Lateral Poente (Direita)



Figura 9 - Perspetivas do Alçado Principal (Sul)



Figura 10 - Perspetivas dos Alçados Lateral e Posterior, Poente (Esquerda) e Norte (Direita)



Figura 11 - Perspetiva geral da Rua 5 e da envolvente

Da consulta da Memória Descritiva do Projeto de Arquitetura e respetivas peças desenhadas que a acompanham, o edifício é caracterizado do seguinte modo:

- Usos e Tipologias - Edifício de habitação em banda contínua com um total de 10 frações, sendo 6 do tipo T2 e 4 do tipo T3, isto é, com 2 e 3 quartos, respetivamente, além de sala comum, cozinha e instalação sanitária (figuras 12 e 13);
- Paredes, Estrutura e Cobertura - A construção é em alvenaria de tijolo, com fundações em betão ciclópico e com estrutura resistente em betão armado, com escadas, pavimentos e esteira do mesmo material. A cobertura é em telha marselha, assente sobre estrutura de betão.
- Acabamentos Exteriores - Os acabamentos exteriores são constituídos por reboco hidráulico com pintura a tinta de água.
- Caixilharia - A caixilharia de janelas e portas são em madeira de pinho pintado a óleo, estando as janelas providas de estores.
- Acabamentos Interiores - Reboco misto com caiação em paredes interiores e tetos, lambris de marmorite nas escadas de acesso comum, azulejo nas paredes das cozinhas e instalações sanitárias, pavimentos de tacos nos quartos e salas comuns e mosaico hidráulico nas cozinhas e instalações sanitárias.

Para efeitos do presente estudo foi considerada a fração T3 localizada no último piso. Em termos funcionais a fração é composta por dois quartos e sala orientados a Sul, um quarto e cozinha orientados a Norte e uma instalação sanitária orientada a Poente (Figura 13) - para efeitos de cálculo do comportamento térmico da fração todos os espaços foram considerados espaços interiores úteis e tomou-se como ponto de partida as soluções construtivas de origem e as respetivas características de desempenho térmico, que se sintetizam abaixo:

- Área útil de Pavimento - 53 m²
- Pé-direito - 2,50 m
- Classe de Inércia - 2 (Média);
- Laje - 0,20 m;

- Fachadas - construídas em alvenaria de tijolo furado com 0,22 cm de espessura, sem isolamento, revestida no interior e exterior com 0,015 m de reboco - espessura total 0,25 m;
- Paredes Interiores - construídas em alvenaria de tijolo furado com 0,15 cm de espessura sem isolamento, com 0,015 m de reboco em ambas as faces- espessura total das paredes interiores 0,18 m;
- Pavimentos interiores tipo - construídas em laje de betão armado com 0,15 cm de espessura sem isolamento, com betonilha de enchimento com 0,02 cm, revestimento superior a taco de madeira com 0,015 cm, revestimento inferior a estuque com 0,015 - espessura total da laje 0,20 m;
- Vãos envidraçados - caixilharia de madeira em vidro simples e estores exteriores de madeira projetáveis;
- Cobertura inclinada sobre desvão ventilado não habitável sem isolamento térmico - construída em laje maciça de betão armado com 0,15 cm de espessura com desvão ventilado sobre esteira horizontal, revestimento a telha marselha, revestimento inferior a estuque com 0,015 e revestimento superior em betonilha com 0,035 m - espessura total da esteira 0,20 m;
- Sistemas Técnicos - não foram encontrados elementos de arquivo que remetam para qualquer tipo de sistema técnico instalado. Neste caso, antecipa-se que os fogos originais fossem dotados de gás de botija e que não tivessem qualquer tipo de sistema de aquecimento;

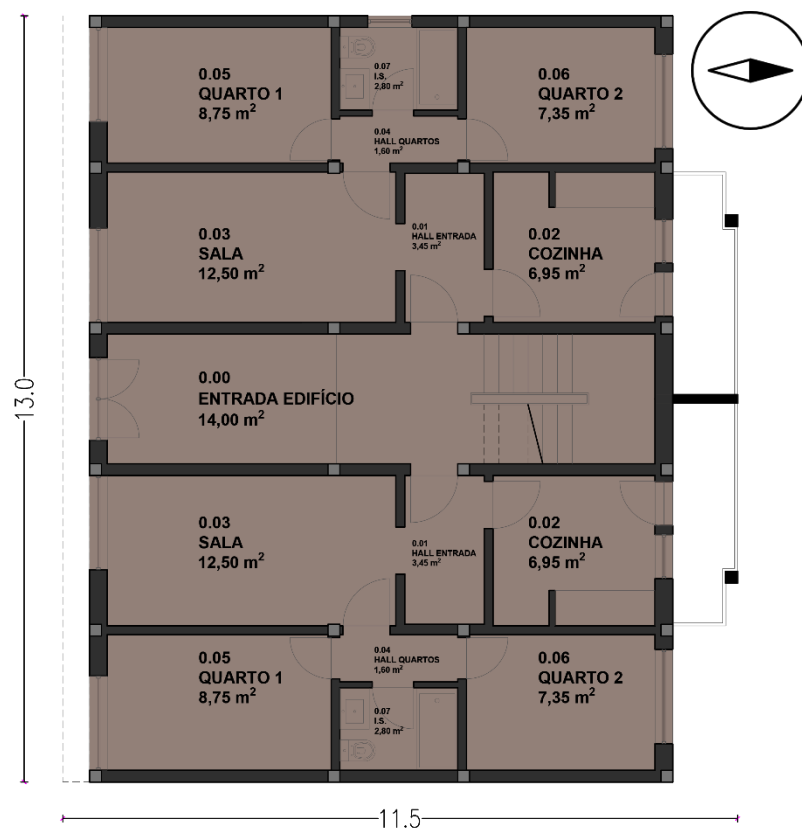


Figura 12 - Planta do Piso 0

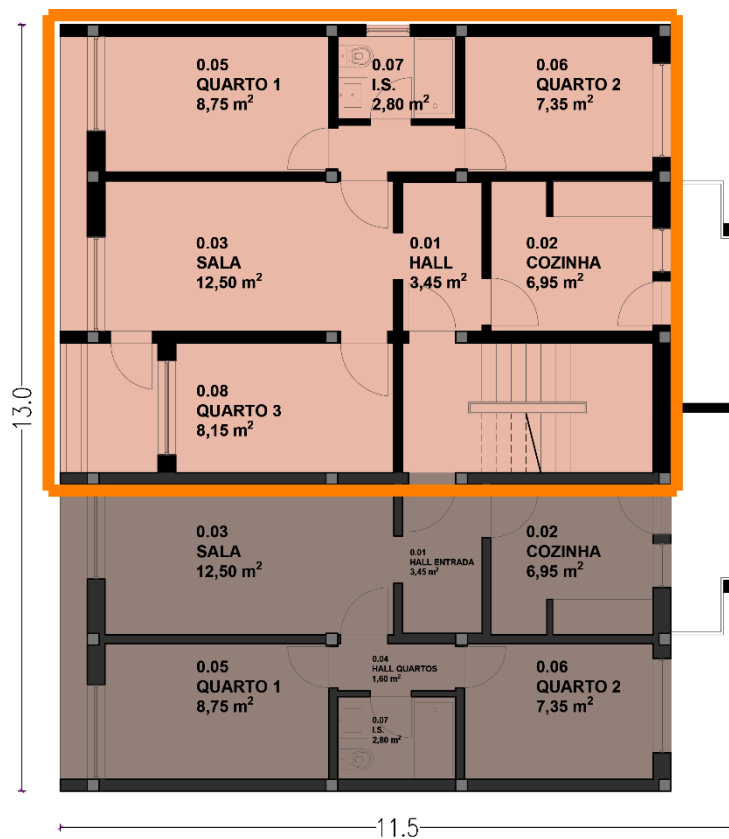


Figura 13 - Planta dos Pisos superiores e fração em estudo

A termografia de edifícios é uma metodologia utilizada para identificar inconsistências nos padrões de temperatura dos elementos construtivos quando analisados sob as mesmas condições. A deteção destas inconsistências permite identificar e localizar patologias da construção, tais como: infiltrações em paredes e coberturas, falta de isolamento térmico em fachadas e coberturas, etc. No âmbito deste estudo não foi possível realizar as análises térmicas ao edifício nas condições ideais, nomeadamente no período de inverno e, com isso, retirar conclusões mais aprofundadas e completas. Neste sentido, a utilização desta ferramenta teve como único objetivo identificar as pontes térmicas do edifício em análise. Através das figuras 14 e 15, e como seria de esperar, as pontes térmicas ocorrem nos elementos estruturais (lajes e pilares) sendo estes elementos os responsáveis pelas maiores perdas de calor.

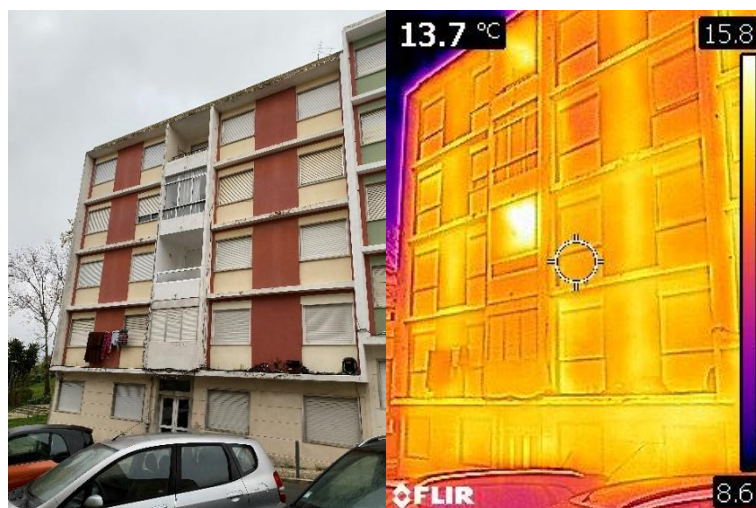


Figura 14 -Termograma do Alçado Principal

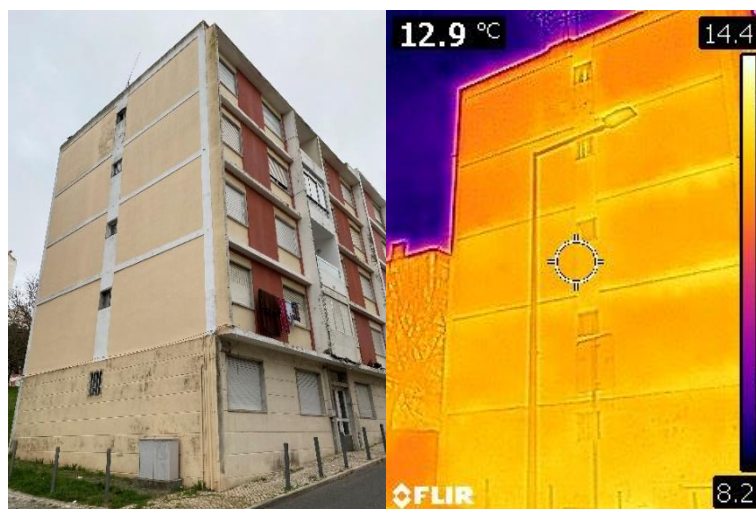


Figura 15 - Termograma do Alçado Lateral

3.2 ZONAMENTO CLIMÁTICO

A avaliação do desempenho energético de um edifício varia em função do clima e das variáveis que o influenciam, nomeadamente a zona climática de inverno e verão onde este se insere. A determinação das zonas climáticas é essencial à verificação do cumprimento dos requisitos de qualidade térmica da envolvente e, no caso dos edifícios de habitação, dos indicadores de conforto térmico e desempenho energético.

A zona climática de inverno é definida a partir do número de graus-dias (GD) durante a estação de aquecimento, na base de 18 °C, conforme Tabela 2 e Tabela 4, enquanto a zona climática de verão é definida a partir da temperatura média exterior da estação convencional de arrefecimento ($\theta_{ext,v}$), conforme Tabela 3 e Tabela 5, adaptadas do Despacho 15793-F/2013:

Tabela 2 – Critérios para a determinação da zona climática de inverno

Critério	$GD \leq 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$1300 \text{ }^{\circ}\text{C} < GD \leq 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$GD > 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Zona Climática inverno	I1	I2	I3

Tabela 3 – Critérios para a determinação da zona climática de verão

Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$20 \text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_{ext,v} \leq 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\theta_{ext,v} > 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Zona Climática verão	V1	V2	V3

Considerando a cidade de Lisboa e os respetivos valores de referência para a estação de aquecimento e arrefecimento:

Tabela 4 – Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento

MUNICÍPIO	z	M		GD		$\theta_{ext,v}$		G_{Sul}
	REF	REF	a	REF	a	REF	a	kWh/m ²
	m	Meses	mês/km	°C	°C/m	°C	°C/km	mês
LISBOA	109	5,3	3	1071	1,7	10,8	-4	150

Tabela 5 – Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento

MUNICÍPIO	z	$\theta_{ext,v}$		Isol (kWh/m ² acumulados de junho a setembro)								
	REF	REF	a	0°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
	m	°C	°C/km		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
LISBOA	109	21,7	-10	840	225	365	500	495	410	495	500	365

Procede-se à determinação da zona climática de Lisboa, tendo em consideração que:

- A cidade de LISBOA caracteriza-se por um número de graus-dias (GD) ≤ 1300 (GD Lisboa = 1071) o que a inscreve na zona climática de inverno I1 e uma temperatura média exterior correspondente à estação convencional de arrefecimento $\leq 22\text{ °C}$ ($\theta_{ext,v}=21,7\text{ °C}$), inscrevendo-se na zona climática de Verão V2;

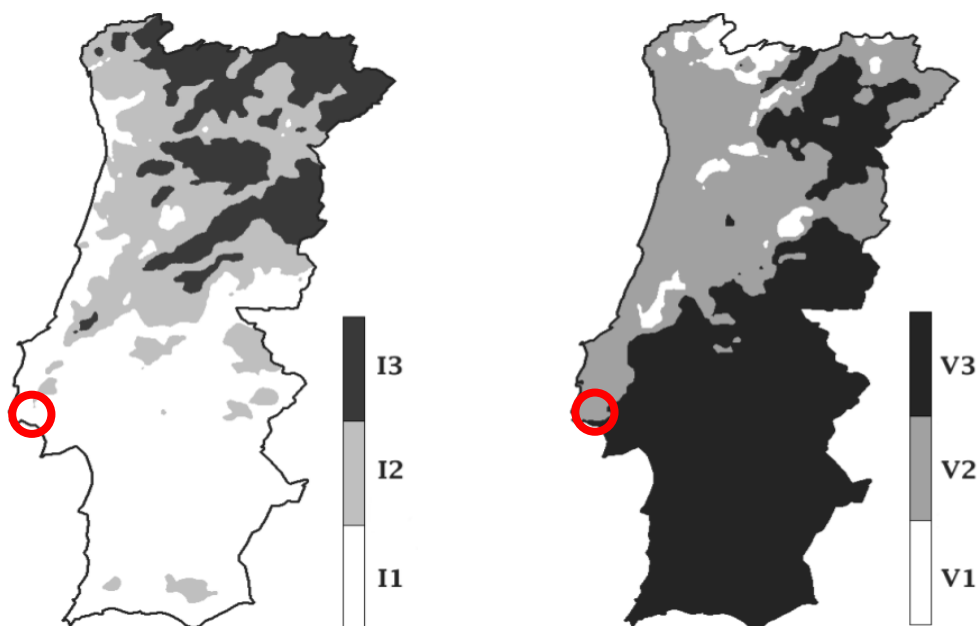


Figura 16 - Zonamento Climático de Portugal Continental, fonte: Portaria n.º 138-I/2021

Desta verificação conclui-se que Lisboa, com uma zona climática de inverno, zona I1, caracteriza-se por condições amenas - a situação de inverno menos rigorosa.

No que diz respeito ao verão, Lisboa caracteriza-se por uma estação de verão moderada, zona V2.

Numa primeira aproximação, é possível antecipar que o verão representará a estação mais crítica e condicionante no que diz respeito à garantia e satisfação do conforto térmico do edifício e, como tal, determinante no que concerne à prescrição das soluções construtivas a adotar para as diferentes envolventes tendo em conta a severidade desta estação e o potencial impacto no desempenho global do edifício.

3.3 REQUISITOS LEGAIS A CUMPRIR

Para a elaboração deste projeto foi considerada a legislação em vigor, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro, que estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944 bem como a legislação que lhe é complementar, nomeadamente:

- Despacho n.º 6476-E/2021 que aprova os requisitos mínimos de conforto térmico e de desempenho energético aplicáveis à conceção e renovação dos edifícios;
- Portaria n.º 138-I/2021 que regulamenta os requisitos mínimos de desempenho energético relativos à envolvente dos edifícios e aos sistemas técnicos e a respetiva aplicação em função do tipo de utilização e específicas características técnicas.
- Despacho n.º 6476-H/2021 que aprova o Manual do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE);
- Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013 que procede à publicação dos parâmetros térmicos para o cálculo dos seguintes valores: Coeficiente global de transferência de calor; Coeficiente de transmissão térmica superficial; Coeficiente de transmissão térmica linear; Coeficiente de absorção da radiação solar; Fator de utilização de ganhos; Quantificação da inércia térmica; radiação de vãos envidraçados; Fator de obstrução da radiação solar; Fração envidraçada; Fator de correção da seletividade angular dos envidraçados; Coeficiente de redução de perdas; Taxa de renovação do ar.

Para determinação do desempenho energético da fração em estudo e consequente verificação regulamentar dos vários indicadores de desempenho adotou-se o modelo tradicional da abordagem prescritiva. Nesta abordagem são analisadas e testadas várias soluções construtivas consideradas mais adequadas e viáveis para a renovação energética do edifício em estudo em função do contexto climático da cidade de Lisboa e viáveis.

