

ISOLAMENTOS TÉRMICOS EM EDIFÍCIOS

Soluções de isolamento térmico em edifícios - Casos de estudo

Ana Sofia Barbosa da Palma

Escola Superior de Tecnologia e Gestão



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Ana Sofia Barbosa da Palma

ISOLAMENTOS TÉRMICOS EM EDIFÍCIOS

Soluções de isolamentos térmicos em edifícios - Casos de estudo

Mestrado em Engenharia Civil e do Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Eng. José Manuel Ferreira da Silva
e do
Professor Doutor Eng. Carlos Rafael da Silva Oliveira

Novembro de 2025

MEMBROS DO JÚRI

Presidente:

Professor Doutor Eng. Domingos António Garcia Ribas

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo

Vogal:

Professora Doutora Eng. Maria do Rosário Santos Oliveira

Professora Adjunta do Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico Porto

Arguente

Vogal:

Professor Doutor Eng. José Ferreira da Silva

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto

Politécnico de Viana do Castelo

Orientador

À minha avó Fátima

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”. (Madre Teresa de Calcutá)

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação representa não apenas o fim de uma etapa acadêmica, mas também o reflexo do apoio, carinho e incentivo de muitas pessoas que fizeram parte deste caminho.

Em primeiro lugar, agradeço profundamente aos meus pais, irmãos e a toda a minha família, pelo amor incondicional, pelos valores que me transmitiram e pelo apoio constante em todos os momentos. Um agradecimento muito especial à minha avó, que já partiu, mas cuja presença e força continuam a ser uma inspiração diária. Foi ela quem, com palavras simples e gestos sinceros, sempre me incentivou a nunca desistir dos meus objetivos.

Aos meus amigos, o meu muito obrigado pelas palavras de ânimo, pela paciência e pela alegria que me proporcionaram mesmo nos momentos mais exigentes.

Agradeço de forma especial à empresa SparkleDomain, que, apesar de já não integrar o meu vínculo profissional, permanece parte do meu percurso profissional, foi fundamental ao disponibilizar as informações e os dados que tornaram possível a elaboração desta dissertação.

Aos meus colegas de trabalho, tanto os que se cruzaram comigo ao longo do tempo como os atuais, deixo uma palavra de gratidão pelo constante incentivo, pelas conversas motivadoras e pela compreensão demonstrada.

Por fim, agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Engenheiro José Manuel Ferreira da Silva, pela sua orientação atenta, pela partilha de conhecimento e pela disponibilidade demonstrada ao longo de todo o processo. O seu apoio foi essencial para a concretização deste trabalho.

A todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para esta etapa: o meu mais sincero obrigado.

Resumo

A presente dissertação aborda o papel do isolamento térmico no desempenho energético dos edifícios, num contexto marcado pelas exigências crescentes de eficiência energética e sustentabilidade no setor da construção. Após uma contextualização regulamentar e uma abordagem teórica dos mecanismos de transmissão de calor e das características dos materiais isolantes, o estudo centra-se na análise de soluções construtivas aplicadas em obra. São apresentados dois casos de estudo reais do mercado francês, referentes a edifícios com estruturas distintas, betão armado e madeira, desenvolvidos de acordo com a regulamentação térmica RT2012. A análise evidencia a relevância do isolamento térmico como elemento determinante para a melhoria do conforto interior, da eficiência energética e da durabilidade dos edifícios, sublinhando a importância de soluções construtivas adequadas e tecnicamente fundamentadas face aos atuais desafios ambientais.

Palavras-chave: Isolamento térmico; Eficiência energética; Regulamentação térmica; Sustentabilidade na construção; Soluções construtivas inovadoras.

Abstract

This dissertation addresses the role of thermal insulation in the energy performance of buildings, within a context marked by increasing demands for energy efficiency and sustainability in the construction sector. After a regulatory contextualization and a theoretical approach to heat transfer mechanisms and the characteristics of insulation materials, the study focuses on the analysis of construction solutions applied in practice. Two real case studies from the French market are presented, concerning buildings with different structural systems, namely reinforced concrete and timber, developed in accordance with the RT2012 thermal regulation. The analysis highlights the relevance of thermal insulation as a determining factor in improving indoor comfort, energy efficiency, and building durability, emphasizing the importance of appropriate and technically sound construction solutions in response to current environmental challenges.

Keywords: Thermal insulation; Energy efficiency; Thermal regulation; Sustainable construction; Innovative building solutions.

ESTG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão
IPVC – Instituto Politécnico de Viana do Castelo
UE – União Europeia
COP – Conferência das Partes (da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas)
EPBD - Energy Performance of Buildings Directive
CE - Comunidade Europeia
CO₂ – Dióxido de Carbono
OMS – Organização Mundial de Saúde
RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RQSCE - Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios
RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
PQ - Perito Qualificado
TRM - Técnico Responsável pela Manutenção
TGE - Técnico de Gestão de Energia
TIS - Técnico de Inspeção de Sistemas Técnicos
nZEB - Edifício de Necessidades Quase Nulas de Energia
RT - Réglementation Thermique (Regulamentação Térmica)
RE2020 - Réglementation Environnementale 2020 (Regulamentação Ambiental 2020)
BEPOS - Bâtiment à Énergie Positive (Edifícios de Energia Positiva)
BBC - Bâtiment Basse Consommation (Edifícios de Baixo consumo)
TIC - Température Intérieure Conventiennelle (Temperatura interior convencional)
Passivhaus - Norma de construção de casas passivas (modelo alemão)
ZEB - Zero Energy Building (Edifício de Consumo Nulo de Energia)
NZEB - Nearly Zero Energy Building (Edifício de Energia Quase Nula)

NREL - National Renewable Energy Laboratory (Laboratório Nacional de Energia Renovável)

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado)

BEPOS - Bâtiment à Énergie Positive (Edifício de Energia Positiva)

TIC - Température Intérieure Conventiennelle (Temperatura Interior Convencional)

U - Coeficiente de transmissão térmica

R - Resistência térmica

λ - Condutibilidade térmica

EN ISO - European Norm / International Organization for Standardization (Norma Europeia / Organização Internacional de Normalização)

ITE50 - Instituto Técnico de Edifícios – Documento Técnico nº 50

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado)

ITE - Isolation Thermique par l'Extérieur (Isolamento Térmico pelo Exterior)

PCM - Phase Change Materials (Materiais de Mudança de Fase)

ACV - Analyse du Cycle de Vie (Life Cycle Analysis – LCA) (Análise do Ciclo de Vida)

EPD - Environmental Product Declaration (Declaração Ambiental de Produto)

XPS - Extruded Polystyrene (Poliestireno Extrudido)

EPS - Expanded Polystyrene (Poliestireno Expandido)

PUR – Polyurethane (Poliuretano)

ICB - Insulation Cork Board (Aglomerado de Cortiça Expandida)

FEF - Flexible Elastomeric Foam (Espuma Elastomérica Flexível)

LECA - Lightweight Expanded Clay Aggregate (Argila Expandida de Grânulo Leve)

ETICS - External Thermal Insulation Composite Systems (Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior)

BA13 - Placa de gesso cartonado de 12,5 mm de espessura;

BA18 - Placa de gesso cartonado de 18 mm de espessura;

Prégymax - Painel compósito de gesso + poliestireno expandido (EPS) com barreira de vapor;

R - Resistência térmica;

Up - Coeficiente global de transmissão térmica.

Índice

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Lista de Abreviaturas/Siglas	Erro! Marcador não definido.
Índice	xvii
Índice de Figuras	xix
Índice de Tabelas	xxi
Introdução	22
Objetivo Principal	22
Estrutura da dissertação	23
2. Eficiência Energética em Edifícios.....	25
2.1. Evolução da Diretiva Europeia EPBD (Energy Performance of Buildings Directive).....	26
2.2 NZEB – Net-Zero Energy Buildings	31
3. Isolamentos Térmicos	34
3.1 Processos de Transmissão de Calor	34
3.2 Condução.....	35
3.2.1 Coeficiente de transmissão térmica U.....	36
3.2.2 Condutibilidade térmica λ	39
3.2.3 Aplicação a um elemento da envolvente do edifício	41
3.3 Convecção.....	42
3.4 Radiação	43
3.5 Características e requisitos dos isolantes térmicos.....	44
3.6 Classificação dos Isolantes Térmicos	46
3.7 Aplicação dos Isolantes em Edifícios	47
4. Casos Práticos de Isolamentos Térmicos em Edifícios.....	57
4.1 Caso prático 1: Isolamento de paredes de estrutura de betão e tetos inclinados.....	57
4.1.1 Definições térmicas do projeto	60
4.1.2 Solução apresentada.....	62

4.1.3 Processo de execução.....	65
4.1.4 Resultado em obra.....	72
4.2 Caso prático 2: Isolamento de paredes de estrutura de madeira.....	76
4.2.1 Definições térmicas do projeto	79
4.2.2 Solução apresentada.....	79
4.2.3 Processo de execução.....	80
4.2.4 Resultado em obra.....	83
5. Notas conclusivas	85
6. Referências.....	86

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática de transmissão de calor por Convecção	43
Figura 2 -Exemplo Imperialum - Cobertura Inclínada (Isolante nas vertentes) .	48
Figura 3- Exemplo Imperialum - Cobertura inclinada (isolante sobre a esteira horizontal).....	48
Figura 4- Exemplo Imperialum - Cobertura inclinada (isolante sobre esteira horizontal).....	49
Figura 5- Exemplo Imperialum - Cobertura Horizontal	49
Figura 6- Exemplo Imperialum - Parede Dupla de fachada (caixa de ar totalmente preenchida por isolante)	50
Figura 7- Exemplo Imperialum - Parede dupla de fachada ventilada (caixa de ar parcialmente preenchida por isolante)	51
Figura 8- Exemplo Imperialum - Parede simples de fachada ETIC (Isolamento Aderido pelo Exterior).....	52
Figura 9- Exemplo Imperialum - Parede simples de fachada (Isolamento Interior)	53
Figura 10- Exemplo Imperialum - Pavimento sobre espaço interior	54
Figura 11- Exemplo Imperialum - Pavimento sobre espaço exterior	54
Figura 12 - Exemplo Imperialum - Pavimento subterrâneo	55
Figura 13 - Fachadas do edificio de estudo (fase projeto)	58
Figura 14 - Planta Sub-Solo do edificio de estudo (fase projeto)	58
Figura 15- Planta RDC do edificio de estudo (fase projeto)	59
Figura 16- Planta Piso tipo do edificio de estudo (fase projeto)	59
Figura 17 - Planta Cobertura do edificio de estudo (fase projeto)	60
Figura 18- Detalhe representativo telhado não acessível e muro inclinado	62
Figura 19 - Placa Pregymax	63
Figura 20 - Gama de placas pregymax SINIAT	64
Figura 21 - Preparação das paredes para aplicação das placas Pregymax	65
Figura 22- Preparação das placas Pregymax	66
Figura 23- Preparação da cola Pregycolle	66
Figura 24- aplicação da Pregycolle nas placas Pregymax	67
Figura 25 - Aplicação de placas Pregymax	67
Figura 26 - Detalhe colocação teto falso - exemplo Gyptec	69
Figura 27 - Resultado Esquemático da solução com isolamento do teto – Gyptec	70
Figura 28- Finalização de juntas	71
Figura 29- Teto após aplicação de isolamento pronto a receber acabamento .	72
Figura 30 - Aplicação de Isolamento em muros inclinados	73
Figura 31- Teto finalizado pronto a receber acabamento	74
Figura 32 – Paredes preparada para receber placas Pregymax	74
Figura 33 - Aplicação das placas Pregymax em obra	75
Figura 34 - Fachada do Edifício do 2º caso de estudo (fase projeto)	76
Figura 35- Planta Sub-Solo do edificio de estudo (fase projeto)	77
Figura 36 - Planta RDC do edificio de estudo (fase projeto)	77
Figura 37- Planta piso tipo do edificio de estudo (fase projeto).....	78

Figura 38 - Planta Cobertura do edificio de estudo (fase projeto)	78
Figura 39 - Esquema técnico gerado por inteligência artificial: Parede de madeira com montantes metálicos.....	81
Figura 40 - Esquema técnico gerado por inteligência artificial: parede de madeira com montantes metálicos e isolamento em lã mineral.	81
Figura 41- Esquema técnico ilustrativo gerado por inteligência artificial: parede de madeira com estrutura metálica, lã mineral e placa de gesso cartonado....	82
Figura 42 - Esquema representativo de execução de teto inclinado, Siniat.....	83
Figura 43 - Aplicação de acabamento em gesso cartonado em parede	84
Figura 44 - teto falso pronto a receber acabamento de gesso cartonado	84

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Condutibilidade térmica de materiais usuais na construção.....	40
Tabela 2 - Condutibilidade térmica gama de materiais Pregymax	41

Introdução

A crescente consciencialização face às alterações climáticas e à necessidade de promover a sustentabilidade ambiental tem impulsionado mudanças significativas no setor da construção. Os edifícios, como elementos centrais do ambiente urbano, representam uma parte considerável do consumo energético global e das emissões de gases com efeito de estufa. Esta realidade exige uma resposta eficaz ao nível do desempenho térmico e ambiental das construções.

Neste contexto, o isolamento térmico assume um papel crucial na redução das necessidades energéticas dos edifícios, contribuindo para o conforto dos utilizadores e para a diminuição do impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida. A adoção de materiais com elevado desempenho térmico, aliados a soluções construtivas inovadoras e sustentáveis, tornou-se essencial para cumprir os objetivos definidos em diretivas europeias, como a EPBD, e para avançar rumo à neutralidade carbónica.

Este novo paradigma, centrado na construção sustentável, exige uma abordagem integrada que combine eficiência energética, inovação tecnológica e responsabilidade ambiental, promovendo uma transformação real no modo como os edifícios são projetados e executados. É neste enquadramento que se insere a presente dissertação, cuja abordagem e objetivos são apresentados de seguida.

Objetivo Principal

O constante avanço tecnológico e a crescente diversidade de materiais disponíveis para a construção civil têm incentivado uma análise mais profunda das soluções de isolamento térmico, com especial foco nas diferenças observadas entre contextos nacionais. A regulamentação europeia, nomeadamente através da Diretiva Europeia relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) e das suas sucessivas reformulações, tem vindo a reforçar a importância da eficiência energética no setor da construção, promovendo práticas mais sustentáveis e exigentes do ponto de vista térmico.

A experiência profissional na área da orçamentação para mercados externos, em particular no mercado francês, proporcionou uma perspetiva prática e comparativa das soluções aplicadas, permitindo identificar disparidades significativas entre as exigências regulamentares, os materiais utilizados e os métodos construtivos em França e em Portugal.