As soluções adotadas para a envolvente opaca (fachadas e cobertura) e envolvente envidraçada são caracterizadas e analisadas em termos de desempenho energético e do seu impacto relativo no balanço global de energia da fração através da quantificação das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) e dos limites a observar (N_{i_i} e N_v).

O Despacho n.º 6476-E/2021, considera para os Edifícios de Habitação os seguintes requisitos mínimos de conforto térmico e de desempenho energético, dependendo do tipo e profundidade da intervenção:

- a) Os edifícios de habitação novos devem verificar o cumprimento dos requisitos de conforto térmico e de desempenho energético previstos na Tabela 6;

Tabela 6 – Requisitos dos edifícios de habitação novos. Despacho n.º 6476-E/2021

Tipo de requisito	Zona climática		
	I1	I2	I3
Conforto térmico			
Necessidades de aquecimento	$N_{ic}/N_i \leq 0,75$	$N_{ic}/N_i \leq 0,85$	$N_{ic}/N_i \leq 0,90$
Necessidades de arrefecimento	$N_{vc}/N_v \leq 1,00$		
Desempenho energético			
Classe energética	Igual ou superior a A		
Energia primária total	$R_{NT} \leq 0,50$		
Energia primária renovável	$Ren_{Hab} \geq 0,50$		

- b) Os edifícios de habitação sujeitos a grande renovação devem verificar o cumprimento dos requisitos de conforto térmico e de desempenho energético previstos na Tabela 7;

Tabela 7 – Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação. Despacho n.º 6476-E/2021

Tipo de requisito	Ano de construção (A)		
	A < 1960	1960 ≤ A ≤ 1990	1990 < A
Conforto térmico			
Necessidades de aquecimento	Não aplicável	$N_{ic}/N_i \leq 1,25$	$N_{ic}/N_i \leq 1,15$
Necessidades de arrefecimento	Não aplicável	$N_{vc}/N_v \leq 1,25$	$N_{vc}/N_v \leq 1,15$
Desempenho energético			
Classe energética	Igual ou superior a C		
Energia primária total	$R_{NT} \leq 1,50$		
Energia primária renovável	$Ren_{Hab} \geq 0,50$ ⁽¹⁾		

⁽¹⁾ Apenas aplicável quando renovados, cumulativamente, a rede de distribuição e o sistema produtor de Águas Quentes Sanitárias (AQS).

- c) São edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB) os edifícios que verifiquem o cumprimento das condições previstas para os edifícios novos, nos termos do previsto na alínea a);
- d) Os edifícios sujeitos a grande renovação ficam dispensados dos requisitos de desempenho energético, de forma individual, sempre que se verifiquem constrangimentos técnicos ou funcionais, nos termos do disposto na portaria prevista no n.º 12 do artigo 6.º do Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, de 7 de dezembro.

O edifício em estudo foi construído na década de 1960, aplicando-se os requisitos máximos do Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990 apresentados na Tabela 7. Contudo, no presente estudo pretende-se verificar se as estratégias de renovação a adotar garantem o cumprimento dos requisitos aplicáveis a edifícios novos e se estas têm potencial para a conversão do edifício em estudo num edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB), sendo aplicados, em simultâneo, os requisitos máximos do Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação novos, conforme Tabela 6. Para o cálculo dos indicadores de conforto térmico e desempenho energético da fração tomou-se como ponto de partida as soluções construtivas do edifício existente procedendo-se à verificação da sua adequabilidade às condições climáticas da cidade de Lisboa.

Posteriormente, são apresentadas soluções construtivas alternativas tendo em vista o cumprimento dos dispostos regulamentares enunciados, através da adoção de medidas corretivas no contexto da renovação energética do edifício existente. As medidas a adotar serão potencialmente mais adequadas e eficazes à melhoria do conforto térmico e desempenho energético da fração em estudo ao nível de:

- Soluções para a Envolvente Envidraçada;
- Soluções para a Envolvente Opaca – Paredes e Cobertura;
- Sistemas Técnicos;

As soluções construtivas a adotar estão dependentes da zona climática da cidade de Lisboa, I1-V2, e dos parâmetros climáticos associados, existindo requisitos mínimos de qualidade a cumprir em função das especificidades climáticas e geográficas e do tipo de edifício em questão.

Os requisitos mínimos de qualidade a adotar são enquadrados pela Portaria n.º 138-I/2021, conforme se descreve abaixo:

3.3.1 Envolvente Opaca

- a) *O coeficiente de transmissão térmica superficial de elementos opacos, é uma característica dos elementos construtivos que traduz a potência térmica que atravessa 1 m² do elemento por diferença de grau Célsio [W/(m². °C)]”.*

Os coeficientes de transmissão térmica superficial máximos para edifícios de habitação localizados em Lisboa são os apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente opaca dos edifícios de habitação – Portugal Continental, $U_{máx}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$], Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo I, ponto 1.2

Portugal Continental			Zona Climática		
Tipo de elemento	Condição fronteira		I1	I2	I3
Zona corrente da envolvente.	Verticais	Exterior ou interior com $b_{ztu} > 0,7$	0,50	0,40	0,35
		Interior com $b_{ztu} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior ou interior com $b_{ztu} > 0,7$	0,40	0,35	0,30
		Interior com $b_{ztu} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20
Zona de PTP	Verticais	Exterior		0,90	
		Interior com $b_{ztu} > 0,7$	1,75	1,60	1,45
		Interior com $b_{ztu} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior		0,90	
		Interior com $b_{ztu} > 0,7$	1,25	1,00	0,90
		Interior com $b_{ztu} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20

3.3.2 Envolvente Envidraçada

- a) “O coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados tem em conta o conjunto vidro mais caixilho, designando-se por U_w . Usualmente, o valor deste parâmetro é fornecido pelo fabricante ou pode consultar-se na etiqueta da janela” [3].

O coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados para edifícios de habitação localizados em Lisboa são os apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente envidraçada, $U_{w,máx}$ [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$], Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo I, ponto 2.2

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Portugal Continental:			
Edifícios de habitação	2,80	2,40	2,20
Edifícios de comércio e serviços	3,30	3,30	3,30

- b) Ao nível dos ganhos solares máximos obtidos pela envolvente envidraçada a alínea 2.2 g) refere “Os vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares em espaços interiores úteis devem verificar a seguinte condição: $g_{tot} \cdot F_o \cdot F_f = g_{tot,máx}$ ”.

Em que:

- g_{tot} – Fator solar dos vãos envidraçados com os dispositivos de proteção totalmente ativados;
- F_o – Fator de sombreamento por elementos opacos horizontais sobrejacentes ao envidraçado, designadamente palas, varandas, outros corpos ou partes de um edifício;
- F_f – Fator de sombreamento por elementos opacos verticais adjacentes ao envidraçado, designadamente palas, outros corpos ou partes de um edifício;
- $g_{tot,máx}$ – Fator solar máximo admissível dos vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares, obtido da Tabela 10.

- c) Ao nível dos fatores solares máximos admissíveis:

Tabela 10 – Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares, $g_{tot,máx}$, Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo I, ponto 2.2 alínea g) e h)

Tipo de edifício	Inércia do espaço	Zona Climática		
		V1	V2	V3
Edifícios de habitação	Fraca	0,15	0,10	0,10
	Média ou forte	0,56	0,56	0,50
Edifícios de comércio e serviços	Fraca, média ou forte	0,56	0,56	0,50

Acrescenta-se ainda que para efeitos da determinação do conforto térmico foi considerada um valor de taxa de renovação horária de ar de acordo com os valores indicados na Tabela 11:

Tabela 11 – Valores mínimos da taxa de renovação horária nos edifícios de habitação, $R_{ph_{min}}$, segundo a Norma EN 16798 -1, Portaria n.º 138-I/2021 – Anexo II, ponto 1.2.1 alínea a)

Contexto	$R_{ph_{min}}$ (h^{-1})
Edifício novo	0,50
Edifício sujeito a grande renovação	
Edifício sujeito a renovação no sistema de ventilação	

3.4 CÁLCULO DAS NECESSIDADES NOMINAIS DE ENERGIA

O Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944.

Refere o Artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro, no que diz respeito à metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios:

1 – A avaliação do desempenho energético dos edifícios é uma análise efetuada com base no consumo de energia calculado que reflete o consumo energético típico para o aquecimento e o arrefecimento de espaços, a ventilação de espaços, a produção de água quente e a iluminação fixa, bem como outros sistemas técnicos dos edifícios, nos casos aplicáveis, expressa por um indicador numérico de utilização energia primária em kWh/(m².ano).

Conforme expresso pela **Equação 1** - Necessidades nominais de energia primária do edifício real (N_{tc})

$$N_{tc} = \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{i,k} \cdot N_{ic}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{v,k} \cdot \delta \cdot N_{vc}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{a,k} \cdot Q_a / A_p}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \frac{W_{vm,j}}{A_p} \cdot F_{pu,j} - \sum_p \frac{E_{ren,p}}{A_p} \cdot F_{pu,p} [kWh_{EP} / (m^2 \cdot ano)]$$

Equação 1 - Necessidades nominais de energia primária do edifício real (N_{tc})

Onde:

- N_{ic} – Necessidades de energia útil para aquecimento, supridas pelo sistema k [kWh/(m².ano)];
- $f_{i,k}$ – Parcela das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k ;
- N_{vc} – Necessidades de energia útil para arrefecimento, supridas pelo sistema k [kWh/(m².ano)];
- $f_{v,k}$ – Parcela das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k ;
- Q_a – Necessidades de energia útil para preparação de AQS supridas pelo sistema k ;
- $f_{a,k}$ – Parcela das necessidades de energia útil para produção de AQS supridas pelo sistema k ;
- η_k – Eficiência do sistema k , que toma o valor de 1 no caso de sistemas para aproveitamento de fonte de energia renovável, à exceção de sistemas de queima a biomassa sólida em que deve ser usada a eficiência do sistema de queima;
- j – Todas as fontes de energia incluindo as de origem renovável;
- p – Fontes de origem renovável;
- $E_{ren,p}$ – Energia produzida a partir de fontes de origem renovável p [kWh/ano], incluindo apenas energia consumida;
- W_{vm} – Energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores [kWh/ano];
- A_p – Área interior útil de pavimento [m²];
- $F_{pu,j}$ e $F_{pu,p}$ – Fator de conversão de energia útil para energia primária [kWh_{EP}/kWh];

Em que:

- Necessidades Nominais Anuais De Energia Útil Para Aquecimento (**N_{ic}**) traduzem a quantidade de energia necessária para manter a habitação a uma temperatura de 18 °C durante 24 horas e durante toda a estação de aquecimento. Estas necessidades são determinadas contabilizando a transferência de calor pela envolvente, a transferência de calor por ventilação e os ganhos de calor úteis, os últimos provenientes dos ganhos solares pelos vãos envidraçados e dos ganhos devido às cargas internas no edifício.

- Necessidades Nominais Anuais De Energia Útil Para Arrefecimento (**N_{vc}**) traduzem a quantidade de energia necessária para manter a habitação a uma temperatura de 25 °C durante 24 horas e durante toda a estação de arrefecimento. Estas necessidades são determinadas contabilizando a transferência de calor pela envolvente, a transferência de calor por ventilação e os ganhos térmicos, os últimos provenientes dos ganhos solares pelos vãos envidraçados e pela envolvente opaca e dos ganhos devido às cargas internas no edifício.
- Necessidades Nominais Anuais De Energia Primária (**N_{tc}**) correspondem ao total de energia primária para satisfazer anualmente as necessidades de aquecimento e arrefecimento ambiente e de preparação de AQS, bem como para o funcionamento dos sistemas de ventilação mecânica, subtraindo a este total a contribuição das fontes de energia renovável para estes usos.

Para efeitos de cálculo tomou-se como ponto de partida os valores e parâmetros máximos admissíveis refletidos na Portaria n.º 138-I/2021 para a envolvente opaca e envidraçada aplicáveis à cidade de Lisboa (Tabela 13). Uma vez estabelecido o referencial procedeu-se ao estudo de várias soluções construtivas verificando-se e analisando-se o nível de desempenho energético e conforto térmico das alterações introduzidas no balanço global de energia da fração (Tabela 14). Para efeitos de simplificação, cada uma das envolventes foi testada individualmente, conforme apresentado na Tabela 12:

Tabela 12 – Metodologia de cálculo das necessidades nominais de energia

Lisboa I1-V2	Vãos Envidraçados	Elementos opacos Verticais		Pontes Térmicas Planas Verticais/Horizontais	Elementos opacos Horizontais
Parâmetros base / Portaria n.º 138-I/2021		Em contacto com exterior	Em contacto com edifícios	Em contacto com o exterior	Em contacto com o exterior
<i>U_{ref}</i> (W/m ² °C)	A variar 2,8 a 5,1	A variar 0,5 a 1,4	Fixo	A variar 0,9 a 3,14	A variar 0,4 a 0,33
Fator solar do vidro <i>g_v</i> / Edifício inércia média	A variar 0,56 a 0,87	Parâmetros a variar sectorialmente			
Proteção interior e/ou exterior	A variar				

Tabela 13 – Síntese dos requisitos máximos para a zona climática I1-V2, Portaria n.º 138-I/2021

Lisboa I1-V2	Vãos Envidraçados	Elementos opacos Verticais		Pontes Térmicas Planas Verticais/Horizontais	Elementos opacos Horizontais
Parâmetros base / Portaria n.º 138-I/2021		Em contacto com o exterior	Em contacto com edifícios	Em contacto com o exterior	Em contacto com o exterior
U_{ref} (W/m ² °C) Fator solar do vidro g_v / Edifício inércia média	2,8 0,56	0,5	0,8	0,9	0,4

Tabela 14 – Requisitos de conforto térmico e desempenho energético a verificar no estudo

CENÁRIO A			CENÁRIO B		
Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990		Classe Energética superior ou igual a C Classe Energética inferior a C	Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		É um Edifício nZEB Não é um Edifício nZEB
$N_{ic} \leq 1,25$ N_v	$N_{vc} \leq 1,25$ N_v	$N_{tc} \leq 1,5$ N_{tc}	$N_{ic} < 0,75$ N_i	$N_{vc} \leq N_v$ ≤ 1	$N_{tc} \leq 0,5$ N_{tc}
$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_{tc} / N_t \leq 1,5$	$N_{ic}/N_i < 0,75$	$N_{vc} \leq N_v$	$N_{tc} / N_t \leq 0,5$
VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
CUMPRE NÃO CUMPRE	CUMPRE NÃO CUMPRE	CUMPRE NÃO CUMPRE	CUMPRE NÃO CUMPRE	CUMPRE NÃO CUMPRE	CUMPRE NÃO CUMPRE

Conforme referido, a cidade de Lisboa caracteriza-se por condições de inverno ameno, zona climática I1, e por um verão com condições climáticas moderadas, zona climática V2. Para estas situações, no período de verão, as temperaturas são potencialmente atenuadas nos casos de ocorrência de brisas provenientes do estuário do Tejo verificando-se menores amplitudes térmicas diárias.

Este zonamento climático permite antecipar que o verão (estação de arrefecimento) necessitará de particular atenção no que diz respeito ao conforto térmico e balanço energético da fração e, como tal, as soluções construtivas adotadas, não obstante garantirem igualmente as condições de conforto no inverno (estação de aquecimento), deverão dar resposta efetiva às condições climáticas associadas à zona V2.

Como medidas gerais para a situação de Lisboa, I1-V2, as exigências de verão devem predominar face às de inverno através de medidas que visem restringir a condução térmica e os ganhos solares através dos envidraçados e apostar, sempre que possível, em sistemas eficazes de proteção solar no verão.

3.4.1 Necessidades Nominais de Energia do Edifício Existente

Em Portugal, os primeiros requisitos e exigências de eficiência energética com vista à avaliação e salvaguarda das condições de conforto térmico aplicadas à construção de novos edifícios e a grandes remodelações foram introduzidas em 1990 através do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro, entretanto revogado. Este Regulamento constituiu um marco decisivo na melhoria da qualidade da construção em Portugal, evidenciando a necessidade de introduzir um instrumento legal que garantisse melhores condições de salubridade, de higiene, conforto e qualidade na construção dos edifícios em contraste com o parque edificado construído até então. O edifício em estudo foi construído na década de 1960 com soluções construtivas utilizadas na construção corrente desse período o que se reflete em elevadas necessidades energéticas com impacto no conforto térmico e na saúde dos ocupantes à luz dos atuais requisitos de conforto térmico e desempenho energético. As soluções construtivas originais são caracterizadas abaixo (tabelas 15, 16, 17, 18 e 19) ao nível da sua composição e respetivos coeficiente de transmissão térmica superficial U , parâmetro que qualifica os elementos construtivos e traduz a potência térmica que atravessa 1 m² do elemento por diferença de grau Célsio [W/ (m². °C)]. Para o cálculo dos valores de U para cada solução apresentada foi utilizado o “ITE 50 – Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios” [31].