Neste enquadramento, a presente dissertação tem como objetivo analisar as soluções de isolamento térmico adotadas nos dois países, com base em critérios como a eficiência energética, a durabilidade, a facilidade de aplicação e a sustentabilidade ambiental. São analisados dois casos de estudo do mercado francês, seguidos de uma breve reflexão sobre as exigências normativas de ambos os países, realçando a relevância da inovação e da sustentabilidade na construção, em consonância com os objetivos do Pacto Ecológico Europeu.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi estruturada com o objetivo de apresentar, de forma clara e progressiva, os principais temas relacionados com o desempenho térmico dos edifícios e as soluções de isolamento térmico disponíveis. Numa fase inicial, faz-se uma breve referência ao enquadramento legislativo, com destaque para as diretivas europeias e as regulamentações em vigor em Portugal e em França, sendo abordada a evolução da Diretiva Europeia EPBD e o conceito de edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB).

Segue-se um capítulo mais teórico, onde são explicados os fenómenos de transmissão de calor (condução, convecção e radiação) e analisados os principais parâmetros térmicos, como o coeficiente de transmissão térmica (U) e a condutibilidade térmica (λ). Abordam-se ainda as características e os requisitos dos materiais isolantes, a sua classificação e as formas mais comuns de aplicação em edifícios.

A parte prática da dissertação inclui a análise de dois casos de estudo reais, ambos referentes ao mercado francês. Cada caso corresponde a um tipo diferente de estrutura – um em betão armado e outro em madeira – e permite acompanhar todas as fases do processo: desde as definições térmicas do projeto, passando pela

solução adotada e o processo de execução, até aos resultados observados em obra. Esta abordagem prática contribui para uma compreensão mais concreta das exigências da regulamentação francesa (RT2012) e das soluções utilizadas no terreno.

Por fim, apresentam-se as principais conclusões do estudo, reforçando a importância de investir na inovação, melhorar a eficiência energética e promover uma construção mais sustentável, adaptada aos desafios ambientais atuais.

2. Eficiência Energética em Edifícios

O desequilíbrio do balanço radioativo na atmosfera está relacionado com as emissões de gases com efeito de estufa, provenientes da queima de combustíveis fósseis. As consequências da libertação destes gases são evidentes no aquecimento global e manifestam-se, cada vez mais, no aumento da temperatura média da atmosfera e da água do mar, assim como no consequente aumento do nível médio do mar. Catástrofes naturais e a diminuição da biodiversidade do planeta são também duas das consequências frequentemente associadas ao aquecimento global.

A maioria das fontes primárias de energia a nível mundial baseia-se em combustíveis fósseis, e a Europa apresenta o maior valor de importações per capita, resultando numa economia dependente de recursos não renováveis, consumidos por uma sociedade contemporânea, consumista e insustentável.

A União Europeia depende do exterior para o fornecimento de energia, sendo responsável por uma cota significativa do consumo energético mundial, mas detendo, no entanto, escassas reservas energéticas próprias. Esta situação, do ponto de vista económico, representa uma perda de riqueza, uma vez que se consome mais do que se produz.

Deste modo, verifica-se a necessidade, não apenas de reduzir as emissões de gases, mas também de aumentar a produção de energia renovável, de forma a promover a independência energética e política.

Um dos sectores que merece especial atenção é o da construção, devido ao seu impacto negativo associado às emissões de gases com efeito de estufa. É fundamental criar um ambiente saudável e sustentável. Este sector é um dos principais responsáveis pelo consumo de energia: é o segundo maior em Portugal e o primeiro na União Europeia (UE), representando mais de um terço dos gastos energéticos no espaço europeu.

O primeiro grande evento a nível mundial sobre sustentabilidade e ambiente foi a Conferência de Estocolmo, em junho de 1972, seguindo-se a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992.

Em 1995, em Berlim, realizou-se a primeira Conferência das Partes (COP1), e em 1996, em Genebra, decorreu a COP2. No final de 1997, durante a COP3 em Quioto, resultou o primeiro tratado internacional com o objetivo principal de reduzir a quantidade de emissões de gases com efeito de estufa: o Protocolo de Quioto.

Este tratado definiu a necessidade de reduzir em 55% as emissões de carbono a nível mundial e em, pelo menos, 5% em relação aos valores de 1990.

Destacam-se neste tratado as diferentes metas adaptadas a cada país, considerando as suas realidades socioeconómicas.

Com o objetivo de cumprir as metas estabelecidas a nível mundial, a União Europeia desenvolveu os seus próprios programas, como o Programa Europeu das Alterações Climáticas, do qual resultaram diversas diretivas, direcionadas para:

- a eficiência energética,
- a redução do consumo energético nos edifícios,
- e a alteração de comportamentos e mentalidades da população relativamente à sustentabilidade.

2.1. Evolução da Diretiva Europeia EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)

O combate às alterações climáticas e a necessidade de transição energética têm colocado o parque edificado europeu no centro das políticas de sustentabilidade da União Europeia (UE). De facto, os edifícios são responsáveis por aproximadamente 36 % das emissões de CO₂ e por cerca de 40 % do consumo de energia final na União Europeia [1]. Tornar este setor mais eficiente e menos dependente de combustíveis fósseis é, por isso, um desafio central.

Neste contexto, a Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD – Energy Performance of Buildings Directive) tem assumido um papel fundamental no alinhamento das políticas nacionais e na criação de um quadro comum para a promoção da eficiência energética no setor da construção.

A primeira versão da EPBD, a Diretiva 2002/91/CE, adotada em dezembro de 2002, marcou um verdadeiro ponto de viragem. Pela primeira vez, os Estados-Membros

foram obrigados a estabelecer requisitos mínimos de desempenho energético para os edifícios, a criar sistemas de certificação energética e a promover a inspeção regular dos sistemas de aquecimento e de ar condicionado [2]. Esta diretiva refletia uma abordagem inicial focada na redução do consumo energético dos edifícios, numa época em que o conceito de neutralidade carbónica ainda não fazia parte do vocabulário político dominante.

Em 2010, a Diretiva 2010/31/UE veio atualizar e reforçar este quadro, reconhecendo a necessidade de acelerar o progresso. Esta revisão introduziu a obrigatoriedade de que todos os novos edifícios públicos fossem edifícios de consumo quase nulo (Nearly Zero Energy Buildings – NZEB) a partir de 2019, alargando esta exigência a todos os edifícios novos a partir de 2021. Além disso, passou a ser exigida a aplicação sistemática de metodologias para o cálculo do desempenho energético, bem como a fixação de requisitos mínimos para grandes obras de renovação [3].

A evolução da política europeia nesta área não se limitou a requisitos técnicos. Progressivamente, o conceito de descarbonização do parque edificado foi ganhando centralidade. A Diretiva (UE) 2018/844, que alterou a EPBD em 2018, reforçou esta orientação estratégica, introduzindo novas metas para a renovação do parque edificado existente — um aspeto crucial, tendo em conta que mais de 85 % dos edifícios que existirão em 2050 já estão hoje construídos [4]. A Diretiva de 2018 incentivou também a digitalização e a integração de sistemas inteligentes nos edifícios.

Mais recentemente, a Diretiva (UE) 2024/1275, publicada em abril de 2024, representa uma etapa particularmente ambiciosa e estruturante. Esta nova versão da EPBD não só atualiza as metas de desempenho energético, como consagra de forma mais explícita o conceito de edifício com emissões zero, que deverá tornar-se a referência para o futuro parque edificado europeu [5].

Entre as inovações introduzidas pela Diretiva de 2024, destacam-se:

- A fixação de objetivos vinculativos de redução do consumo de energia primária dos edifícios, com metas específicas para 2030 e 2040;
- A introdução progressiva da exigência de edifícios com emissões zero em todas as novas construções;

- O reforço das normas para a envolvente dos edifícios e para os sistemas técnicos instalados;
- A eliminação progressiva de caldeiras a combustíveis fósseis, com o objetivo de eliminar a sua utilização até 2040;
- A revisão e harmonização dos sistemas de certificação energética, com maior transparência e fiabilidade;

A promoção de infraestruturas para a mobilidade elétrica nos edifícios e a integração de tecnologias digitais para uma melhor gestão do consumo [5]. Com este percurso, a EPBD transformou-se num instrumento central da estratégia europeia para a concretização dos objetivos do Pacto Ecológico Europeu e do Acordo de Paris [6]. Se, numa fase inicial, a tónica estava colocada na eficiência energética e na redução do consumo, hoje o foco é claramente mais amplo, integrando também a sustentabilidade ambiental, a qualidade do ar interior, a inteligência digital e a promoção do bem-estar dos ocupantes.

Importa ainda sublinhar que esta evolução da EPBD não é apenas uma resposta técnica ou normativa: é também um instrumento para impulsionar uma verdadeira mudança de paradigma no setor da construção, promovendo soluções que contribuam para um parque edificado que seja não só mais eficiente, mas também mais saudável e resiliente.

Dadas as exigências impostas pelas sucessivas versões da Diretiva EPBD, os Estados-Membros da União Europeia foram obrigados a transpor estas disposições para o respetivo quadro legislativo nacional, definindo regulamentos específicos para o desempenho energético dos edifícios.

Em Portugal, o enquadramento atual da eficiência energética no setor da construção é assegurado pelo Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro, que aprova o Regime Jurídico da Certificação Energética dos Edifícios (RJCE), revogando o anterior Decreto-Lei n.º 118/2013.

Este diploma estabelece os requisitos mínimos de desempenho energético a aplicar na construção nova, na renovação de edifícios e nas grandes intervenções, assim como regras para a certificação energética.

O Decreto-Lei n.º 101-D/2020 transpõe para o direito nacional as orientações da Diretiva (UE) 2018/844 e integra uma estratégia de progressiva descarbonização do parque edificado português até 2050 [7].

Entre as principais medidas destacam-se:

- A obrigatoriedade de que todos os edifícios novos sejam Nearly Zero Energy Buildings (NZEB);
- O reforço dos requisitos para a envolvente dos edifícios e para os sistemas técnicos instalados;
- A integração de medidas que visam melhorar a qualidade do ar interior;
- A promoção da utilização de fontes de energia renovável nos edifícios.

Este regime é complementado por diversas portarias e despachos que detalham critérios técnicos, como a Portaria n.º 138-I/2021 (requisitos de desempenho energético da envolvente e dos sistemas técnicos), e por um conjunto de regras operacionais para o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE).

Em França, o regulamento atualmente em vigor para o desempenho energético dos edifícios é o Règlement Environnemental 2020 (RE2020), que substituiu o anterior Règlement Thermique 2012 (RT2012).

O RE2020 entrou em vigor em janeiro de 2022 para edifícios residenciais e, progressivamente, tem vindo a ser aplicado a outras tipologias de edifícios. Esta regulamentação responde às orientações da EPBD e está alinhada com os objetivos nacionais da Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) [8].

Os objetivos principais do RE2020 são:

- Reduzir significativamente as emissões de carbono associadas aos edifícios ao longo do seu ciclo de vida (não apenas em fase de operação,

mas também na fase de construção e materiais);

- Melhorar o desempenho energético global dos edifícios, com foco na eficiência da envolvente e dos sistemas técnicos;
- Promover o conceito de edifícios de energia positiva (BEPOS), que produzam mais energia renovável do que aquela que consomem;
- Melhorar o conforto térmico dos ocupantes, especialmente no verão, num contexto de alterações climáticas.

O RE2020 introduz, portanto, uma abordagem mais ampla e ambiciosa do que a anterior RT2012, incluindo critérios ambientais e de conforto, para além da tradicional eficiência energética.

A evolução da EPBD e das regulamentações nacionais que lhe dão corpo constituem um exemplo paradigmático da capacidade das políticas públicas para transformar práticas e mentalidades no setor da construção. Em ambos os contextos analisados — Portugal e França — verifica-se uma progressiva internalização dos princípios da construção sustentável e da eficiência energética. Se por um lado ainda subsistem desafios — nomeadamente no acesso a soluções inovadoras e na massificação de práticas construtivas mais ecológicas, por outro é inegável que a trajetória é clara e irreversível: construir de forma mais eficiente, mais responsável e mais alinhada com os objetivos climáticos globais.

Cabe agora a todos os intervenientes do setor — desde os projetistas aos construtores, passando pelos legisladores e pelos utilizadores — consolidar este percurso e contribuir, ativamente, para um parque edificado mais sustentável, confortável e resiliente.

2.2 NZEB – Net-Zero Energy Buildings

Com o exponencial crescimento da população e as exigências da vida contemporânea verificadas no século passado, assistiu-se a uma construção massiva de edifícios pouco sustentáveis, traduzindo-se num impacto negativo já visível no meio ambiente.

A sustentabilidade baseia-se no princípio de que o progresso e o desenvolvimento devem satisfazer as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades [9].

A arquitetura dos edifícios e as decisões construtivas associadas devem ser elementos de elevada relevância no momento da construção, dando especial atenção à exposição dos edifícios às condições ambientais a que estarão sujeitos.

As condições climáticas e o aproveitamento de tecnologias solares passivas são fundamentais para a melhoria da eficiência energética e para a redução das emissões de carbono [9].

Os primeiros conceitos de *Zero Energy House* surgiram na sequência da crise dos combustíveis das décadas de 1970 e 1980, focando-se em medidas passivas e tecnologias eficientes para a redução das necessidades energéticas de aquecimento de ar e águas [10].

Posteriormente, evoluiu o conceito de *Zero Energy Building* (ZEB), traduzido como Edifício de Consumo Nulo de Energia, reconhecido atualmente como o futuro da construção sustentável.

O objetivo principal do ZEB é eliminar as emissões de CO₂ e reduzir o consumo energético dos edifícios [10]. Contudo, a denominação ZEB não é totalmente clara, uma vez que é praticamente impossível que um edifício tenha necessidades energéticas completamente nulas. Um edifício ZEB deve, assim, produzir energia renovável suficiente para colmatar as suas necessidades [11].

De forma prática, o balanço energético é calculado com base na energia fornecida pela rede e na energia injetada na rede. Quando a oferta de energia excede a procura, o balanço energético é positivo, e o edifício pode ser classificado como Plus Energy Building [11].

No entanto, é frequentemente sublinhada a necessidade de definição clara sobre o que representa o "zero" em ZEB — se diz respeito à produção de energia, ao custo energético ou às emissões de carbono [11].

Segundo Torcellini, principal engenheiro do grupo de pesquisa de edifícios comerciais do National Renewable Energy Laboratory (NREL) dos Estados Unidos, desde 1994, um Net-Zero Energy Building (NZEB) é um edifício com reduzida necessidade energética, conseguida através de medidas de eficiência energética, e em que o consumo é compensado por produção de energia renovável [12].