Tabela 15 – Caracterização da Envolvente Exterior Opaca: Zona Corrente

ZONA CORRENTE	e (m)	λ (W/m ³ °C)	R (m ² °C/W)	R _{si} (m ² °C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	R _{se} (m ² °C/W)	0,04
Tijolo 22	0,22	-	0,520	R _t (m ² °C/W)	0,71
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m ² °C)	1,4
Total	0,25	-	0,54		

Tabela 16 – Caracterização da Envolvente Exterior Opaca: Pontes Térmicas Planas

PONTES TÉRMICA PLANAS	e (m)	λ (W/m°°C)	R (m ² °C/W)	R _{si} (m ² °C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	R _{se} (m ² °C/W)	0,04
Betão Armado	0,25	2	0,125	R _t (m ² °C/W)	0,32
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m ² °C)	3,1
Total	0,28	-	0,15		

Tabela 17 - Caracterização da Envolvente Exterior Opaca: Cobertura Inclinada com desvão ventilado

COBERTURA	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	Rsi (m²°C/W)	0,13
Telha Marselha	0,010	0,600	0,017	Rse (m²°C/W)	0,04
Espaço de ar	-	-	0,180	Rt (m²°C/W)	0,30
Betonilha de enchimento	0,035	1,800	0,019	U(W/m²°C)	3,30
Esteira em laje maciça betão armado	0,150	2,000	0,075		
Reboco	0,015	1,300	0,012		
Total	0,20	-	0,30		

Tabela 18 - Caracterização da Envolvente Interior Opaca

ENVOLVENTE INTERIOR	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	Rsi (m²°C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	Rt (m²°C/W)	0,67
Tijolo 15	0,15	-	0,390	U(W/m²°C)	1,5
Reboco	0,015	1,3	0,012		
Total	0,18	-	0,41		

Tabela 19 - Caracterização da Envolvente Envidraçada

ENVOLVENTE ENVIDRAÇADA	U (W/m²°C)	g Fator Solar do Vidro
Caixilharia de madeira em vidro simples incolor com 6 mm de espessura e estores exteriores projetáveis em madeira;	5,1	0,87

Tabela 20 - Síntese dos requisitos máximos para a zona climática I1-V2, Portaria n.º 138-I/2021 e parâmetros do Edifício Existente sem qualquer tipo de intervenção (ITE 50 - LNEC)

Lisboa I1-V2	Vãos Envidraçados	Elementos opacos Verticais		Pontes Térmicas Planas Verticais/Horizontais	Elementos opacos Horizontais
Parâmetros base / Portaria n.º 138-I/2021		Em contacto com exterior	Em contacto com edifícios	Em contacto com o exterior	Em contacto com o exterior
U ref. (W/m²°C)	2,8 5,1	0,5 1,4	0,8 N/A	0,9 3,14	0,4 3,3
Fator solar do vidro g_v / Edifício inércia média	0,56 0,87				

Através da Tabela 20 verifica-se que as soluções construtivas das soluções construtivas de origem, ultrapassam os requisitos máximos aplicáveis à envolvente opaca e envidraçada para a zona climática I1-V2.

Para o cálculo dos indicadores de conforto térmico e do desempenho energético da fração admitiu-se que não houve qualquer intervenção e procedeu-se à verificação da sua adequabilidade às condições climáticas da cidade de Lisboa tendo por base as Tabela 6 e Tabela 7, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 21:

Tabela 21 - Verificação do conforto térmico e desempenho energético das soluções de origem do Edifício Existente

CENÁRIO A			CENÁRIO B		
Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990		Classe Energética superior ou igual a C Classe Energética inferior a C	Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		É um Edifício nZEB Não é um Edifício nZEB
$N_{ic} \leq 1,25 N_v$	$N_{vc} \leq 1,25 N_v$	$N_{tc} \leq 1,5 N_{tc}$	$N_{ic} < 0,75 N_i$	$N_{vc} \leq N_v \leq 1$	$N_{tc} \leq 0,5 N_{tc}$
$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_{tc} / N_t \leq 1,5$	$N_{ic}/N_i < 0,75$	$N_{vc} \leq N_v$	$N_{tc} / N_t \leq 0,5$
3,594	10,363	2,679	3,594	10,363	2,679
NÃO CUMPRE	NÃO CUMPRE	NÃO CUMPRE	NÃO CUMPRE	NÃO CUMPRE	NÃO CUMPRE

Dos resultados obtidos, e como seria expetável, verifica-se que as soluções construtivas de origem não cumprem os requisitos mínimos de conforto térmico e desempenho energético à luz da legislação atual, seja nos requisitos aplicáveis a edifícios de habitação sujeitos a grandes renovações construídos entre 1960-1990 (Cenário A - Tabela 21) seja os requisitos para edifícios de habitação novos e nZEB (Cenário B - Tabela 21).

3.4.2 Projeto de Renovação Energética - Envolvente Opaca e Parâmetros Característicos

A qualidade da envolvente opaca de um edifício (fachadas, paredes interiores, pavimentos e coberturas) assume particular importância no conforto térmico dos edifícios ao funcionar como interface entre o espaço interior habitado e o ambiente exterior, entre os quais se estabelecem trocas significativas de calor por condução. As propriedades higrotérmicas da envolvente opaca estão diretamente relacionadas com as condições de conforto térmico interior promovido pelos sistemas construtivos adotados e respetivas resistências térmicas. Ao nível dos coeficientes de transmissão térmica máximos dos elementos da envolvente opaca a Portaria n.º 138-I/2021, estabelece os indicadores conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Metodologia para o cálculo dos indicadores de conforto e desempenho para a envolvente opaca vertical

ZONA I1-V2	Vãos Envidraçados	Elementos opacos Verticais		Pontes Térmicas Planas Verticais/Horizontais	Elementos opacos Horizontais
Parâmetros base / Portaria n.º 138-I/2021		Em contacto com exterior	Em contacto com edifícios	Em contacto com o exterior	Em contacto com o exterior
U ref. (W/m ² °C) Fator solar do vidro g _v / Edifício inércia média	2,8 0,56	X _n ≤ 0,5	0,8	X _n ≤ 0,9	0,4
Parâmetros	Fixos	A variar	N/A	A variar	Fixo

Para efeitos de simplificação de cálculo foram consideradas proteções pelo exterior, FS Global Proteções Móveis=0,04 e uma caixilharia em madeira ou PVC sem quadrícula, com uma fração envidraçada F_g=0,65.

3.4.2.1 Fachadas

Para efeitos de verificação do mérito relativo das soluções construtivas adotadas para as fachadas fixaram-se os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de transmissão $U_{\text{envidraçados}} = 2,80$ (máximo admissível na legislação) ainda que a solução original apresente um valor acima de $U_{\text{envidraçados}} = 5,1$ (caixilharia em madeira com vidro simples com 6mm de espessura);
- Fator solar do vidro $g_v = 0,56$ (máximo admissível - legislação) ainda que a solução original apresente um valor acima de $g_v = 0,87$ (caixilharia em madeira com vidro simples com 6mm de espessura);
- Proteção pelo exterior do tipo persianas de réguas plásticas ou metálicas de cor clara, $g_{T,vc} = 0,04$, correspondente a uma solução utilizada na construção corrente;
- Fração envidraçada $F_g = 0,65$ (caixilho em PVC ou madeira sem quadrícula);
- $U_{\text{cobertura}} = 0,4$ (máximo admissível);

A variar:

- $U_{\text{paredes}} = 0,50$ (máximo admissível);
- $U_{\text{pontes térmicas planas}}$ = Valor em função da Solução a testar para a Zona Corrente;

A estratégia adotada para a análise do mérito relativo das fachadas no conforto térmico e desempenho energético da fração consistiu em fazer variar o coeficiente de transmissão térmica entre o valor máximo admissível $U_{\text{Envolvente Vertical}} = 0,50$ para a zona climática I1-V2 e os valores de U para novas soluções construtivas de fachadas a aplicar sobre as fachadas existentes, caracterizada na Tabela 23. As novas soluções construtivas a testar e respetivos coeficientes de transmissão térmica, conforme apresentados na Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26 têm por base a informação vertida no documento ITE-50. [4] Propõe-se que todas as soluções construtivas apresentadas sejam adossadas à solução construtiva original que servirá de suporte à instalação das novas soluções.

Tabela 23 – Solução 0: Fachada Original

ZONA CORRENTE	e (m)	λ (W/m ³ °C)	R (m ² °C/W)	R _{si} (m ² °C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	R _{se} (m ² °C/W)	0,04
Tijolo 22	0,22	-	0,520	R _t (m ² °C/W)	0,71
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m ² °C)	1,40
Total	0,25	-	0,543		

Tabela 24 – Solução 1: Sistema de Fachada Ventilada sobre Fachada Original

SOLUÇÃO 1	e (m)	λ (W/m ³ °C)	R (m ² °C/W)	R _{si} (m ² °C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	R _{se} (m ² °C/W)	0,04
Tijolo 22	0,22	-	0,560	R _t (m ² °C/W)	3,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m ² °C)	0,35
XPS	0,08	0,037	2,162		
Espaço de ar	0,02	-	-		
Painéis fenólicos (*)	0,01	-	-		
Total	0,36	-	2,70		

(*) Os painéis fenólicos HPL (*high pressure laminates*) são formados por lâminas de papel Kraft impregnadas em resinas fenólicas.

Tabela 25 – Solução 2: Sistema de Fachada ETICS sobre Fachada Original

SOLUÇÃO 2	e (m)	λ (W/m ³ °C)	R (m ² °C/W)	R _{si} (m ² °C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	R _{se} (m ² °C/W)	0,04
Tijolo 22	0,22	-	0,520	R _t (m ² °C/W)	2,89
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m ² °C)	0,35
XPS	0,08	0,037	2,162		
Revestimento de acabamento	0,02	-	-		
Total	0,35	-	2,7		

Tabela 26 – Solução 3: Sistema de Fachada CLT sobre Fachada Original

SOLUÇÃO 3	e (m)	λ (W/m ³ °C)	R (m ² °C/W)	R _{si} (m ² °C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	R _{se} (m ² °C/W)	0,04
Tijolo 22	0,22	-	0,560	R _t (m ² °C/W)	3,45
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m ² °C)	0,29
CLT	0,06	0,12	0,500		
XPS	0,08	0,037	2,162		
Painéis fenólicos	0,01	0,3	0,033		
Total	0,40	-	3,3		

As soluções construtivas a testar estão sintetizadas na Tabela 27:

Tabela 27 - Síntese das Soluções de Fachada /Zona Corrente a testar

Solução	Composição	U (W/m ² °C)	Critério
Solução 0	Fachada Original / Zona Corrente Paredes simples em alvenaria de tijolo furado com 0,22 m de espessura, sem caixa-de-ar, revestida no interior e exterior com 0,015 m de reboco - espessura total das fachadas 0,25 m;	1,40	A testar
Solução R	Referência	0,50	Máximo Legal A testar
Solução 1 Sistema Fachada Ventilada	Fachada Original / Zona Corrente + Sistema Fachada Ventilada Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; e caixa de ar com 20 mm de espessura; revestimento exterior a painéis de resinas fenólicas com 10 mm;	0,35	A testar
Solução 2 Sistema Fachada ETICS	Fachada Original / Zona Corrente + Sistema Fachada ETICS Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; revestimento de acabamento com 2 mm de espessura;	0,35	A testar
Solução 3 Sistema Fachada CLT	Fachada Original / Zona Corrente + Sistema Fachada CLT Painel CLT com 60 mm de espessura; Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; revestimento exterior a painéis de resinas fenólicas com 10 mm;	0,29	A testar

3.4.2.2 Pontes Térmicas Planas

No caso das pontes térmicas planas, as soluções construtivas a testar com vista ao reforço térmico da solução de origem (Tabela 28) são apresentadas na Tabela 29, Tabela 30, Tabela 31 e estão sintetizadas na Tabela 32.

Tabela 28 - Solução 0: Fachada Original

SOLUÇÃO 0	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	Rsi (m²°C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	Rse (m²°C/W)	0,04
Betão Armado	0,25	2	0,125	Rt (m²°C/W)	0,32
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m²°C)	3,1
Total	0,28	-	0,15		

Tabela 29 - Solução 1: Sistema de Fachada Ventilado sobre Fachada Original

SOLUÇÃO 1	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	Rsi (m²°C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	Rse (m²°C/W)	0,04
Betão Armado	0,25	2	0,125	Rt (m²°C/W)	2,69
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m²°C)	0,40
XPS	0,08	0,037	2,162		
Espaço de ar	0,02	-	-		
Painéis fenólicos	0,01	-	-		
Total	0,39	-	2,3		

Tabela 30 - Solução 2: Sistema de Fachada ETICS sobre Fachada Original

SOLUÇÃO 2	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	Rsi (m²°C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	Rse (m²°C/W)	0,04
Betão Armado	0,25	2	0,125	Rt (m²°C/W)	2,50
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m²°C)	0,40
XPS	0,08	0,037	2,162		
Revestimento de acabamento	0,02	-	-		
Total	0,38	-	2,3		

Tabela 31 - Solução 3: Sistema de Fachada CLT sobre Fachada Original

SOLUÇÃO 3	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	Rsi (m²°C/W)	0,13
Reboco	0,015	1,3	0,012	Rse (m²°C/W)	0,04
Betão Armado	0,25	2	0,125	Rt (m²°C/W)	3,01
Reboco	0,015	1,3	0,012	U (W/m²°C)	0,33
CLT	0,06	0,12	0,500		
XPS	0,08	0,037	2,162		
Painéis fenólicos	0,01	0,3	0,033		
Total	0,43	-	2,8		

Tabela 32 – Síntese das Soluções de Fachada/PTP a testar

Solução	Composição	U (W/m ² °C)	Critério
Solução 0	Fachada Original / PTP Estrutura em betão armado com 0,25 cm de espessura; sem caixa-de-ar, revestida no interior e exterior com 0,015 m de reboco;	3,14	A testar
Solução R	Referência	0,90	Máximo Legal A testar
Solução 1 Sistema Fachada Ventilada	Fachada Original / PTP + Sistema Fachada Ventilada Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; e caixa de ar com 20 mm de espessura; revestimento exterior a painéis de resinas fenólicas com 10 mm;	0,40	A testar
Solução 2 Sistema Fachada ETICS	Fachada Original / PTP + Sistema Fachada ETICS Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; reboco de acabamento com 2 mm de espessura;	0,40	A testar
Solução 3 Sistema Fachada CLT	Fachada Original / PTP + Sistema Fachada CLT Painel CLT com 60 mm de espessura; Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; revestimento exterior a painéis de resinas fenólicas com 10 mm;	0,33	A testar

Tabela 33 – Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t das Fachadas variando U

Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990					Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		
SOLUÇÃO	U (W/m ² °C) Variável	$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_{tc} / N_t \leq 1,5$	$N_{ic}/N_i < 0,75$	$N_{vc} \leq N_v$ 1,0	$N_{tc} / N_t \leq 0,5$
S0	1,4 / 3,14	0,967	1,481	0,73	0,967	1,481	0,73
SR	0,5 / 0,4	0,711	1,511	0,609	0,711	1,511	0,609
S2	0,35 / 0,40	0,666	1,519	0,588	0,666	1,519	0,588
S1	0,32 / 0,37	0,659	1,52	0,584	0,659	1,52	0,584
S3	0,29 / 0,33	0,651	1,521	0,581	0,651	1,521	0,581
		DIMINUI	AUMENTA	DIMINUI	DIMINUI	AUMENTA	DIMINUI

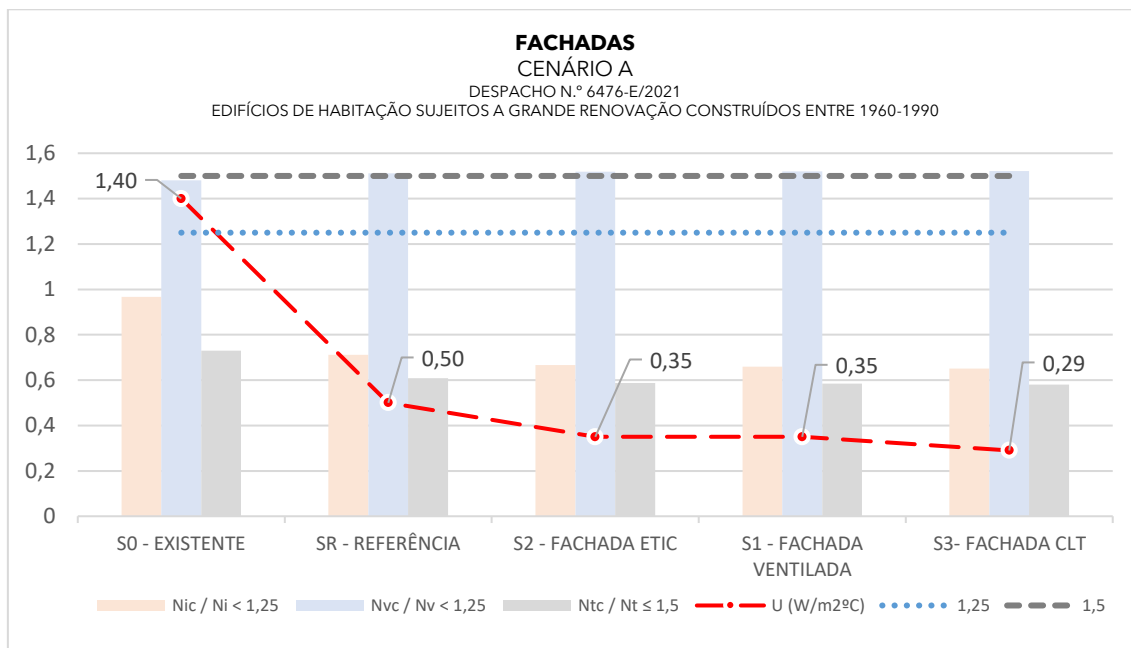


Figura 17 - Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de U das Fachadas

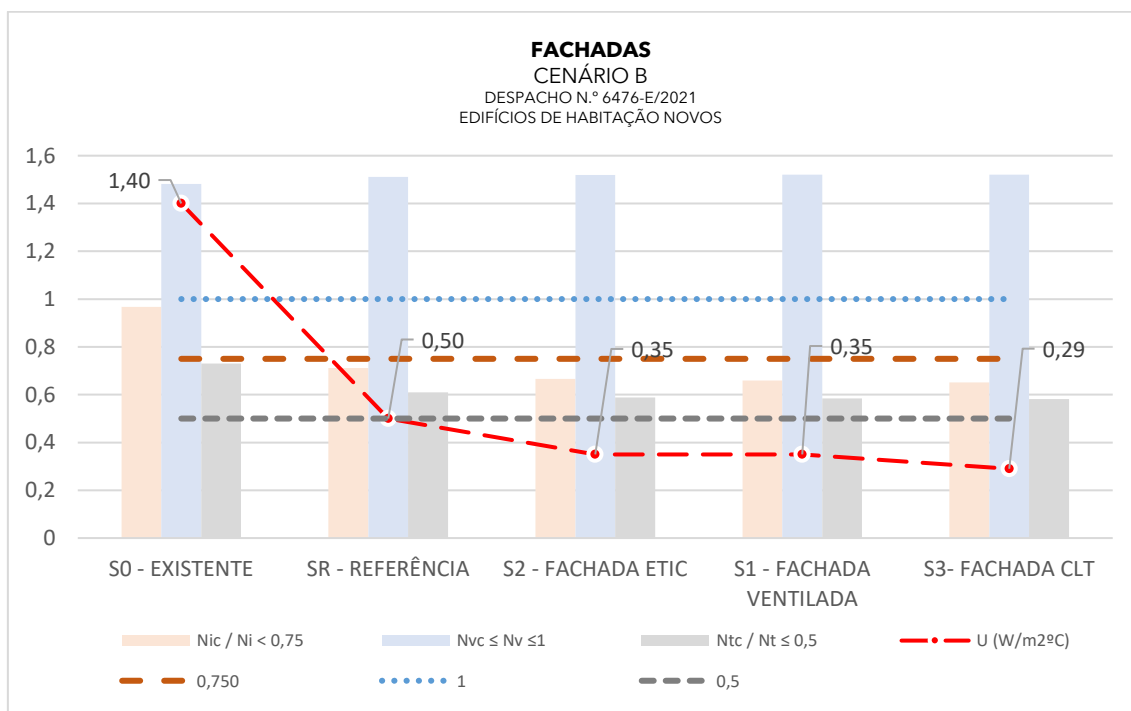


Figura 18 - Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de U das Fachadas

Através dos resultados obtidos, confirma-se que as perdas ocorridas através das fachadas e as consequentes necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento estão diretamente relacionadas com as propriedades dos materiais utilizados na composição de cada uma das soluções de paredes testadas. As novas soluções de fachada apresentadas, nas quais se incorpora isolamento térmico nos três sistemas propostos – sistema ETICS, sistema de fachada ventilada e sistema CLT – apresentam, progressivamente, valores mais reduzidos de coeficientes de transmissão térmica traduzindo melhorias de conforto e desempenho em alguns dos parâmetros analisados.

No que diz respeito ao Cenário A e ao cumprimento do Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990:

- Para a estação de aquecimento, verifica-se que à medida que se reduz o coeficiente de transmissão térmica, ocorrem, progressivamente, menores perdas de calor pelas fachadas. Esta ocorrência é favorável na medida em que a fração apresenta menores necessidades de aquecimento N_{hc} – todas as soluções, inclusivamente a solução original com um valor de $U=1,40 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U=3,14 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (zona corrente e pontes térmicas planas, respetivamente) cumprem os requisitos legais e apresentam valores de N_{vc}/N_v inferiores a 1,25. A solução 3, apresenta uma melhoria de cerca de 33% face à solução 0 (original) e uma melhoria de cerca de 8,43% face ao valor de referência.
- Para a estação de arrefecimento, verifica-se o oposto do referido acima, i.e., os valores de U mais elevados, apesar de associados a maiores perdas, têm um contributo favorável e um melhor comportamento no verão na medida em que permitem que o calor seja devolvido para o exterior evitando situações de sobreaquecimento no interior dos espaços. Para valores de U mais elevados estão associadas menores necessidades de energia para arrefecimento a fornecer aos espaços para garantir as temperaturas interiores de conforto. Neste caso, com a solução 0 (fachada original) e a solução R (referência) ocorrem maiores perdas o que configura soluções construtivas favoráveis no verão.

- As soluções, 1, 2 e 3, com valores de U mais baixos, agravam moderadamente as necessidades de energia para arrefecimento, devendo-se, nestes casos, recorrer à ventilação natural dos espaços e/ou à climatização, por exemplo. Ainda assim, nenhum dos resultados obtidos cumpre com os requisitos legais, com todas as soluções construtivas a apresentarem valores acima do máximo admissível $N_{vc}/N_v \leq 1,25$.
- No que diz respeito às necessidades e energia primária, **Ntc**, estas diminuem com as soluções de paredes cujos coeficientes de transmissão térmica são progressivamente menores, os resultados obtidos para todas as soluções cumprem valor máximo admissível $N_{tc}/N_t \leq 1,5$.

No que diz respeito ao Cenário B e ao cumprimento dos requisitos do Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação novos:

A tendência verificada acima mantém-se. Contudo, na estação de aquecimento apenas as soluções R, 1, 2 e 3 cumprem com os requisitos de conforto térmico e eficiência energética com valores de N_{vc} / N_v inferiores a 0,75.

Através desta análise, é possível inferir que a integração de novas soluções de fachada, com valores de U mais baixos que o valor de referência, não cumprem todos os requisitos do Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990 e edifícios de habitação novos.

Neste caso, verifica-se que a intervenção exclusiva nas fachadas corresponde uma abordagem com impacto reduzido e parcial (apenas na estação de aquecimento) na melhoria do conforto térmico e desempenho energético da fração em estudo.

3.4.2.3 Cobertura

A fração em estudo corresponde ao último andar habitado do edifício multifamiliar objeto da análise. A cobertura corresponde a outro elemento da envolvente opaca com impacto significativo no conforto térmico e desempenho energético da fração.

A cobertura será, portanto, responsável por ganhos e perdas de calor a ter em consideração neste estudo. De acordo com os dados do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, em média, as coberturas representam 30% das perdas de calor numa habitação, pelo que é de máxima importância garantir soluções construtivas adequadas capazes de responder com eficiência ao tipo de localização e condicionantes climáticas subjacentes a determinado edifício, devendo estas:

- Melhorar o conforto térmico;
- Minimizar patologias com condensações, fungos e bolores;
- Redução do valor da fatura da energia;
- Garantir uma maior durabilidade do imóvel e a sua vida útil;

Tabela 34 - Metodologia para o cálculo dos indicadores de conforto e desempenho para a Cobertura

LISBOA I1-V2	Vãos Envidraçados	Elementos opacos Verticais		Pontes Térmicas Planas Verticais/Horizontais	Elementos opacos Horizontais
Parâmetros base / Portaria n.º 138-I/2021		Em contacto com exterior	Em contacto com edifícios	Em contacto com o exterior	Em contacto com o exterior
U ref. (W/m ² °C)	2,8	0,5	0,8	0,9	$X_n \leq 0,4$
Fator solar do vidro g_v / Edifício inércia média	0,56				
Parâmetros	Fixos	Fixo		Fixo	A variar

Para efeitos de simplificação de cálculo foram consideradas proteções pelo exterior, FS Global Proteções Móveis=0,04 e uma caixilharia em madeira ou PVC sem quadrícula, com uma fração envidraçada $F_g=0,65$.

Para efeitos de verificação do mérito relativo das soluções construtivas adotadas para a cobertura fixaram-se os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de transmissão $U_{\text{envidraçados}} = 2,80$ (máximo admissível na legislação) ainda que a solução original apresente um valor acima de $U_{\text{envidraçados}} = 5,1$ (caixilharia em madeira com vidro simples com 6mm de espessura);
- Fator solar do vidro $g_v = 0,56$ (máximo admissível - legislação) ainda que a solução original apresente um valor acima de $g_v = 0,87$ (caixilharia em madeira com vidro simples com 6mm de espessura=;
- Proteção pelo exterior do tipo persianas de réguas plásticas ou metálicas de cor clara, $g_{T,vc} = 0,04$, correspondente a uma solução utilizada na construção corrente;
- Fração envidraçada $F_g = 0,65$ (caixilho em PVC ou madeira sem quadrícula);
- $U_{\text{cobertura}} = 0,4$ (máximo admissível);
- $U_{\text{paredes}} = 0,50$ (máximo admissível);
- $U_{\text{pontes térmicas planas}} = 0,40$ (máximo admissível);
- Fator de obstrução $F_s = 1$ ou $F_s = 0,5$ - a cobertura não tem sombra permanente na totalidade da área, $F_s = 1$, ou a cobertura tem 50% da sua área total em sombra, $F_s = 0,5$;
-

A variar:

- $U_{\text{cobertura}} = 0,4$ (máximo admissível);

A estratégia adotada para a análise do mérito relativo da cobertura no conforto térmico e desempenho energético da fração consistiu em fazer variar o coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente horizontal entre o valor máximo admissível $U_{\text{Envolvente Horizontal}} = 0,40$ para a zona climática I1-V2 e os valores de U para diferentes soluções construtivas de coberturas potencialmente adequadas à localização e edifício em estudo. As soluções construtivas a testar e respetivos coeficientes de transmissão térmica tiveram por base a informação vertida no documento ITE-50 para sistemas de cobertura inclinadas com desvão ventilado.

Tabela 35 – Solução 0: Cobertura Original

SOLUÇÃO 0	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	R _{si} (m²°C/W)	0,13
Telha Marselha	0,010	0,600	0,017	R _{se} (m²°C/W)	0,04
Espaço de ar	-	-	0,180	R _t (m²°C/W)	0,30
Betonilha de enchimento	0,035	1,800	0,019	U (W/m²°C)	3,30
Esteira em laje maciça betão armado	0,150	2,000	0,075		
Reboco	0,015	1,300	0,012		
Total	0,20	-	0,30		

Tabela 36 – Solução 1: Aplicação de XPS sobre OSB sob a pendente na Cobertura Original

SOLUÇÃO 1	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	R _{si} (m²°C/W)	0,13
Telha Marselha	0,010	0,600	0,017	R _{se} (m²°C/W)	0,04
Espaço de ar	-	-	0,180	R _t (m²°C/W)	2,64
XPS	0,08	0,037	2,162	U (W/m²°C)	0,38
Placa OSB a acompanhar pendente	0,025	0,013	0,18		
Betonilha de enchimento	0,035	1,800	0,019		
Esteira em laje maciça betão armado	0,150	2,000	0,075		
Reboco	0,015	1,300	0,012		
Total	0,31	-	2,64		

Tabela 37 – Solução 1: Aplicação de XPS sobre CLT sobre a laje de esteira da Cobertura Original

SOLUÇÃO 2	e (m)	λ (W/m°C)	R (m²°C/W)	R _{si} (m²°C/W)	0,13
Telha Marselha	0,010	0,600	0,017	R _{se} (m²°C/W)	0,04
Espaço de ar	-	-	0,180	R _t (m²°C/W)	2,96
XPS	0,08	0,037	2,162	U (W/m²°C)	0,34
CLT sobre Esteira	0,06	0,12	0,500		
Betonilha de enchimento	0,035	1,800	0,019		
Esteira em laje maciça betão armado	0,150	2,000	0,075		
Reboco	0,015	1,300	0,012		
Total	0,34	-	2,96		

Tabela 38 - Solução 3: Combinação das Soluções 1 e 2 aplicada à pendente e laje da Cobertura Original

SOLUÇÃO 3	e (m)	λ (W/m°C)	R (m ² °C/W)	R _{si} (m ² °C/W)	0,13
Telha Marselha	0,010	0,600	0,017	R _{se} (m ² °C/W)	0,04
XPS	0,08	0,037	2,162	R _t (m ² °C/W)	5,31
Placa OSB a acompanhar pendente	0,025	0,013	0,18	U (W/m ² °C)	0,19
Espaço de ar	-	-	0,180		
XPS	0,08	0,037	2,162		
CLT sobre Esteira	0,06	0,12	0,500		
Betonilha de enchimento	0,035	1,800	0,019		
Esteira em laje maciça betão armado	0,150	2,000	0,075		
Reboco	0,015	1,300	0,012		
Total	0,46	-	5,31		

Tabela 39 – Síntese das Soluções de Cobertura a testar

Solução	Composição	U (W/m ² °C)	Critério
Solução 0 Cobertura Original	Cobertura inclinada sobre desvão ventilado não habitável sem isolamento térmico construída em laje maciça de betão armado com 0,15 cm de espessura com desvão ventilado sobre esteira horizontal, revestimento a telha marselha, revestimento inferior a estuque com 0,015 e revestimento superior em betonilha com 0,035 m – espessura total da esteira 0,20 m	3,30	A testar
Solução R	Referência	0,40	Máximo Legal A testar
Solução 1	Cobertura Original + Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura sobre estrutura em OSB a acompanhar a pendente com 25 mm de espessura;	0,38	A testar
Solução 2	Cobertura Original + Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura sobre estrutura CLT com 60 mm sobre esteira;	0,34	A testar
Solução 3	Cobertura Original + Solução 1 Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura sobre estrutura em OSB a acompanhar a pendente com 25 mm de espessura; + Solução 2 Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura sobre estrutura CLT com 60 mm sobre esteira;	0,19	A testar

Tabela 40 – Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t da Cobertura variando U e considerando que a cobertura não está em sombra

Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990					Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		
SOLUÇÃO	U (W/m ² °C) Variável	$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_t / N_t \leq 1,5$	$N_{ic}/N_i < 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_t / N_t \leq 0,5$
S0	3,30	3,193	10,715	2,513	3,193	10,715	2,513
SR	0,40	0,711	1,511	0,609	0,711	1,511	0,609
S1	0,38	0,695	1,451	0,596	0,695	1,451	0,596
S2	0,34	0,662	1,332	0,572	0,662	1,332	0,572
S3	0,19	0,541	0,996	0,487	0,541	0,996	0,487
		DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI

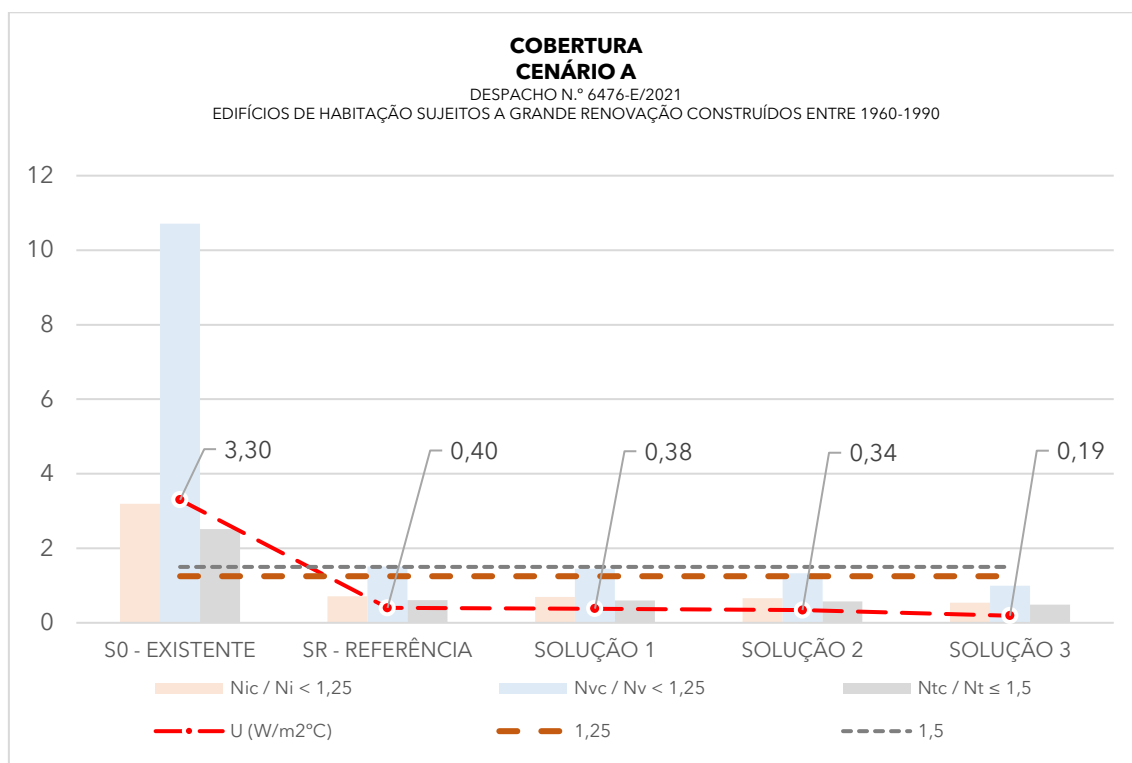


Figura 19 - Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U da Cobertura

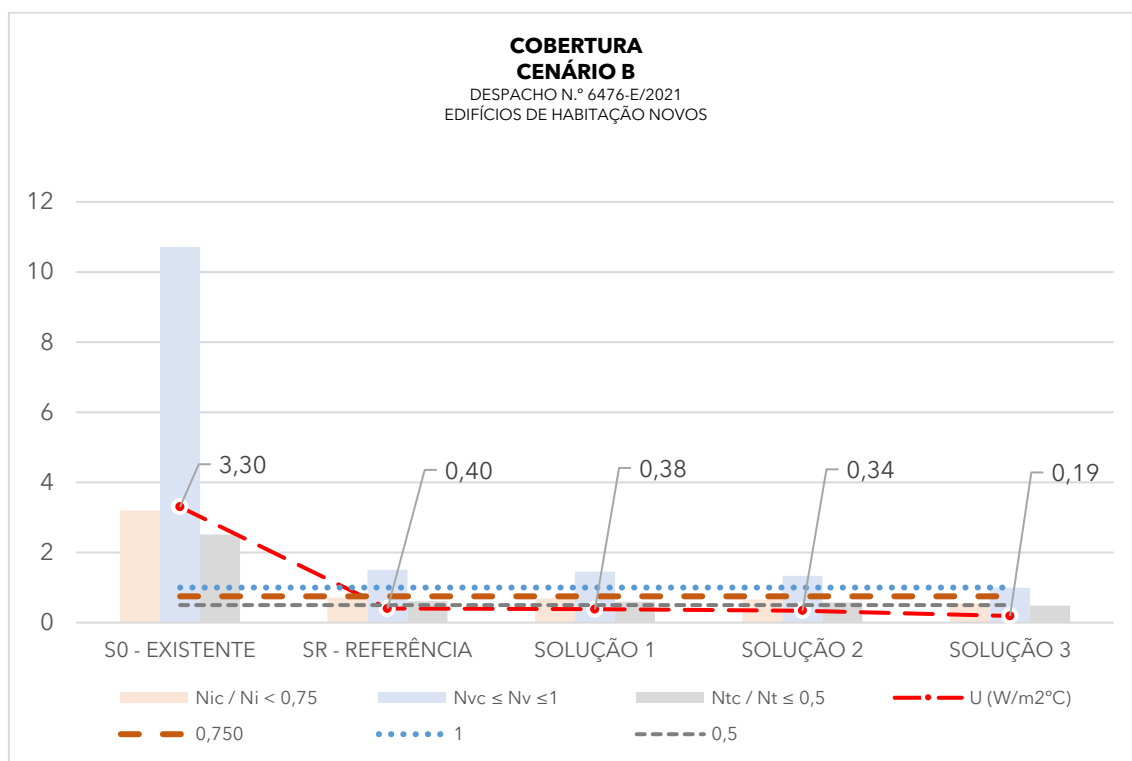


Figura 20 - Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U da Cobertura

Através dos resultados obtidos, verifica-se que as perdas e ganhos de calor ocorridos através da cobertura e as consequentes necessidades de energia estão diretamente relacionadas com as resistências térmicas dos materiais utilizados na sua composição, nomeadamente com a incorporação de isolamento térmico nas soluções 1, 2 e 3. Com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica das soluções para a cobertura verifica-se que todas as necessidades de energia útil N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_{tc} diminuem, representando para todos os cenários um decréscimo das necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento e energia primária.