Torcellini apresenta quatro variantes na definição de NZEB:

- **Net-Zero Site Energy:** O edifício produz localmente tanta energia quanto consome (energia contabilizada no local);
- **Net-Zero Source Energy:** A energia produzida compensa a energia consumida, considerando as perdas de transporte e distribuição;
- **Net-Zero Energy Cost:** O custo da energia comprada à rede é compensado pelo valor da energia vendida;
- **Net-Zero Energy Emissions:** As emissões de gases com efeito de estufa evitadas igualam as emissões associadas ao consumo de energia [12].

Em 2008, Jens Laustsen propôs uma nova interpretação:

Um ZEB seria um edifício que não recorre a combustíveis fósseis e que, através da energia solar e outras fontes renováveis, satisfaz todas as suas necessidades energéticas [13].

Face às fragilidades desta definição, surgiram novas categorias:

- **Zero-Net Energy Buildings:** Edifícios cujo balanço energético anual é nulo — exportam para a rede tanta energia quanto consomem;

- **Zero Carbon Buildings:** Edifícios que, num ano, não utilizam qualquer energia que origine emissões de CO₂, ou compensam totalmente as suas emissões [13].

De modo a apoiar os Estados-Membros no desenvolvimento de NZEB (Nearly Zero Energy Buildings), foi publicado um documento orientador da União Europeia que define estes edifícios como aqueles que, anualmente, apresentam um balanço energético próximo de zero, considerando a energia fornecida e extraída [14].

Geralmente, as definições de ZEB pressupõem que o edifício esteja ligado a uma ou mais redes (elétrica, de aquecimento, de arrefecimento, de gás, entre outras).

A ligação à rede permite a importação e exportação de energia, sem necessidade de armazenamento local [14].

- Um edifício on-grid liga-se à infraestrutura para equilibrar o consumo e a produção;
- Um edifício off-grid necessita de sistemas de armazenamento energético no local.

A American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) reforça que a única forma rigorosa de classificar um ZEB é através da análise da energia que atravessa os limites físicos do edifício [15].

Em conclusão, um Zero Energy Building deve:

- Reduzir ao máximo as suas necessidades energéticas através de estratégias de eficiência,
- Integrar fontes de energia renováveis adequadas,
- Alcançar um balanço energético anual nulo.

É responsabilidade dos projetistas adotar técnicas de eficiência energética, selecionar equipamentos adequados e planear a sua implementação estratégica [15].

3. Isolamentos Térmicos

3.1 Processos de Transmissão de Calor

Para uma melhor compreensão do desempenho dos edifícios relativamente à humidade e calor, devemos conhecer os mecanismos de trocas térmicas que ocorrem nos edifícios [16].

A mudança de estado e/ou a existência de corpos com diferentes temperaturas são condições básicas para a existência de trocas térmicas. Podemos dividir essas trocas térmicas em dois tipos:

1. Trocas Térmicas Húmidas:

Neste caso, a água é o elemento que possibilita as trocas térmicas nos edifícios, através da sua mudança de estado de líquido para vapor e da transformação inversa. O calor responsável por esta mudança de fase é denominado calor latente [17]. As principais formas de trocas térmicas húmidas são a evaporação e a condensação.

2. Trocas Térmicas Secas:

Referem-se às trocas de calor que envolvem apenas variações de temperatura, sendo o calor envolvido denominado calor sensível [17]. Estas trocas de calor ocorrem devido à diferença de temperatura entre corpos distintos: o calor transfere-se do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura até que ambos atinjam a mesma temperatura, estabelecendo o equilíbrio térmico. Como este fenómeno se verifica apenas enquanto subsistir a diferença de temperatura, é considerado transitório.

Existem três mecanismos principais de transferência de calor em trocas secas:

- Condução,
- Convecção,

- Radiação [18].

Estes mecanismos de transmissão de calor são fundamentais para a análise do comportamento térmico **dos edifícios** [18].

3.2 Condução

O processo de transmissão de calor por condução ocorre quando a energia térmica se transfere entre moléculas sem movimento macroscópico do material, sendo resultado da capacidade dos materiais para transferirem energia por contacto direto, através de movimentos vibracionais, rotacionais e translacionais das suas partículas [16].

A condução térmica pode ocorrer em gases, líquidos ou sólidos.

Este fenómeno é descrito pela Lei Fundamental de Fourier, que estabelece que, num material homogéneo em regime estacionário de condução, o fluxo de calor que o atravessa (q) é diretamente proporcional à condutibilidade térmica (λ), à área da secção transversal (A), à diferença de temperatura entre as extremidades (ΔT), e inversamente proporcional à espessura do material (e) [16].

A expressão matemática [3.1] da condução térmica é:

$$q_{cond} = \lambda / e \times A \times \Delta T \quad [W] \quad [3.1]$$

Sendo:

λ - condutibilidade térmica do material [W/m.°C]

e - Espessura e/ou distância entre as extremidades [m]

A - Área do elemento [m²]

ΔT - diferença de temperatura entre as extremidades [°C]

q - Fluxo de calor por unidade de tempo [W]

3.2.1 Coeficiente de transmissão térmica U

A envolvente de um edifício é composta por vários elementos, e como tal por diferentes materiais. O fluxo de calor que transpõe este segmento de elementos determina a sua permeabilidade às trocas de energia térmica que ocorrem através da envolvente.

Em trocas por condução esta permeabilidade é traduzida por um coeficiente, denominado coeficiente de transmissão térmica (U). Deste modo, e seguindo a lei de Fourier, quando se apresentam as mesmas condições de temperatura para uma mesma área de elemento, quanto maior é o valor do coeficiente de transmissão térmica, maior será o fluxo de calor que atravessa o segmento de elementos da envolvente.

Para o caso prático de vários elementos dispostos em série, constituídos por diferentes camadas de materiais, a Lei de Fourier pode assumir a seguinte expressão[3.2]:

$$q_{cond} = U \times A \times \Delta T \quad [W] \quad [3.2]$$

Sendo:

U - coeficiente de transmissão térmica dos vários elementos [W/(m².°C)]

e - Espessura e/ou distância entre as extremidades [m]

A - Área do elemento [m²]

ΔT - diferença de temperatura entre as extremidades [°C]

q - Fluxo de calor por unidade de tempo [W]

O coeficiente de transmissão térmica é por sua vez obtido a partir da seguinte equação [3.3]:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{si} + \sum j R_j + R_{se}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \quad [3.3]$$

Em que:

R_t - resistência térmica total do elemento [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$];

R_j resistência térmica da camada j [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$];

R_{si} R_{se} são as resistências térmicas superficial interior e exterior [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$];

3.2.2 Resistência Térmica R

A dificuldade que um material apresenta à transmissão de calor é denominada resistência térmica, e no caso de materiais homogêneos, esta é determinada pelo quociente entre a espessura do material (e) e a sua condutibilidade térmica (λ) [17].

O cálculo dos valores de resistência térmica de cada material ou estrutura deverá seguir as metodologias estabelecidas nas normas europeias EN ISO 6946, ou poderão ser consultados, diretamente em tabelas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC. Estas tabelas dispõem de valores de condutibilidade térmica para materiais homogêneos (isolantes, betões, etc), e valores de resistência térmica diretos para elementos não homogêneos (blocos vazados, lajes aligeiradas, etc).

Assim, para o caso de vários elementos homogêneos, a resistência térmica total R_t pode ser calculada pela seguinte expressão [3.4]:

$$R_t = R_{se} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{si} \quad [\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}] \quad [3.4]$$

Para o caso de vários elementos não homogêneos, a resistência térmica total R_t pode ser calculada pela seguinte expressão [3.5]:

$$R_t = R_{se} + \sum R_j + R_{si} \quad [\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}] \quad [3.5]$$

Onde:

λ - condutibilidade(s) térmica(s) do(s) material(ais) [$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$]

e - Espessura e/ou distância entre as extremidades [m]

R_{si} - resistência térmica superficial interior [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$];

R_{se} - resistência térmica superficial exterior [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$];

R_j - resistência térmica da camada j [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$].