A solução 3 com um acréscimo significativo de isolamento térmico, combinando as soluções 1 e 2, tem um impacto significativo em todos os indicadores de conforto térmico e desempenho energético, cumprindo com o disposto no Despacho n.º 6476-E/2021 para o Cenário A (requisitos máximos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990) e para o Cenário B (requisitos máximos dos edifícios de habitação novos).

Importa salientar que nesta análise foram considerados os valores máximos admissíveis para as fachadas e vãos envidraçados com valores de U correspondentes a soluções técnicas mais eficientes que as soluções de origem.

Ainda assim, por si só, a intervenção na cobertura com a integração da solução 3 garante:

Tabela 41 – Cenários A e B: Verificação das condições de fronteira para as necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t considerando que 100% da Cobertura está exposta à radiação solar

CENÁRIO A			CENÁRIO B		
Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990		Classe Energética superior ou igual a C Classe Energética inferior a C	Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos	É um Edifício nZEB Não é um Edifício nZEB	
$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_{tc} / N_t \leq 1,5$	$N_{tc} / N_t \leq 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_{tc} / N_t \leq 0,5$
0,541	0,996	0,487	0,541	0,996	0,487
CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE

Ao contrário do verificado para as fachadas, em que as soluções construtivas testadas e parâmetros analisados promoviam a diminuição das necessidades de aquecimento e, simultaneamente, o aumento das necessidades de aquecimento (ou vice-versa).

Para o caso da cobertura, a adoção de valores de U mais baixos reduzem globalmente todas as necessidades de energia o que, do ponto de vista de conforto térmico e desempenho energético, configura soluções construtivas passíveis de serem adotadas eficazmente em ambas as estações sem grandes discrepâncias nas necessidades de energia e com maior garantia de cumprirem com as temperaturas de conforto interior durante o verão e durante inverno.

Para os resultados obtidos considerou-se que sobre a cobertura não incide qualquer sombra, ou seja, não existe qualquer obstrução, sendo $F_s = 1$. Este é um fator relevante no que diz respeito à redução ou aumento dos ganhos de calor através desta envolvente na estação de arrefecimento.

Para o caso de Lisboa, ponderar a necessidade de recorrer ao sombreamento parcial ou total da cobertura pode revelar-se fundamental na medida em que a energia solar acumulada durante a estação de arrefecimento, recebida em plano horizontal (inclinação 0°) e expressa pelo parâmetro $Isol = 840 \text{ kWh/m}^2\text{.ano}$. Este parâmetro é expressivo e representa um incremento de cerca de 40% de energia acumulada se comparado aos valores aferidos para as fachadas com maior $Isol$, nomeadamente as que estão orientadas a Nascente e Poente, $Isol = 500 \text{ kWh/m}^2\text{.ano}$.

Neste pressuposto, foi analisado e verificado o impacto relativo do efeito de sombra na cobertura e qual o seu contributo no balanço global de energia considerando uma obstrução de 50%, $F_s = 0,5$, recorrendo, por exemplo à integração de painéis fotovoltaicos na pendente da cobertura orientada a Sul, obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 42 – Cenários A e B: Verificação das condições de fronteira para as necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t considerando que 50% da cobertura está em sombra

CENÁRIO A			CENÁRIO B		
Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990		Classe Energética superior ou igual a C Classe Energética inferior a C	Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos	É um Edifício nZEB Não é um Edifício nZEB	
$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_t / N_t \leq 1,5$	$N_{ic} / N_i \leq 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_t / N_t \leq 0,5$
0,541	0,62	0,458	0,541	0,62	0,458
CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE

Tabela 43 – Cenários A e B: Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t da Cobertura variando U e considerando que a cobertura não está em sombra ou tem 50% da área total em sombra

Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990					Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		
SOLUÇÃO	U (W/m ² °C) Variável	$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_t / N_t \leq 1,5$	$N_{ic} / N_i < 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_t / N_t \leq 0,5$
S3	0,19	0,541	0,996	0,487	0,541	0,996	0,487
S3 $F_s=0,5$	0,19	0,541	0,62	0,458	0,541	0,62	0,458
		DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI	DIMINUI

Através dos resultados obtidos é possível verificar o impacto que o aumento da área em sombra na cobertura tem no balanço energético global da fração, nomeadamente o contributo para a diminuição das necessidades de energia útil para arrefecimento e necessidades de energia primária.

Os valores de N_{ic} mantêm-se constantes uma vez que o efeito de obstrução não interfere na estação de aquecimento.

As necessidades de energia para arrefecimento da solução 3 (com sombreamento da cobertura a 50%), se comparada com a solução 3 (sem sombreamento), apresenta um decréscimo de 37,6% no consumo de energia necessária utilizar para suprir as necessidades de arrefecimento durante o verão.

Esta estratégia, de fácil implementação (painéis solares, estrutura de sombreamento na cobertura, etc.) é vantajosa e eficiente para dar resposta ao verão moderado a severo que caracteriza a cidade de Lisboa e corresponde à solução técnica que mais se destaca na melhoria das condições de conforto térmico e desempenho energético da fração.

3.4.2.4 *Análise dos Resultados Parciais - Envolvente Opaca*

As necessidades de energia apresentadas anteriormente são importantes e refletem o impacto direto dos parâmetros analisados na garantia das condições de conforto e desempenho da fração em estudo.

Contudo, a eficiência energética desta fração, ou de um qualquer edifício, é garantida através do balanço global dos vários indicadores energéticos, ou seja, entre ganhos e perdas promovidos por todas as envolventes (opaca e envidraçada) e sistemas técnicos que compõem o edifício. Ainda assim, os resultados obtidos na análise sectorial da envolvente opaca - fachadas e cobertura - fornecem inputs importantes quanto ao impacto relativo dos parâmetros de desempenho energéticos mais relevantes para, a partir daí, ser possível combinar uma solução técnica mais adequada à zona climática I1-V2:

i. Fachadas

As soluções técnicas testadas para as fachadas, com vista à melhoria do conforto térmico e desempenho energético da fração, apesar de apresentarem melhorias progressivas na estação de aquecimento com a diminuição dos valores de U , apresentam um agravamento progressivo na estação de arrefecimento ao obstaculizar a transferência do calor retido no interior do espaço para o exterior.

Nenhuma das soluções testadas, consegue garantir o cumprimento das condições de fronteira para todos os indicadores de desempenho *Nvc, Nic e Ntc* da fração, seja aplicando os requisitos máximos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990 - Cenário A - seja o cumprimento dos requisitos máximos para edifícios novos - Cenário B - do Despacho n.º 6476-E/2021.

Os resultados obtidos comprovam que uma intervenção no edifício em estudo dedicada exclusivamente às fachadas, atendendo que se trata de uma fração no último piso, não configura uma solução eficiente do ponto de vista do desempenho energético, sendo manifestamente insuficiente para garantir o conforto interior da fração no verão.

Ainda que, no inverno, as soluções testadas traduzam um impacto positivo, globalmente, revelam-se estratégias ineficazes.

ii. Cobertura

As soluções técnicas apresentadas para a cobertura apresentaram uma melhoria progressiva de todos os indicadores de desempenho. A solução 3, em particular, revelou-se eficaz no verão e no inverno, dando cumprimento aos requisitos máximos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990 - Cenário A - seja o cumprimento dos requisitos máximos para edifícios novos - Cenário B - do Despacho n.º 6476-E/2021.

Adicionalmente, com o sombreamento de 50% da área total da cobertura, obtiveram-se valores otimizados e menos discrepantes de *Nvc, Nic e Ntc* o que, por si só, configura uma solução eficaz para a melhoria do desempenho térmico da fração em estudo.

Ao contrário de uma intervenção nas fachadas, que não traduz uma medida eficiente, a intervenção na cobertura, com o reforço significativo do isolamento térmico, constitui uma estratégia eficaz no cumprimento das temperaturas de conforto interior durante o verão e durante o inverno.

3.4.3 Projeto de Renovação Energética – Envolvente Envidraçada e Parâmetros Característicos

A envolvente envidraçada de um edifício assume-se como uma parte integrante e fundamental no balanço térmico global e de conforto interior dos espaços habitados dada a sua relevância na troca de fluxos de calor entre o interior e o exterior. A ação solar tem um contributo significativo nos ganhos obtidos pela envolvente exterior através dos envidraçados, ainda que com impacto diferente no inverno e no verão.

Esse ganho é considerado favorável durante a estação de aquecimento na medida em que a radiação solar incidente representa uma fonte de calor com efeitos positivos no conforto térmico interior através do aumento da temperatura.

Situação inversa acontece na estação de arrefecimento uma vez que os ganhos solares obtidos através dos envidraçados durante o período do verão poderão originar sobreaquecimento no interior dos espaços habitados e, consequentemente, o aumento dos encargos de energia para arrefecimento artificial dos mesmos quando a ventilação natural se revele insuficiente ou indesejável por questões de segurança e salvaguarda do bem imóvel.

As janelas, enquanto elemento da envolvente de um edifício que separam o espaço interior útil do ambiente exterior, geralmente com temperaturas diferentes, estão sujeitas a diferentes modos de transmissão de calor:

- **Condução Térmica** – traduz a capacidade de uma janela transmitir o calor do exterior para o interior. O coeficiente de transmissão térmica (U_w) é o parâmetro que traduz o ganho ou perda de calor através de um material, neste caso as janelas, devido à diferença entre as temperaturas do ar interior e exterior – quanto menor for o valor deste parâmetro, menores serão as trocas térmicas e melhor será a capacidade de isolamento da janela. A imagem abaixo ilustra os coeficientes de transmissão térmica de diferentes tipos/composições de vidros:

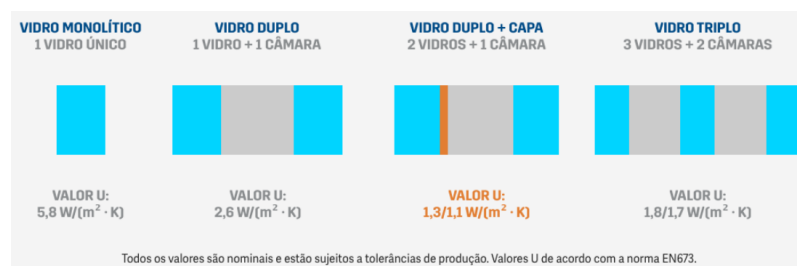


Figura 21 – Coeficientes de transmissão térmica de vários tipos de vidro

- Fator Solar – relação entre a energia da radiação solar que passa para o interior do espaço e a energia exterior que incide na janela. Esta relação é traduzida pelo fator solar do vidro (g_v). Quanto menor for o fator solar, melhor será a proteção contra o sobreaquecimento por radiação solar. A imagem abaixo ilustra as perdas por transmissão.

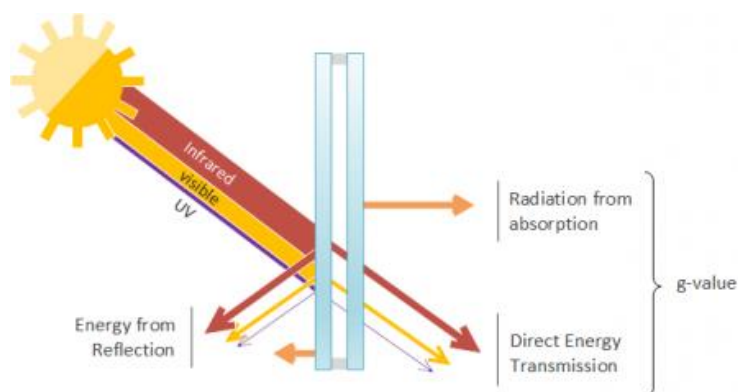


Figura 22 – Radiação solar incidente sobre a envoltura envidraçada

Neste pressuposto, identificando que para a cidade de Lisboa a estação mais crítica corresponde ao verão, tomou-se como ponto de partida a análise do contributo relativo dos envidraçados no balanço energético global da fração no que diz respeito aos parâmetros de conforto, Nic , Niv e Nt . Para tal, procedeu-se à redefinição das soluções de envidraçados face à solução original.

Em primeiro lugar, importa estabelecer os parâmetros máximos legais admissíveis no que diz respeito aos elementos da envoltura envidraçada em edifícios de habitação localizados na zona climática I1-V2:

Tabela 44 – Metodologia para o cálculo dos indicadores de conforto e desempenho para a envoltura envidraçada

LISBOA I1-V2	Vãos Envidraçados	Elementos opacos Verticais		Pontes Térmicas Planas Verticais/ Horizontais	Elementos opacos Horizontais
Parâmetros base / Portaria n.º 138-I/2021		Em contacto com exterior	Em contacto com edifícios	Em contacto com o exterior	Em contacto com o exterior
U ref. (W/m ² °C)	$X_n \leq 2,8$	0,5	0,8	0,9	0,4
Fator solar do vidro g_v / Edifício inércia média	$Y_n \leq 0,56$ A variar	Fixos			

Para efeitos de simplificação de cálculo foram consideradas proteções pelo exterior, FS Global Proteções Móveis=0,04 e uma caixilharia em madeira ou PVC sem quadrícula, com uma fração envidraçada $F_g=0,65$.

A abordagem de cálculo adotada passa por fazer variar os diferentes parâmetros característicos associadas aos vãos envidraçados, nomeadamente: coeficientes de transmissão térmica U e fatores solares do vidro g_v . No que diz respeito ao tipo de caixilho expresso pela variável Fg considerou-se o valor fixo de 0,65 correspondente a uma caixilharia em madeira ou PVC sem quadrícula e a existência de proteções solares exteriores, do tipo persianas em plástico ou metálicas de cor clara, expressa pela variável $g_{T,vc} = 0,04$.

Do seguinte modo:

- 1)** Fazendo variar o coeficiente de transmissão térmica U ($W/m^2\text{°C}$) entre os valores [$U_{max,I1-V2} = 2,80$; $U_n = X_n$]; em que X_n serão os diferentes valores dos coeficientes de transmissão térmica consultados nas fichas técnicas de fabricantes de sistemas de vidros/caixilharia compatíveis com os envidraçados dos edifícios e/ou do documento ITE-50;
- 2)** Fazendo variar o fator solar do vidro g_v entre [$g_{v,max,I1-V2} = 0,56$; $g_{v,n} = Y_n$]; em que Y_n serão os diferentes valores de fatores solares consultados nas fichas técnicas de fornecedores de sistemas de vidros/caixilharia compatíveis com os envidraçados dos edifícios e/ou do documento ITE-50;
- 3)** Mantendo fixos:
 - Proteção pelo exterior do tipo persianas de réguas plásticas ou metálicas de cor clara, $g_{T,vc} = 0,04$, correspondente a uma solução utilizada na construção corrente;
 - Fração envidraçada $Fg = 0,65$ (caixilho em madeira ou PVC sem quadrícula);
 - $U_{paredes} = 0,50$ (máximo admissível);
 - $U_{pontes\ térmicas} = 0,9$ (máximo admissível);
 - $U_{cobertura} = 0,4$ (máximo admissível);

3.4.3.1 Coeficiente de Transmissão Térmica e Fator Solar

i. Coeficiente De Transmissão Térmica

O valor U_{TOTAL} de uma janela depende dos valores U_n dos diferentes materiais que a compõem desde os perfis e o tipo de vidro utilizados. Na Tabela 45 demonstra-se de que forma a alteração do valor de U para valores abaixo do máximo regulamentar para a zona I1-V2 interage com o desempenho energético global da fração ao nível das necessidades de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária. Da tabela abaixo é possível inferir qual o mérito relativo de cada solução testada nas perdas de calor através desta envolvente.