O ITE50 prevê também valores de resistência térmica superficiais que melhor traduzem as condições na superfície do elemento, tais como:

- Elementos da envolvente que separam um espaço útil interior do ambiente exterior. Os valores de resistências térmicas superficiais interior R_{si} , e exterior R_{se} a assumir são tabelados.
- Elementos da envolvente que separam um espaço útil interior de um local não-aquecido.
A resistência térmica superficial exterior R_{se} assume valor igual à resistência térmica interior R_{si} .
- Pavimentos sobre espaços de ar ventilado (ou espaços técnicos).
A resistência térmica superficial exterior R_{se} toma valor igual à resistência térmica interior R_{si} . Quando o fluxo é ascendente esse valor é igual a $0,10(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) / \text{W}$; e quando o fluxo é descendente assume o valor de $0,17(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) / \text{W}$.
- Elementos de construção (verticais e horizontais) que incluam um espaço de ar fortemente ventilado com recurso a ar exterior, e esteiras inclinadas ou sob desvão ventilado (não habitado) de coberturas inclinadas. A resistência térmica superficial exterior R_{se} assume valor igual á resistência térmica interior R_{si} . Neste caso são desprezadas as resistências térmicas do espaço de ar fortemente ventilado e do revestimento exterior.

3.2.2 Condutibilidade térmica λ

A capacidade dos materiais de conduzirem calor é quantificada pela condutibilidade térmica λ [W/m.K] ou [W/m.°C], definindo-se como a quantidade de calor [W/m²] que atravessa na unidade de tempo uma área unitária [m²] e uma espessura unitária [m] de um material ou produto homogêneo, para uma diferença de temperatura unitária entre ambas as faces (1K ou 1°C) [16]. Deste modo, os materiais que conduzem melhor o calor apresentam uma alta condutibilidade térmica, e estes mesmos materiais que apresentam alta condutibilidade térmica são empregues como dissipadores de calor, e materiais com baixa condutibilidade térmica são utilizados como isolantes térmicos.

A quantificação da resistência térmica de uma camada de um material homogêneo (material de espessura constante e propriedades térmicas uniformes) é obtida pela relação entre a espessura e a condutibilidade, de acordo com a equação [3.6]

$$R_j = d_j / \lambda_j \quad [\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}] \quad [3.6]$$

Onde:

R_j – Resistência térmica da camada j [(m².°C)/W];

d_j – Espessura da camada j [m];

λ_j – Condutibilidade térmica da camada j [W/(m.°C)].

Resultante da marcação CE dos produtos de construção, no que é correspondente aos isolantes térmicos, os fabricantes declaram um valor de condutibilidade térmica (λ_d) ou de resistência térmica (R_d). Valores estes determinados tendo por base ensaios com valores de humidade e temperatura de referência, assumindo que o material tem um período de vida útil de aproximadamente 25 anos. Estes valores apresentam um nível de fiabilidade de 90% [18].

Mas uma vez que os elementos de construção, principalmente os da fachada estão sujeitos, além do normal “envelhecimento”, a condições específicas de temperatura

e humidade relativa (ou até mesmo contacto prolongado com água), condições estas diferentes das assumidas na determinação do valor declarado.

Deste modo, o valor de cálculo da resistência térmica R deve ter em consideração os agravamentos resultantes das condições específicas de utilização previstas. Utilizam-se, portanto, valores convencionais de cálculo de condutibilidade térmica, obtidos dos correspondentes valores declarados, e das condições de utilização prevista. Os valores convencionais de cálculo, λ , da condutibilidade térmica dos principais materiais e produtos de construção são apresentados em duas tabelas distintas do ITE50, dividindo isolantes térmicos dos restantes materiais ou produtos de construção. Na Tabela 1, apresentam-se os valores convencionais de λ para materiais correntes, enquanto a Tabela 2 destaca o desempenho térmico dos painéis de uma gama de produtos, Prégymax, uma solução industrializada amplamente utilizada em interiores. Estes dados permitem comparar opções e tomar decisões mais informadas na criação de soluções construtivas energeticamente eficientes.

Material		Massa Volúmica ρ [kg/m ³]	Condutibilidade térmica λ [W/m·°C]
Lã de rocha		20–35	0,045
		35–100	0,040
		100–180	0,042
Lã de vidro		8–15	0,045
		15–100	0,040
Aglomerado de cortiça expandida (ICB)		90–140	0,045
Aglomerado de cortiça natural com ligantes betuminosos sintéticos		100–150	0,050
		150–250	0,055
Poliestireno expandido moldado (EPS)		< 11	0,055
		11–13	0,045
		13–15	0,042
		15–20	0,040
		> 20	0,037
Poliestireno expandido extrudido (XPS)		25–40	0,037
Espuma rígida de poliuretano (PUR) ou de poli-isocianurato (PIR)	Placas	20–50	0,040
	Projetado in situ	20–50	0,042
	Paineis Sanduiche	35–50	0,037
Espuma de polietileno expandido extrudido (PEF)		20–50	0,050
Grânulos leves ou fibras soltas	Grânulos de argila, de vermiculite ou de perlite expandida	< 400	0,160
	Outros tipos de grânulos leves ou fibras soltas	20–100	0,060
Espuma elastomérica flexível (FEF)		60–80	0,050

Tabela 1 - Condutibilidade térmica de materiais usuais na construção

Performances thermiques

Recommandations SINIAT*	Niveau	Doublage et résistance thermique (m².K/W)	Épaisseur d'isolant (mm)	λ (W/(m.K))	Certification
Niveau Rénovation (RT dans l'existant) : Zone H3 (altitude < 800 m)	PRÉGYMAX R2	PRÉGYMAX R2,55	80	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R2,75	81	0,030	ACERMI 09/009/543
Niveau Rénovation (RT dans l'existant) Zones H1, H2 et H3 (alt > 800 m)	PRÉGYMAX R3	PRÉGYMAX R3,15	100	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R3,40	101	0,030	ACERMI 09/009/543
Niveau RT 2012		PRÉGYMAX R3,80	120	0,032	ACERMI 11/009/717
Niveau RT 2012	PRÉGYMAX R4	PRÉGYMAX R4,10	122	0,030	ACERMI 09/009/543
		PRÉGYMAX R4,40	140	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R4,80	143	0,030	ACERMI 09/009/543
Niveau RT 2012 optimisée	PRÉGYMAX R5	PRÉGYMAX R5,05	160	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R5,45	163	0,030	ACERMI 09/009/543

Tabela 2 - Condutibilidade térmica gama de materiais Pregymax

3.2.3 Aplicação a um elemento da envolvente do edifício

Nem sempre os elementos de construção são homogéneos, podendo também ser compostos por diversos subelementos, cujas propriedades são variáveis.