Tabela 45 – Cenários A e B: Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t dos Envidraçados variando U_w

Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990					Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		
SOLUÇÃO $g_v = 0,56$ Fixo	U (W/m ² °C) Variável	$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_{tc} / N_t \leq 1,5$	$N_{ic}/N_i < 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_{tc} / N_t \leq 0,5$
S0	5,10	0,869	1,502	0,684	0,869	1,502	0,869
SR	2,80	0,711	1,714	0,625	0,711	1,714	0,711
S1	2,30	0,678	1,765	0,612	0,678	1,765	0,678
S2	2,00	0,657	1,795	0,605	0,657	1,795	0,657
S3	1,70	0,637	1,827	0,597	0,637	1,827	0,637
S4	1,50	0,624	1,848	0,593	0,624	1,848	0,624
S5	1,30	0,610	1,870	0,588	0,610	1,870	0,610
S6	1,20	0,604	1,880	0,585	0,604	1,880	0,604
		DIMINUI	AUMENTA	DIMINUI	DIMINUI	AUMENTA	DIMINUI

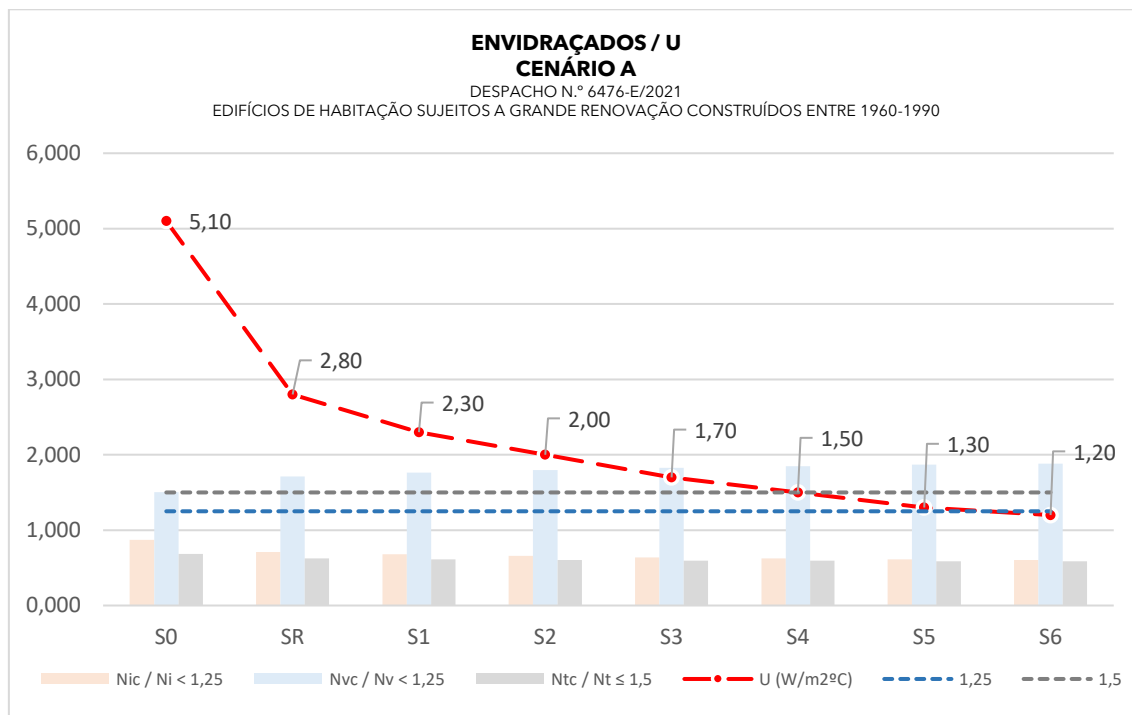


Figura 23 - Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U dos envidraçados

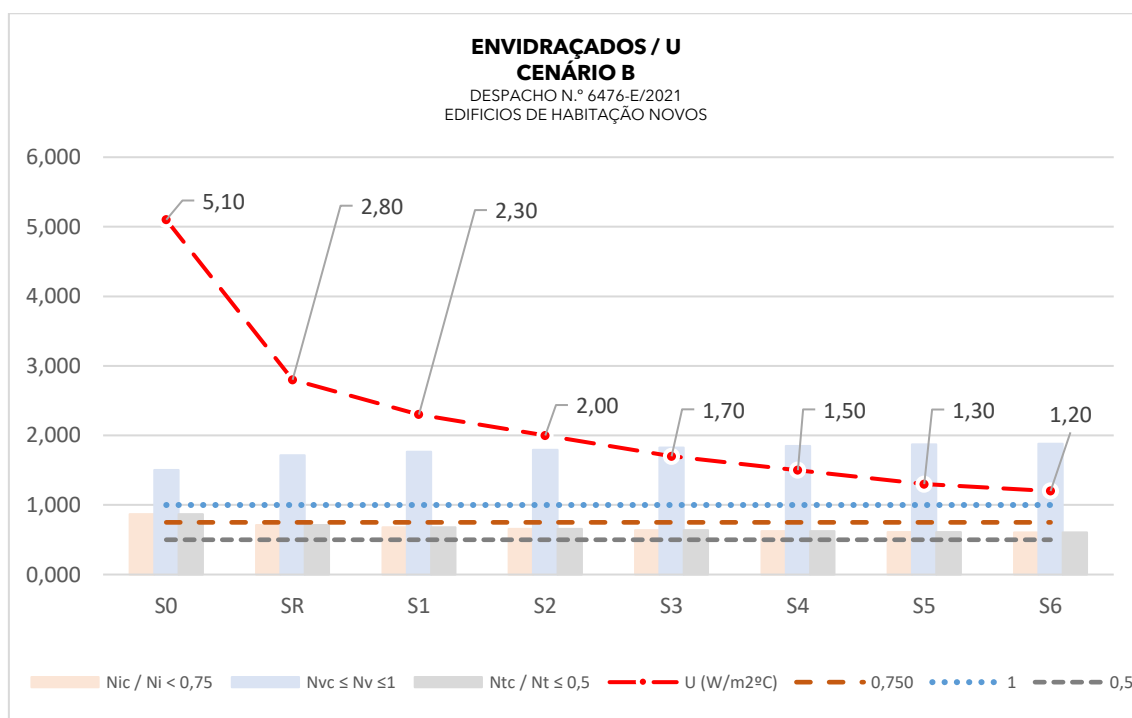


Figura 24 - Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação do valor de U dos envidraçados

Dos resultados obtidos, considerando os requisitos máximos de conforto térmico e desempenho energético para os edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990 e os edifícios de habitação novos, segundo o Despacho n.º 6476-E/2021, é possível concluir:

Cenário A: Edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990

- As necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (***Nic***) diminuem com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica *Uw* dos envidraçados. Nesta estação, a condição $Nic/Ni < 1,25$ é sempre cumprida para todos os coeficientes de transmissão térmica considerados, verificando assim os requisitos de desempenho energético e as necessidades de energia útil para aquecimento. A diminuição do valor de *Uw* permite que, no inverno, existam menos perdas de calor do interior para o exterior, razão pela qual os valores obtidos para o parâmetro *Nic* aumentam com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados.

Neste caso, um valor de *Uw* mais baixo permite, ao longo de um dia de inverno, a acumulação e retenção do calor proveniente da radiação solar no interior dos espaços, garantindo assim, a diminuição das necessidades de energia para aquecimento e melhorando o nível de conforto térmico. A Solução 6, $Uw = 1,20$ é aquela que para a estação de aquecimento promove menos perdas pela envolvente envidraçada sendo, portanto, a que melhor desempenho energético e conforto térmico apresenta para a estação em causa. Os resultados obtidos verificam que a alteração do coeficiente de transmissão térmica para um valor significativamente inferior ao máximo admissível permite reduzir as transferências de calor exterior-interior garantindo, assim, uma solução de envolvente envidraçada mais adequada às exigências na estação de aquecimento.

- O contrário acontece para as necessidades nominais de energia útil para arrefecimento N_{vc} que aumentam com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica U_w dos envidraçados. Nesta estação, a condição de fronteira $N_{vc} \leq N_v \leq 1,25$ nunca é cumprida. Nenhum dos coeficientes de transmissão térmica considerados verificam os requisitos de conforto térmico e desempenho energético traduzidos pelas necessidades nominais de energia útil para arrefecimento do Despacho.
- A diminuição do valor de U_w tem impacto inversamente proporcional ao ocorrido para a estação de aquecimento. Para a estação de arrefecimento, a energia que penetra sob forma de calor no interior dos espaços durante o verão é desfavorável pela concentração e retenção de uma carga térmica elevada no interior da fração. Nesta estação, a solução 6 (mais favorável no inverno) não configura uma solução eficiente no verão dado que um valor de U_w mais baixo não promove as perdas de calor pela envolvente envidraçada consideradas favoráveis. Através dos resultados obtidos, antecipa-se a necessidade de recorrer a sistemas de climatização ou promover uma eficaz ventilação natural dos espaços de forma a debelar o sobreaquecimento no interior da fração durante o verão promovidos pela aplicação de uma solução de envidraçados do tipo da solução 6.
A solução 0, que corresponde à solução de origem, com um coeficiente de transmissão térmica $U_w = 5,1$, corresponderia à solução mais adequada à estação de arrefecimento. Ainda que o valor de U_w seja superior ao máximo admissível é aquela onde ocorrem as maiores perdas, consideradas favoráveis no verão, garantidas por valores de U_w mais elevados.
- As necessidades nominais anuais de energia primária são cumpridas para todos os coeficientes de transmissão térmica U_w considerados.

Os indicadores de desempenho apurados para as diferentes necessidades de energia, N_{ic} , N_{vc} e N_{tc} , considerando a análise do mérito dos diferentes coeficientes de transmissão térmica U_w testados, não configuram uma solução equilibrada dada a discrepância dos resultados obtidos entre as duas estações e pelo agravamento das necessidades de arrefecimento durante o verão.

Os parâmetros de desempenho N_{ic} e N_{tc} são cumpridos apenas para os requisitos máximos de edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990, não cumprindo os requisitos N_{vc} - todos os valores obtidos são superiores ao coeficiente 1,25. No que diz respeito aos edifícios de habitação novos, apenas o parâmetro N_{ic} é cumprido a partir da Solução R, e os parâmetros N_{vc} e N_{tc} não são cumpridos para nenhuma das soluções testadas.

ii. Fator Solar

O Fator Solar, definido pelo parâmetro g_v , representa a totalidade de calor que atravessa a envolvente envidraçada e a escolha de vidros com um maior ou menor fator solar determinará desempenhos energéticos diferentes e, simultaneamente, diferentes graus de conforto no interior dos espaços habitados.

Na Tabela 46 demonstra-se de que forma a alteração do valor g_v para valores abaixo do máximo regulamentar para a zona I1-V2 impactam o desempenho energético global da fração ao nível das necessidades de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária. Da tabela abaixo é possível inferir qual o mérito relativo de cada solução testada nas perdas de calor através desta envolvente.

Tabela 46 - Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t dos Envidraçados variando g_v

Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990					Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		
SOLUÇÃO O U (W/m ² °C) 2,8 Fixo	g_v Variável	$N_{ic} / N_i \leq$ 1,25	$N_{vc} / N_v \leq$ 1,25	$N_{tc} / N_t \leq$ 1,5	$N_{ic}/N_i < 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_{tc} / N_t \leq 0,5$
S0	0,87	0,601	1,956	0,590	0,601	1,956	0,590
SR	0,56	0,711	1,714	0,625	0,711	1,714	0,625
S1	0,45	0,754	1,630	0,639	0,754	1,630	0,639
S2	0,35	0,795	1,555	0,653	0,795	1,555	0,653
S3	0,25	0,837	1,480	0,667	0,837	1,480	0,667
S4	0,15	0,880	1,407	0,682	0,880	1,407	0,682
		AUMENTA	DIMINUI	AUMENTA	AUMENTA	DIMINUI	AUMENTA

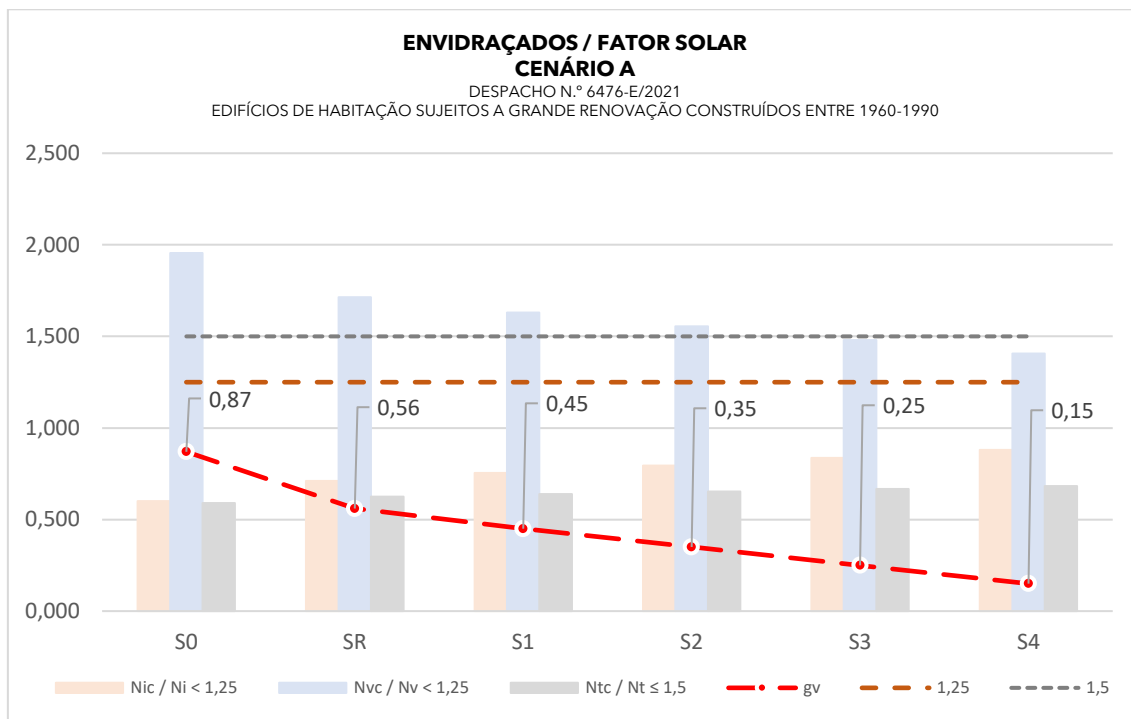


Figura 25 - Cenário A: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de gV

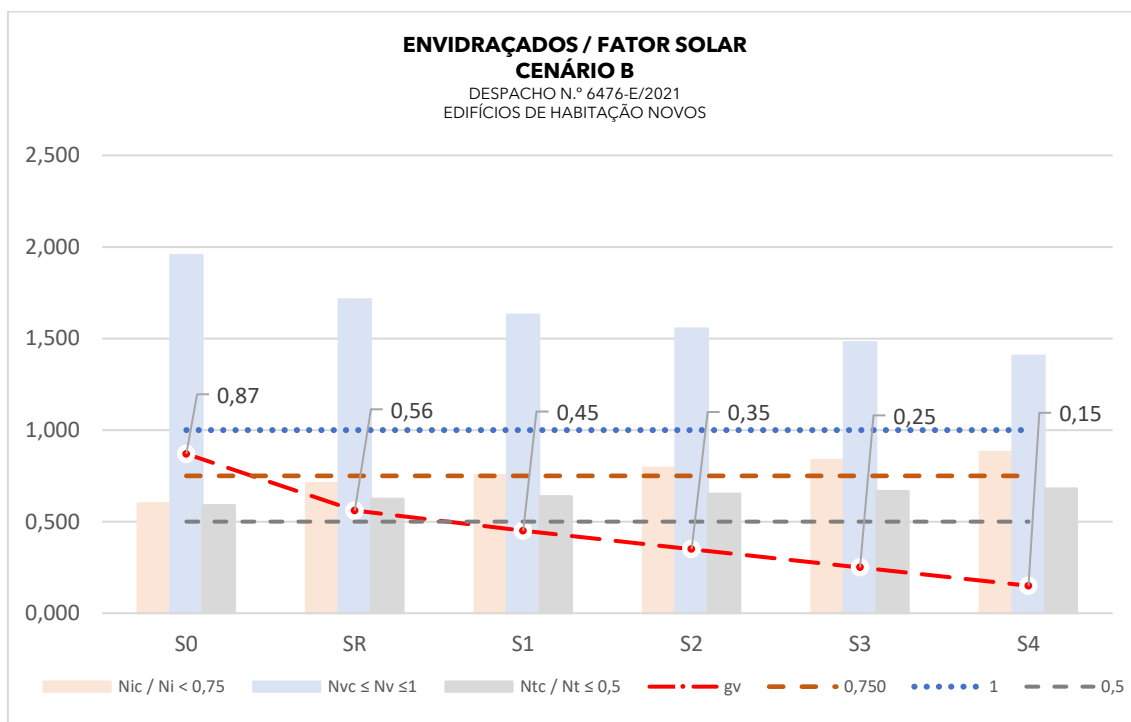


Figura 26 - Cenário B: Relação entre as necessidades nominais de energia útil e a variação de gV

Dos resultados obtidos, considerando os requisitos máximos de conforto térmico e desempenho energético para os edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990 e os edifícios de habitação novos, segundo o Despacho n.º 6476-E/2021, é possível concluir:

Cenário A: Edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990

- As necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (***Nic***) aumentam com a diminuição do fator solar do vidro. Esta situação seria expectável na medida em que um fator solar mais baixo implica uma menor entrada de radiação solar no interior do espaço, configurando uma situação prejudicial no inverno quando os ganhos solares obtidos sob a forma de calor através dos envidraçados são considerados positivos por promoverem um aumento da temperatura no interior dos espaços habitados.
- A solução 4 (menor fator solar, $gv = 0,15$) corresponde à solução mais desfavorável no inverno, $\frac{Nic}{Ni} = 0,88$, ao promover maiores necessidades de energia para aquecimento se comparada com as demais soluções testadas. Os resultados da solução 4 permitem antecipar a necessidade de aumentar o consumo de energia através de sistemas de climatização/aquecimento, por exemplo, de forma a garantir a temperatura de conforto interior e a suprir as necessidades de aquecimento provocadas pela adoção de um fator solar baixo e a consequente diminuição dos ganhos solares obtidos através da envolvente envidraçada.

As soluções 0 e R (maior fator solar, $gv = 0,85$ e $0,56$) são aquelas que conduzem a maiores ganhos solares e de calor através dos envidraçados, configurando menores necessidades de energia para aquecimento e, consequentemente, as soluções que dão maiores garantias de uma melhor temperatura interior de conforto - ainda que a solução 0 apresente um fator solar acima do máximo admissível. Na estação de aquecimento, todas as soluções testadas cumprem com os parâmetros de conforto térmico e desempenho energético. Todos os valores obtidos estão abaixo da condição de fronteira $Nic / Ni \leq 1,25$.

- Inversamente, as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}) diminuem com a diminuição do fator solar do vidro, situação também expectável na medida em que um fator solar mais baixo permite bloquear a entrada da radiação e consequentemente o calor, inibindo assim o aumento de temperatura no interior da fração durante os meses mais quentes.
- Na estação de aquecimento a diminuição do fator solar, conforme verificado pelas soluções 3 e 4, garantem um balanço energético mais favorável por, hipoteticamente, evitarem o sobreaquecimento dos espaços e o consequente aumento das necessidades de energia para arrefecimento.
As soluções 0 e R (maior fator solar, g_v), ao contrário do que acontece no inverno, são aquelas que configuram soluções mais desfavoráveis na estação de arrefecimento ao permitir uma maior entrada de calor. Ainda assim, na estação de arrefecimento, nenhuma das soluções testadas cumpre com os parâmetros de conforto térmico e de desempenho energético. Todos os valores obtidos estão acima da condição de fronteira $N_{vc} / N_v \leq 1,25$
- No que diz respeito às necessidades nominais anuais de energia primária, a alteração do fator solar do vidro evoluiu em proporção inversa aos valores de N_{tc} . Quando o fator solar diminui o valor de N_{tc} aumenta. Todas as soluções testadas cumprem as condições de fronteira para as necessidades de energia primária – os valores obtidos estão abaixo $N_{tc} / N_t \leq 1,5$

No que diz respeito ao Cenário B – edifícios de habitação novos – a condição de fronteira $N_{ic} / N_i \leq 0,75$ é cumprida com as soluções 0 e R. No que diz respeito às necessidades de energia para arrefecimento e energia primária nenhuma das soluções testadas cumpre com os parâmetros N_{vc} e N_{tc} .

3.4.3.2 Análise dos Resultados parciais - Envolvente Envidraçada

As necessidades de energia apresentadas anteriormente são importantes e refletem o impacto direto dos parâmetros analisados, U e g_v , nas condições de conforto da fração em estudo. Contudo, importa ressaltar que a eficiência energética desta fração, ou de um qualquer edifício, é garantida através do balanço global dos vários indicadores energéticos, ou seja, entre ganhos e perdas promovidos por todas as envolventes (envidraçada e opaca) e sistemas técnicos instalados no edifício. Ainda assim, os resultados obtidos nesta análise sectorial fornecem inputs importantes quanto ao impacto relativo dos parâmetros mais relevantes da envolvente envidraçada e permite concluir que as variações introduzidas sectorialmente não respondem favoravelmente a ambas as estações de aquecimento e arrefecimento, dado que:

- A diminuição do valor de U reduz as necessidades de energia para aquecimento no inverno e aumenta as necessidades de energia para arrefecimento no verão;
- A diminuição do fator solar g_v , aumenta as necessidades de energia para aquecimento no inverno e reduz as necessidades de energia para arrefecimento no verão;

Neste sentido, a opção por uma caixilharia que combine de forma equilibrada o coeficiente de transmissão térmica U e o fator solar g_v poderá ser a estratégia indicada para:

- Garantir uma solução eficiente para a zona climática I1-V2, sendo que a severidade do verão é um fator determinante na análise;
- Promover um maior equilíbrio entre perdas e ganhos para ambas as estações;
- Evitar grandes discrepâncias entre as necessidades nominais anuais de energia útil durante o período do verão e durante o período de inverno;

Da análise dos resultados parciais obtidos para cada um dos parâmetros testados não é possível combinar valores de U e g_v que consigam, por si só, garantir a melhoria do conforto térmico e desempenho energético da fração em estudo e, com isso, cumprir as condições de fronteira tendo por base requisitos do Despacho n.º 6476-E/2021 para o Cenário A, edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990.

Importa lembrar que os indicadores de desempenho considerados para a envolvente opaca são os valores máximos de referência indicados no Despacho n.º 6476-E/2021 para edifícios de habitação sujeitos a grandes renovações e edifícios novos (Cenários A e B). Neste pressuposto, não sendo considerada nenhuma intervenção na envolvente opaca, a substituição da caixilharia como estratégia de melhoria do conforto térmico e desempenho energético da fração revela-se insuficiente. Ainda assim, este é um tipo de intervenção corrente e expedita, que depende quase exclusivamente da vontade e liquidez financeira do proprietário da fração, mas que, na perspetiva de atingir uma melhoria significativa das condições de conforto térmico e desempenho energético, é comprovadamente limitada.

3.4.3.3 Proteções Solares Interiores/Exteriores

A par dos parâmetros característicos de envidraçados U e g_v analisados anteriormente, também é essencial a preconização de soluções de proteção solar, pelo interior e/ou exterior, capazes de coadjuvar no balanço global de energia da fração em estudo durante a estação de aquecimento. De acordo com os dados do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, a existência de proteções solares pode reduzir a temperatura interior entre 1°C a 10°C, sendo que as proteções solares exteriores mais eficazes evitam os ganhos de calor até 96%, enquanto as proteções interiores evitam apenas 62%. O conjunto vidro e proteção solar deve ser adaptável, permitindo captar mais calor no inverno e reduzir a exposição solar no verão.

Os cuidados na proteção solar devem ser tanto maiores quanto maior for a área envidraçada. Neste caso, também foi âmbito da análise o contributo relativo das proteções solares interiores e/ou exterior e do impacto de diferentes soluções nas necessidades nominais anuais de energia útil e consequente conforto térmico dos espaços interiores.

A abordagem de cálculo adotada passa por testar diferentes soluções de proteções solares, exteriores e interiores, mantendo fixos os parâmetros:

- Coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados $U_{I1-V2} = 2,80$ (máximo admissível);
- Fator solar do vidro $g_v = 0,56$

- Fração envidraçada $F_g = 0,65$ (caixilho em madeira ou PVC sem quadrícula);
- $U_{paredes} = 0,50$ (máximo admissível);
- $U_{pontes\ térmicas} = 0,9$ (máximo admissível);
- $U_{cobertura} = 0,4$ (máximo admissível);

Tabela 47 – Valores correntes do fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar g_{Tvc} , Despacho (extrato) n.º 15793-K/3013

Tipo de Proteção		g_{Tvc}					
		Vidro Simples			Vidros Duplos		
		Clara	Média	Escura	Clara	Média	Escura
Proteções exteriores	Portada de madeira	0,04	0,07	0,09	0,03	0,05	0,06
	Persiana de réguas de madeira	0,05	0,08	0,10	0,04	0,05	0,07
	Persiana de réguas metálicas ou plásticas	0,07	0,10	0,13	0,04	0,07	0,09
	Estore veneziano de lâminas de madeira	-	0,11	-	-	0,08	-
	Estore veneziano de lâminas metálicas	-	0,14	-	-	0,09	-
	Lona opaca	0,07	0,09	0,12	0,04	0,06	0,08
	Lona pouco transparente	0,14	0,17	0,19	0,10	0,12	0,14
	Lona muito transparente	0,21	0,23	0,25	0,16	0,18	0,2
Proteções interiores	Estores de lâminas	0,45	0,56	0,65	0,47	0,59	0,69
	Cortinas opacas	0,33	0,44	0,54	0,37	0,46	0,55
	Cortinas ligeiramente transparentes	0,36	0,46	0,56	0,38	0,47	0,56
	Cortinas transparentes	0,38	0,48	0,58	0,39	0,48	0,58
	Cortinas muito transparentes	0,70	-	-	0,63	-	-
	Portadas opacas	0,30	0,40	0,50	0,35	0,46	0,58
	Persianas	0,35	0,45	0,57	0,40	0,55	0,65
	Proteção entre dois vidros: estore veneziano, lâminas delgadas	-	-	-	0,28	0,34	0,40

Tabela 48 – Cálculo das necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t dos Envidraçados variando g_{Tvc}

Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990					Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		
SOLUÇÃO	g_{Tvc}	$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_t / N_t \leq 1,5$	$N_{ic}/N_i < 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_t / N_t \leq 0,5$
E-S1 / Base	0,040	0,711	1,714	0,625	0,711	1,714	0,625
E-S2	0,090	0,711	1,727	0,625	0,711	1,727	0,625
E-S3	0,120	0,711	1,735	0,626	0,711	1,735	0,626
I-S1	0,280	0,711	1,778	0,630	0,711	1,778	0,630
I-S2	0,350	0,711	1,796	0,631	0,711	1,796	0,631
I-S3	0,580	0,711	1,858	0,636	0,711	1,858	0,636
--		AUMENTA	AUMENTA	--	AUMENTA	AUMENTA	AUMENTA

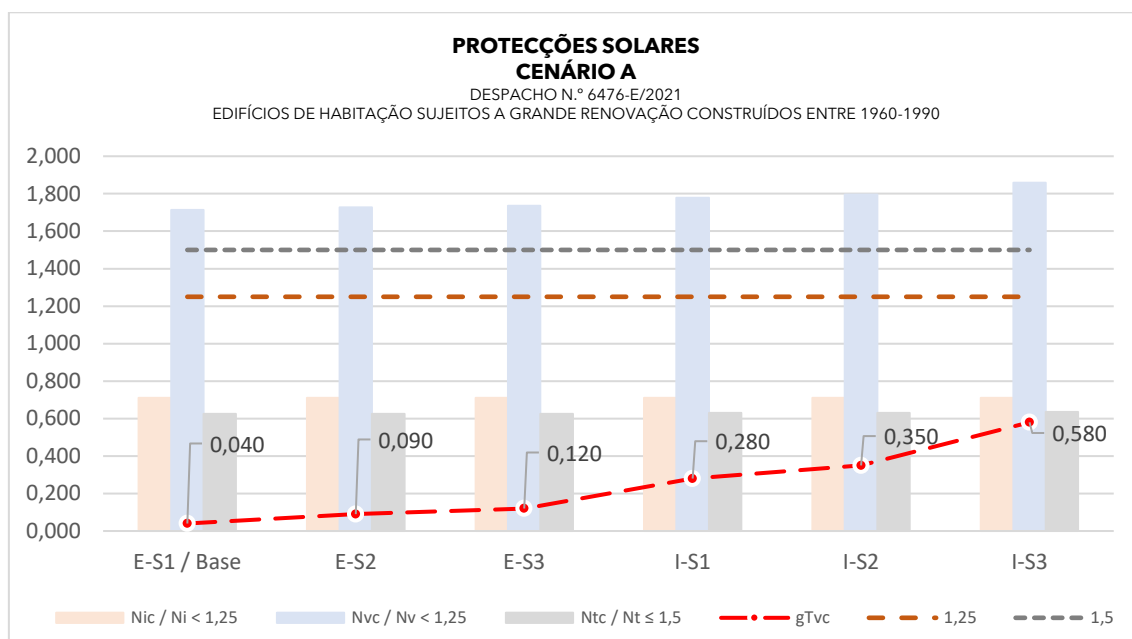


Figura 27 - Cenário A: Fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar gT_{vc} , gV

Dos resultados obtidos, verifica-se que é recomendável a utilização de proteções solares como estratégia mitigadora da entrada de calor durante a estação de arrefecimento, ainda que, por si só, as proteções solares tenham um efeito limitado para a situação em estudo que considera para todos os outros parâmetros de análise de desempenho os valores máximos admissíveis para a zona I1-V2.

Ainda assim, é possível confirmar que a proteção solar exterior E-S1 do tipo persianas metálicas ou plásticas de cores claras têm o melhor desempenho para todas as soluções analisadas, ainda que nenhuma das soluções cumpra a condição de fronteira $N_{vc} / N_v \leq 1,25$, Cenário A - edifícios sujeitos a grandes renovações, conforme Despacho n.º 6476-E/2021.

Genericamente, as soluções aplicadas pelo exterior (E-S1 a E-S3) garantem sempre algum grau de proteção com impacto nos valores de N_{vc} .

Inversamente, as soluções aplicadas pelo interior não têm um papel tão relevante na diminuição das necessidades de energia para arrefecimento sendo que para todas as soluções testadas, o valor máximo admissível foi sempre ultrapassado apontando para a necessidade de um acréscimo de medidas capazes de garantir temperaturas de conforto interior durante o verão.

Apesar de relevante, a integração de sistemas de proteção solar deverá estar devidamente articulado com os parâmetros a adotar para o coeficiente de transmissão térmica e fator solar dos envidraçados de forma que o conjunto possa, de forma integrada, promover a redução das necessidades de energia para arrefecimento, seja através de perdas de calor pela envolvente e/ou através do bloqueio da radiação solar incidente.

3.5 ABORDAGEM INTEGRADA PARA A RENOVAÇÃO PROFUNDA E CONCLUSÕES

Nos pontos anteriores a abordagem seguida para a quantificação das necessidades nominais anuais de energia útil N_{ic} e N_{vc} e energia primária N_t tiveram como racional a análise setorial da envolvente opaca e envidraçada. Para cada uma destas envolventes foram testados os indicadores de desempenho energético diretamente relacionados com a envolvente em causa e fixados os restantes parâmetros de análise em conformidade com as condições de fronteira definidas pela Portaria n.º 138-I/2021 aplicáveis à zona I1-V2. O edifício em estudo foi construído em 1960 pelo que importa referir que foram considerados e analisados dois cenários de renovação profunda: A) o cenário que teve por objetivo cumprir os parâmetros fixados no Despacho n.º 6476-E/2021 para renovações de edifícios construídos entre 1960 e 1990; B) o cenário que teve por objetivo confirmar se as soluções preconizadas para a envolvente opaca e envidraçada têm potencial para cumprir as condições de fronteira do mesmo Despacho, aplicáveis à construção de edifícios novos e se o edifício em estudo é passível de ser convertido num edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB). Esta estratégia de análise, simplificada e expedita, permitiu perceber o mérito relativo de cada solução construtiva analisada no conforto térmico e desempenho energético da fração em estudo e verificar quais os indicadores com maior impacto no balanço energético. A zona climática é um aspeto determinante na escolha e combinação das soluções construtivas a adotar para cada uma das envolventes do edifício, na medida em que deverão dar resposta eficiente e equilibrada às necessidades de conforto interior durante o verão e durante o inverno.

No caso da cidade de Lisboa, I1-V2, antecipou-se que o verão, pela sua severidade moderada a alta, seria a estação que mais condicionaria a escolha das soluções construtivas a adotar. Este pressuposto foi sendo confirmado pelos resultados obtidos. A estação de arrefecimento (verão) revelou-se aquela onde se obteve, em maior número de parâmetros analisados, maiores necessidades de energia útil para garantir a temperatura de conforto interior. Na comparação dos resultados obtidos para ambas as estações, verificaram-se discrepâncias significativas entre os valores de N_{ic} e N_{vc} que apontavam, na maioria dos parâmetros analisados, para soluções potencialmente mais eficientes no inverno e potencialmente menos eficientes no verão, e vice-versa.

Com exceção das soluções construtivas testadas para a cobertura (envolvente opaca horizontal), qualquer uma das restantes análises parciais, fachadas (envolvente opaca vertical) e envolvente envidraçada, apesar de permitirem avaliar a tendência de aumento ou diminuição das necessidades nominais de energia para aquecimento, arrefecimento e energia primária, não constituíram, individualmente, medidas eficazes para o cumprimento das condições de fronteira para cada estação. A Solução 3, preconizada para a cobertura, revelou-se eficiente no cumprimento das condições de fronteira para o caso de edifícios construídos entre 1960-1990 e para edifícios novos. Ainda assim, esta solução beneficiaria exclusivamente a fração em análise (último piso), pelo que, na perspetiva do desempenho energético global do edifício, esta intervenção teria uma abrangência reduzida.