Assumindo o caso prático de uma parede constituída por vários subelementos homogéneos dispostos em série, atravessados perpendicularmente por um fluxo de calor no sentido do interior para o exterior, a expressão que se pode usar para quantificar a quantidade de calor que atravessa essa parede é a seguinte [3.7]:

$$q_{cond} = \frac{\Delta t}{R_t} \times A = \frac{(t_i - t_e)}{R_{se} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{si}} \times A \quad [W] \quad [3.7]$$

Sendo:

A – Área da parede (m²)

Δt - diferença de temperatura entre as extremidades (°C)

t_e – temperatura exterior (°C)

t_i – temperatura interior (°C)

λ – Condutibilidade térmica dos materiais (W/m.°C)

e – Espessura dos subelementos da parede (m)

R_{se} – resistência térmica superficial exterior

R_{si} – resistência térmica superficial interior

3.3 Convecção

A troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e outro um fluido é apelidada de convecção. Devido á alteração de densidade do meio fluido quando ocorre modificação de temperatura é neste que se dá o fluxo de energia térmica. Um fluido quando aquecido tem tendência a expandir-se e como consequência ocorre diminuição da densidade, portanto a matéria mais quente sobe acima da matéria mais fria, e logo, menos densa. Os movimentos físicos de partículas do fluido das zonas quentes para as zonas frias geram o fluxo de energia.

A expressão [3.8] abaixo apresentada permite a determinação da quantidade de calor transportado por convecção (q_{conv}):

$$q_{conv} = h_c \times A \times (T_s - T_f) \quad [W] \quad [3.8]$$

Sendo:

h_c - Coeficiente de convexão [W/m².°C]

A - Área da superfície do sólido em contacto com o fluido [m²]

T_s - Temperatura da superfície do sólido [°C]

T_f – Temperatura do fluido [°C]

Na figura 5 é esquematizado o processo de transmissão de calor por convecção.

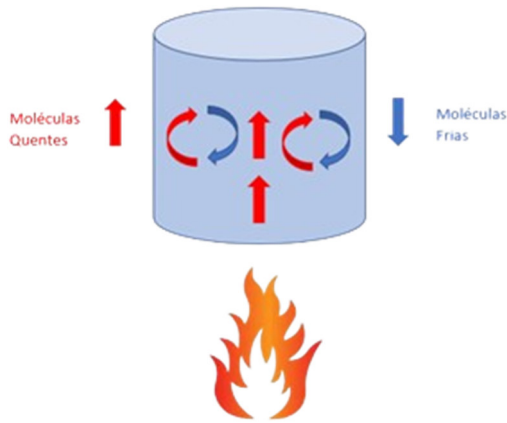


Figura 1 - Representação esquemática de transmissão de calor por Convecção

3.4 Radiação

Um corpo cuja temperatura seja superior a zero absoluto, emite energia sob a forma de radiação. Depende das capacidades de emissividade e absorção dos corpos para que ocorra entre dois corpos trocas de energia por radiação. Esta forma de transferência de calor que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas é apelidada de radiação térmica. A gama de comprimentos de onda da energia térmica radiante emitida varia entre 0,1 a 100 μm . Como estas ondas se propagam no vácuo, não existe necessidade de contacto entre os corpos ou qualquer outro meio material para que ocorra transferência de calor.

A energia radiante emitida por um corpo é determinada pela lei de Stefan-Boltzmann [3.9] aplicando a um corpo real.

$$q_{rad} = \sigma \times \varepsilon \times A \times T_s^4 \quad [\text{W}] \quad [3.9]$$

No entanto, se for considerada a emissão de radiação por dois corpos, para o cálculo da energia radiante, onde a $T_s > T_{viz}$, segue-se a expressão [3.10] seguinte.

$$q_{rad} = \sigma \times F \times A \times (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad [\text{W}] \quad [3.10]$$

Onde:

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m.K}^{-4}$ – constante de Stefan-Boltzmann

ε – Emissividade da superfície

F- Fator de forma

A – Área da superfície em contacto com o fluido (m^2)

T_s – Temperatura absoluta da superfície do corpo [$^\circ\text{K}$]

T_{viz} - Temperatura do corpo vizinho [$^\circ\text{K}$]

3.5 Características e requisitos dos isolantes térmicos

Um material isolante ajuda a evitar ou reduzir a transferência de energia, como por exemplo o calor, entre duas áreas distintas. Um isolante com baixa condutibilidade térmica, e boa inércia térmica é considerado um bom isolante [16]. O material deve também ser permeável ao ar através dos seus poros. No entanto, essa permeabilidade não deve permitir a passagem de vapores ou humidades, ajudando a minimizar a formação de condensações ou corrosão, sendo que quanto mais baixa a permeabilidade à humidade melhor é a qualidade do isolante. O isolante deve também ser resistente à água, solventes e produtos químicos. Não deve perder eficiência num curto espaço de tempo, e não deve ser inflamável. Deve ainda ser de fácil aplicação.

Os isolantes térmicos são caracterizados pelo valor da sua Resistência térmica (R) expresso em $[(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) / \text{W}]$, resultante da relação entre a espessura do material em metros e o seu coeficiente de condutibilidade térmica, λ , $[\text{W} / (\text{m. } ^\circ\text{C})]$.

O desempenho térmico de um edifício é definido através das propriedades térmicas dos seus constituintes, e também das propriedades dos materiais de isolamento térmico que se lhe associam [19]. A forma de aplicação dos materiais de isolamento térmico no edifício tem influência o seu desempenho. Deste modo, a sua correta aplicação resulta em inúmeros benefícios, tais como o controlo e conservação da temperatura interior do edifício minimizando o recurso a algum tipo de sistema de climatização, dando origem a uma poupança do ponto de vista energético e

assegurando a qualidade e conforto térmico das habitações, e ainda incrementando a sua eficiência energética. É, portanto, de grande importância a escolha do isolamento térmico que responda idealmente às exigências térmicas do edifício. Esta escolha do material mais adequado é efetuada através de um estudo antecipado do edifício e da sua envolvente [19]. Apenas desta forma se alcança o melhor desempenho do edifício, tanto do ponto de vista ambiental como do ponto de vista do conforto térmico.

Podem-se definir 3 soluções principais de isolamento de um edifício: isolamento pelo exterior, isolamento pelo interior, e isolamento térmico distribuído.

O Isolamento térmico pelo exterior é a aplicação de uma “camada isolante” na envolvente do edifício. Tem como vantagem a eliminação das pontes térmicas e proporcionar maior conforto, principalmente no verão, com melhor inércia térmica. É o caso dos ETIC's [19].

Isolamento térmico pelo interior, onde aplicação do isolamento é efetuada contra as paredes interiores. Tem como vantagem o lado prático aquando da reabilitação das fachadas, mas como desvantagem a formação de pontes térmicas.

Isolamento térmico distribuído, onde, a título de exemplo, as estruturas isolantes, como blocos térmicos, constituem uma parede dupla com caixa de ar que comporta ou não um isolante no seu miolo.

Ao escolher um isolante, tendo uma abordagem eco construtiva, não se podem limitar os critérios de seleção ao desempenho térmico do material. Como tal, para essa seleção podem ser adaptados os seguintes critérios:

Propriedades térmicas: geralmente definidas por conceitos como a condutividade térmica (W/m^2K). No entanto já surgem por vezes referências também à efusividade térmica, que é resultante da raiz quadrada do produto da densidade, condutividade térmica e calor específico do material, e representa a taxa na qual a temperatura da superfície de um material varia e, portanto, a capacidade que este possui de acumular e libertar calor (inércia térmica). Materiais com alta efusividade térmica parecem frios ao toque, enquanto materiais com baixa efusividade térmica parecem quentes [20].

Propriedades técnicas, tais como o isolamento acústico, o comportamento ao fogo, permeabilidade ao vapor de água, comportamento em humidade, tipo de instalação, ou estabilidade das propriedades no decorrer da vida útil.