Assim sendo, na perspetiva de uma renovação profunda, a solução otimizada para dar resposta à zona climática I1-V2, deverá combinar as melhores soluções construtivas oportunamente analisadas e testadas para a envolvente opaca e envidraçada, tendo por objetivo último confirmar a viabilidade das hipóteses dos Cenários A e B:

- Cenário A - intervenção profunda que cumpre/tem potencial para cumprir os parâmetros fixados no Despacho n.º 6476-E/2021 para grandes renovações de edifícios construídos entre 1960 e 1990;
- Cenário B - intervenção profunda que cumpre/têm potencial para cumprir os parâmetros fixados no Despacho n.º 6476-E/2021, aplicáveis à construção de edifícios novos, e, cumulativamente se o edifício em estudo é passível de ser convertido num edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB);

Para o efeito, foram combinadas as seguintes soluções construtivas testadas para cada envolvente:

Tabela 49 – Síntese das soluções construtivas para as Envolventes Opaca e Envidraça a testar

ENVOLVENTE	Solução	Composição	U (W/m ² °C)	Critério
ENVOLVENTE EXTERIOR OPACA	ZONA CORRENTE Solução 1 Sistema Fachada Ventilada	Fachada Original / Zona Corrente + Sistema Fachada Ventilada Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; e caixa de ar com 20 mm de espessura; revestimento exterior a painéis de resinas fenólicas com 10 mm;	0,32	A testar
	PONTES TÉRMICAS PLANAS Solução 1 Sistema Fachada Ventilada	Fachada Original / PTP + Sistema Fachada Ventilada Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura; e caixa de ar com 20 mm de espessura; revestimento exterior a painéis de resinas fenólicas com 10 mm;	0,37	A testar
	COBERTURA Solução 3	Cobertura Original + Solução 1 Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura sobre estrutura em OSB a acompanhar a pendente com 25 mm de espessura; + Solução 2 Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura sobre estrutura CLT com 60 mm sobre esteira;	0,19	A testar
ENVOLVENTE EXTERIOR ENVIDRAÇADA	SOLUÇÃO 3 <i>U_w</i> (W/m ² °C)	Solução intermédia com <i>N_{vc}</i> – <i>N_{iv}</i> com menor discrepância;	1,70	A testar
	SOLUÇÃO 2 <i>g_v</i>	Solução intermédia com <i>N_{ic}</i> – <i>N_v</i> menos discrepante;	0,35	A testar
	PROTEÇÕES SOLARES SOLUÇÃO E-S1	Persianas metálicas ou plásticas cor clara;	0,04	A testar

ENVOLVENTE INTERIOR OPACA	Reforço da envolvente interior opaca, nomeadamente as áreas de comuns (corredores de acesso às frações):			
	INCREMENTO ADICIONAL	Isolamento do tipo poliestireno extrudido com 80 mm de espessura sobre parede interior existente; acabamento a painéis de resinas fenólicas 15 mm;	0,35	A testar

Tabela 50 - Verificação das condições de fronteira para as necessidades nominais de energia N_{ic} , N_{vc} e energia primária N_t para Cenários A e B considerando a combinação das soluções construtivas mais eficientes para as Envolventes Opaca e Envidraçada

CENÁRIO A			CENÁRIO B		
Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990		Classe Energética superior ou igual a C Classe Energética inferior a C	Despacho n.º 6476-E/2021 Requisitos dos edifícios de habitação novos		É um Edifício nZEB Não é um Edifício nZEB
$N_{ic} / N_i \leq 1,25$	$N_{vc} / N_v \leq 1,25$	$N_{tc} / N_t \leq 1,5$	$N_{tc} / N_t \leq 0,75$	$N_{vc} / N_v \leq 1$	$N_{tc} / N_t \leq 0,5$
0,487	0,558	0,428	0,487	0,558	0,428
CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE	CUMPRE

Através dos resultados da Tabela 50, é possível concluir que a combinação das soluções identificadas para a envolvente opaca (interior e exterior) para a envolvente envidraçada melhora os níveis de desempenho energético do edifício se comparada apenas com cada uma das análises sectoriais testadas nos subcapítulos anteriores.

Os valores obtidos na

Tabela 50 verificam as condições de fronteira do Despacho n.º 6476/2021, para edifícios de habitação sujeitos a grandes renovações e edifícios novos, Cenários A e B, e guardam uma margem significativa dos valores máximos admissíveis.

No balanço de energia global do edifício, todas as soluções construtivas e respetivos parâmetros de análise têm uma influência cumulativa no conforto térmico da fração traduzida pelas necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e energia primária. Neste caso, a solução integrada que combina a solução intermédia para os envidraçados e a solução intermédia para envolvente opaca traduziu-se na redução, cumulativa, da energia necessária para aquecimento, arrefecimento e nas necessidades de energia primária.

Ainda que possa haver necessidade de recorrer a meios alternativos para garantir um maior conforto e colmatar necessidades de aquecimento e arrefecimento pontuais, através de algum mecanismo de climatização, por exemplo, considera-se que a solução construtiva apresentada poderá dar uma resposta bastante favorável e estável para ambas as estações sem comprometer gravemente o conforto térmico e desempenho energético da fração durante o verão ou durante o inverno.

Neste caso, a solução não só cumpre o Cenário A como cumpre o Cenário B e verifica-se a possibilidade de o edifício em estudo ser convertido num edifício nZEB recorrendo a estratégias passivas.

As figuras 28 e 29 são um resultado possível para a renovação profunda do edifício analisado.

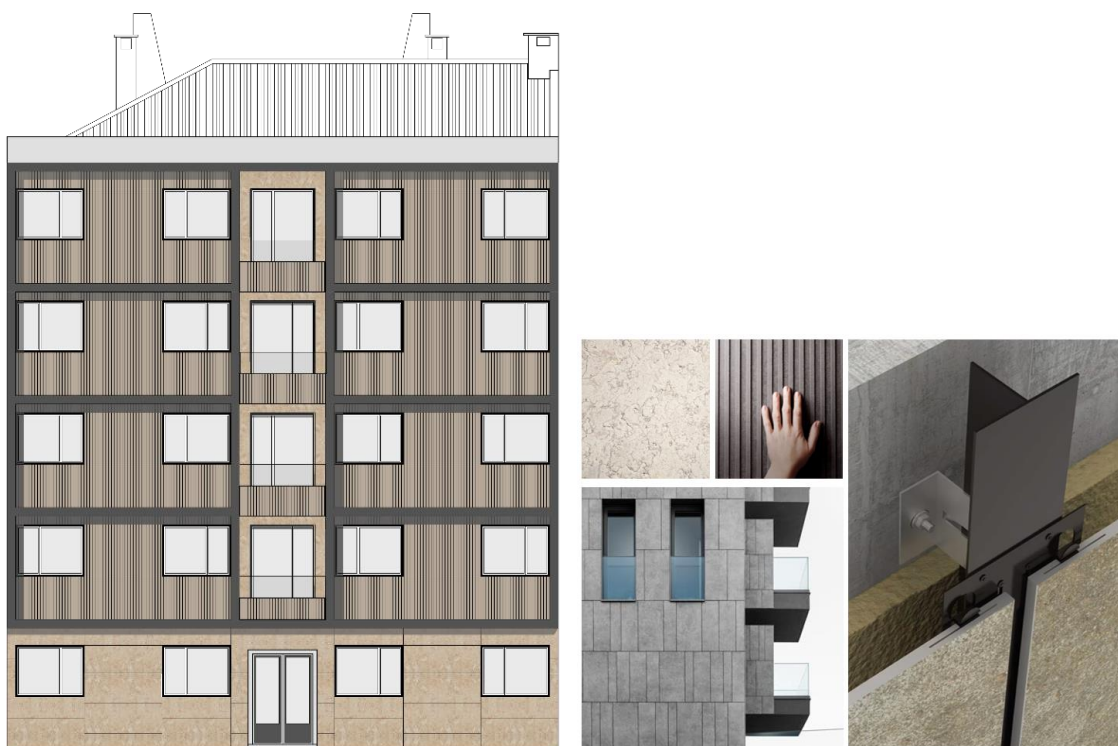


Figura 28 – Alçado Principal Sul proposto (Esquerda), materiais e soluções propostas para a renovação (Direita)



Figura 29 - Alçado Posterior Norte proposta (Esquerda) e Alçado Lateral Poente proposta (Direita)

4. CONCLUSÃO DO ESTUDO

O presente trabalho teve como principal objetivo testar a possibilidade de converter um edifício existente, construído na década de 1960, num edifício com necessidades quase nulas de energia, nZEB. Para o efeito procedeu-se à análise de várias soluções construtivas aplicadas à envolvente opaca e envidraçada e calculados os principais indicadores de conforto e desempenho, *Nic*, *Niv*, *Nt*, para uma fração localizada no último piso do edifício.

Numa primeira fase, foram testadas, individualmente, várias soluções para a envolvente opaca – fachadas e cobertura – e envolvente envidraçada.

Os resultados obtidos para cada uma das envolventes, quando analisados individualmente, não traduziram melhorias significativas conducentes ao cumprimento dos parâmetros de conforto térmico e desempenho energético conforme exigidos pela legislação em vigor.

Não obstante, a cobertura, quando analisada individualmente, revelou cumprir todos os requisitos de conforto térmico e desempenho energético para o Cenário A, relativo a edifícios de habitação sujeitos a grande renovação construídos entre 1960-1990, e para o Cenário B, para edifícios de habitação novos, conforme o Despacho n.º 6476-E/2021. Ainda assim, seria uma estratégia que, apesar do seu mérito no cumprimento dos parâmetros *Nic*, *Niv*, *Nt*, apenas beneficiaria diretamente as duas frações localizadas no último andar do edifício.

Nesta primeira fase de análise comprovaram-se alguns dos pontos abordados no Capítulo 2, i.e., as intervenções pontuais e independentes em edifícios existentes têm um impacto reduzido a moderado no balanço global de energia.

Por outro lado, os resultados obtidos através da combinação das soluções construtivas propostas mais adequadas à zona climática de Lisboa, I1-V2, traduziram melhorias significativas nos parâmetros analisados sendo, inclusivamente, capazes de converter o edifício em estudo, altamente ineficiente, num edifício com necessidades quase nulas de energia recorrendo apenas a soluções passivas.

Nesta segunda fase da análise, foi possível deduzir que num cenário de renovação profunda, no qual são aplicadas as soluções construtivas propostas para fachadas, cobertura e envidraçados, houve uma melhoria significativa nas condições de conforto térmico e desempenho energético do edifício.

Ainda assim, e conforme referido no Capítulo 2, existem barreiras de ordem diversa à implementação e operacionalização deste tipo de estratégia integrada.

A opção por intervenções no parque edificado residencial, no contexto de uma renovação profunda, implica a mobilização de recursos e meios - técnicos, financeiros e humanos - capazes de ultrapassar os constrangimentos associados a intervenções desta natureza, escala e impacto.

Por outro lado, num período em que se perspetiva uma transformação progressiva e significativa do parque edificado existente assente nos modelos operativos estabelecidos pelas Diretivas Europeias e Políticas Nacionais, revela-se urgente a capacitação de meios e recursos capazes de dar resposta efetiva ao objetivo da descarbonização do parque edificado existente até 2050. O PRR é um instrumento estratégico da política pública do país que tem como objetivo implementar um conjunto de reformas e investimentos que pode permitir ao país aumentar a competitividade da sua economia e reforçar a convergência com a Europa ao longo da próxima década.

No âmbito da Transição Climática, destaca-se a componente relativa à “Eficiência Energética em Edifícios” que prevê um investimento global de 610 M€, dos quais 300 M€ são destinados à eficiência energética de edifícios residenciais.

Neste âmbito do Fundo Ambiental, “pretende-se a promoção de investimentos numa significativa vaga de renovação energética de edifícios residenciais, o fomento da eficiência energética e de recursos, o reforço da produção de energia de fontes renováveis em regime de autoconsumo e o combate à pobreza energética”.

A ação que compreende as “melhorias passivas ao nível da envolvente, através por exemplo, do isolamento térmica das paredes, coberturas e dos envidraçados” assume particular interesse na ótica do desenvolvimento futuro deste estudo nomeadamente na quantificação das soluções propostas, na análise da viabilidade económica de uma intervenção profunda deste tipo e na concretização e operacionalização de projetos, que como este, estejam focados na renovação profunda de edifícios existentes.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética (Texto relevante para efeitos do EEE). Jornal Oficial da União Europeia: L 156/75. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32018L0844>

[2] Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019 de 1 de julho da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República: I série, N.º 123. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em www.dre.pt.

[3] Resolução do Conselho de Ministros 53/2020 de 10 de julho da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República: I série, N.º133. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em www.dre.pt.

[4] Parecer do Comité Económico e Social Europeu «Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Impulsionar uma Vaga de Renovação na Europa para tornar os edifícios mais ecológicos, criar emprego e melhorar as condições de vida» de 30 março 2021. Jornal Oficial da União Europeia: C 155/73. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020AE4884>

[5] Resolução do Conselho de Ministros 8-A/2021 de 3 de fevereiro da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República: I série, N.º23. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em www.dre.pt.

[6] Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro de 2020 do Ministério do Ambiente e Ação Climática. Diário da República: I série, N.º23. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em www.dre.pt.

- [7] Keane, M., Goggins, J., Hajdukiewicz, M., & Sheikh Zuhaib. (2016). Diagnostics and intervention methods for façade retrofit of post-WWII non-domestic buildings in Europe for energy efficiency. <https://doi.org/10.13025/s8c88p>
- [8] Europe's buildings under the microscope: a Vountry-by-country review of the energy performance of buildings. (2011). Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf
- [9] Decreto-Lei n.º 40/90 de 6 de fevereiro de 1990 (Revogado) do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Diário da República n.º 31/1990: I série. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em www.dre.pt.
- [10] Instituto Nacional de Estatística - Censos 2021 (2021). O que nos dizem os Censos sobre a habitação. Acedido a 10 de janeiro 2023. Disponível em www.ine.pt
- [11] Österbring, M., Camarasa, C., Nägeli, C., Thuvander, L., & Wallbaum, H. (2019). Prioritizing deep renovation for housing portfolios. *Energy and Buildings*, 202, 109361. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109361>
- [12] Fotiou, Vita, & Capros. (2019). Economic-Engineering Modelling of the Buildings Sector to Study the Transition towards Deep Decarbonisation in the EU. *Energies*, 12(14), 2745. <https://doi.org/10.3390/en12142745>
- [13] Reducing carbon emissions over the life of a building: opportunities in the 2022 EPBD recast. (2022). BPIE - Buildings Performance Institute Europe. <https://www.bpie.eu/publication/reducing-carbon-emissions-over-the-life-of-a-building-opportunities-in-the-2022-epbd-recast/>
- [14] Deep Renovation: Shifting from exception to standard practice in EU Policy. (2021). BPIE - Buildings Performance Institute Europe. <https://www.bpie.eu/publication/deep-renovation-shifting-from-exception-to-standard-practice-in-eu-policy/#>

- [15] Lynn, T., Rosati, P., Egli, A., Krinidis, S., Angelakoglou, K., Sougkakis, V., Tzovaras, D., Kassem, M., Greenwood, D., & Doukari, O. (2021). RINNO: Towards an Open Renovation Platform for Integrated Design and Delivery of Deep Renovation Projects. *Sustainability*, 13(11), 6018. <https://doi.org/10.3390/su13116018>
- [16] Recomendação (UE) 2019/786 da Comissão de 8 de maio de 2019 relativa à renovação dos edifícios. *Jornal Oficial da União Europeia*: L 127/34. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2019:127:FULL>
- [17] D'Agostino, D., Tzeiranaki, S. T., Zangheri, P., & Bertoldi, P. (2021). Assessing Nearly Zero Energy Buildings (NZEBs) development in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100680>
- [18] Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU: final report. (2019). Publications Office of the EU. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/97d6a4ca-5847-11ea-8b81-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-119528141>
- [19] Sovacool, B. K., Martiskainen, M., Hook, A., & Baker, L. (2020). Beyond cost and carbon: The multidimensional co-benefits of low carbon transitions in Europe. *Ecological Economics*, 169, 106529. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106529>
- [20] D'Oca, S., Ferrante, A., Ferrer, C., Perneti, R., Gralka, A., Sebastian, R., & op 't Veld, P. (2018). Technical, Financial, and Social Barriers and Challenges in Deep Building Renovation: Integration of Lessons Learned from the H2020 Cluster Projects. *Buildings*, 8(12), 174. <https://doi.org/10.3390/buildings8120174>
- [21] Thaleia Konstantinou, & Heesbeen, C. (2022). Industrialized renovation of the building envelope: realizing the potential to decarbonize the European building stock. *Elsevier EBooks*, 257-283. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822477-9.00008-5>

- [22] Perneti, R., Pinotti, R., & Lollini, R. (2021). Repository of Deep Renovation Packages Based on Industrialized Solutions: Definition and Application. Sustainability, 13(11), 6412. <https://doi.org/10.3390/su13116412>
- [23] Capeluto, I. G. (2019). Adaptability in envelope energy retrofits through addition of intelligence features. Architectural Science Review, 62(3), 216-229. <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1574707>
- [24] Rabani, M., Madessa, H. B., & Nord, N. (2017). A state-of-art review of retrofit interventions in buildings towards nearly zero energy level. Energy Procedia, 134, 317-326. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.534>
- [25] Garay-Martinez, R. (2017). Highly Insulated Systems for Energy Retrofitting of Façades on its Interior. Procedia Environmental Sciences, 38, 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.065>
- [26] Lassandro, P., & Di Turi, S. (2017). Façade retrofitting: from energy efficiency to climate change mitigation. Energy Procedia, 140, 182-193. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.134>
- [27] PRR - Plano de Recuperação e Resiliência - Recuperar Portugal, Construindo o Futuro. (2021). Ministério do Planeamento. Acedido a 10 de janeiro 2021. <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3d%3dBQAAAB%2bLCAAAAAAABAAzNDQzMgYAqIWY YAUAAAA%3d>
- [28] Decreto-Lei n.º 34:486 de 6 de abril de 1945 (Revogado) do Ministério das Obras e Comunicações. Diário da República: I série, N.º73. Acedido a 10 janeiro 2023. Disponível em www.dre.pt.
- [29] Obra n.º 51980. (1961). Arquivo Municipal de Lisboa.

[30] Guia SCE - Parâmetros de Cálculo, ADENE. (2020). Direcção Geral de Energia e Geologia. Acedido a 10 fevereiro 2023. Disponível em https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2020/04/3.0-Guia-SCE-Par%C3%A2metros-de-C%C3%A1lculo_V1.pdf.

[31] Santos, Pina dos, & Matias, Luís (2010). Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Informação Técnica de Edifícios - ITE50, LNEC. Lisboa.