Propriedades ambientais: impacto energético da produção, riscos para a saúde, manutenção, tratamento de fim de vida tais como reciclagem. Estas propriedades são detetáveis por avaliações ambientais, tais como análises aos diferentes impactos ambientais de todo o ciclo de vida do produto desde a sua produção até ao fim de vida. Entre os critérios de análise estão as emissões de gases de efeito de estufa, a origem dos recursos, e a produção de gás acidificante [20].

3.6 Classificação dos Isolantes Térmicos

Os isolantes térmicos podem ser classificados:

Quanto ao modo de produção:

- Prefabricados em Placas, como é o caso do XPS e EPS, por exemplo [21];
- Constituídos “in situ” tais como betões e argamassas de inertes leves [22];
- A granel, como a argila expandida (LECA), o granulado de cortiça e o granulado de EPS;
- Moldado, exemplo dos blocos aligeirados em EPS ou argila expandida;
- Injetados/Projetados como é exemplo do PUR [21].

Quanto á sua estrutura:

- Materiais celulares, como betões celulares, aglomerado de cortiça expandida (ICB), espumas de plásticos (PUR, EPS e XPS), espuma elastomérica flexível (FEF) [21];
- Materiais fibrosos tais como lãs minerais (lã de vidro e lã de rocha) [22];
- Materiais granulares, como grânulos de poliestireno, de argila e ainda materiais em que a sua utilização constitui um meio de reciclagem e de valorização de subprodutos de outras indústrias (exemplos são grânulos e regranulados de cortiça, regranulados de poliestireno).

Quanto á sua matéria-prima:

- Isolantes de natureza mineral (exemplos são lã de vidro, lã de rocha, argila expandida, vidro celular) [21].
- Isolantes de natureza vegetal (exemplos são cortiça expandida, aglomerados de fibra de madeira, aglomerados de fibra de linho) [22];
- Isolantes de natureza sintética (tais como poliuretano PUR, poliestireno expandido moldado EPS, poliestireno expandido extrudido XPS [21][23].

3.7 Aplicação dos Isolantes em Edifícios

A aplicação dos isolantes nos edifícios é, em regra, efetuada nas paredes, nos pavimentos e/ ou coberturas.

Coberturas

- Coberturas tradicionais planas:
Neste sistema, a impermeabilização é aplicada sobre o isolamento térmico. Esta configuração protege o isolamento dos agentes atmosféricos e mecânicos, aumentando a sua durabilidade [24].
- Coberturas invertidas:
O isolamento térmico é colocado por cima da impermeabilização. Esta inversão permite proteger também o sistema de impermeabilização, aumentando a sua eficiência e prolongando a vida útil da cobertura [24][25].
- Coberturas inclinadas:
Quando se isola termicamente a pendente de uma cobertura inclinada, possibilita-se o aproveitamento da zona de desvão como espaço útil e funcional.

O isolamento pode ser colocado, pelo interior da laje (mais simples, mas com risco de pontes térmicas ou pelo exterior da estrutura (solução mais eficaz para eliminar pontes térmicas) [24].

É essencial que a aplicação seja feita de forma contínua, evitando descontinuidades que possam gerar condensações indesejadas [25].

Exemplos de soluções de isolamento para coberturas incluem:

- Mantas de lã mineral ou lã de vidro,
- Aglomerados de cortiça expandida,
- Isolantes em spray (ex.: poliuretano projetado),
- Mantas aluminizadas,
- Placas isolantes de poliestireno expandido (EPS) ou extrudido (XPS),
- Betonilhas de enchimento com adição de materiais isolantes.

A escolha do tipo de isolante e do método de aplicação deve ter em consideração as condições climáticas, a utilização prevista do espaço e os requisitos de desempenho térmico do edifício, tendo sempre em atenção o seu ciclo de vida. [25].

Nas figuras 2 a 5 ilustram-se algumas soluções correntes de isolamento térmico de coberturas.



Figura 2 -Exemplo Imperialum - Cobertura Inclinada (Isolante nas vertentes)



Figura 3- Exemplo Imperialum - Cobertura inclinada (isolante sobre a esteira horizontal)

- 1- Revestimento do telhado
- 2- Ripado de suporte do telhado
- 3- Ripado de suporte
- 4- Manta Isolante
- 5- Membrana para-vapor
- 6- Estrutura continua

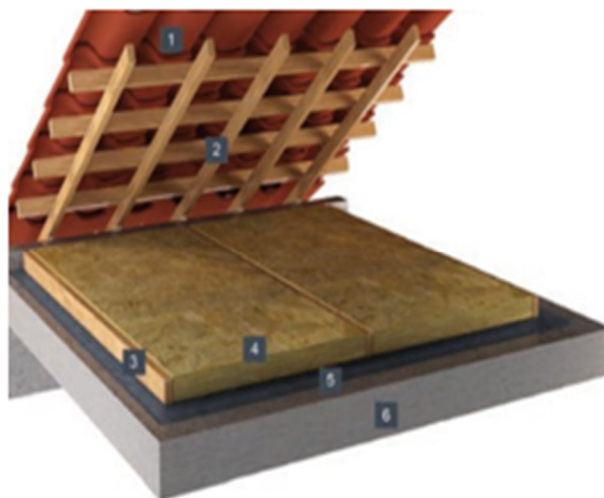


Figura 4- Exemplo Imperialum - Cobertura inclinada (isolante sobre esteira horizontal)

- 1- Mineralização
- 2- Tela de Impermeabilização
- 3- Paineis Isolantes
- 4- Paineis Isolantes
- 5- Membrana para-vapor
- 6- Estrutura Resistente
- 7- Revestimento do teto

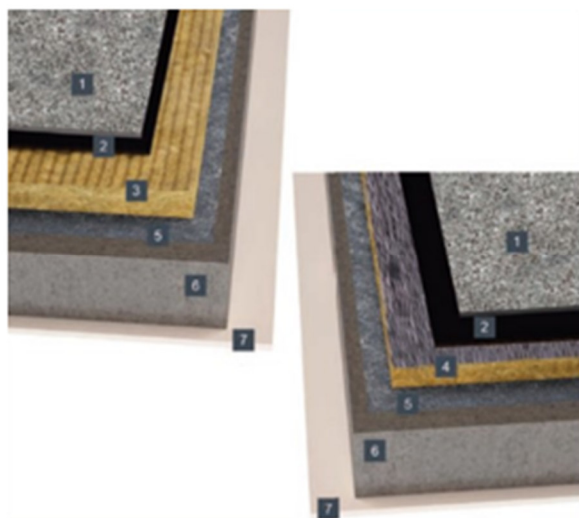


Figura 5- Exemplo Imperialum - Cobertura Horizontal

Paredes duplas

Nas paredes duplas, a caixa de ar desempenha um papel fundamental, contribuindo para a evaporação e drenagem da humidade proveniente do exterior, quer por infiltração, quer por capilaridade, ou ainda pela condensação do vapor de água que migra do interior para o exterior [25].

Na seleção do isolante térmico para aplicação na caixa de ar, deve dar-se especial atenção à sua resistência à humidade, dado que esta zona pode apresentar índices elevados de saturação.

A utilização de materiais isolantes hidrófugos ou com propriedades adequadas de resistência à água é essencial para garantir a durabilidade e a eficácia do isolamento [25][24].

Deve ainda assegurar-se uma correta ventilação da caixa de ar, sempre que possível, a fim de potenciar a drenagem e a evaporação natural da humidade acumulada [25].

Nas figuras 6 e 7 ilustram-se algumas soluções correntes de isolamento térmico de paredes duplas.

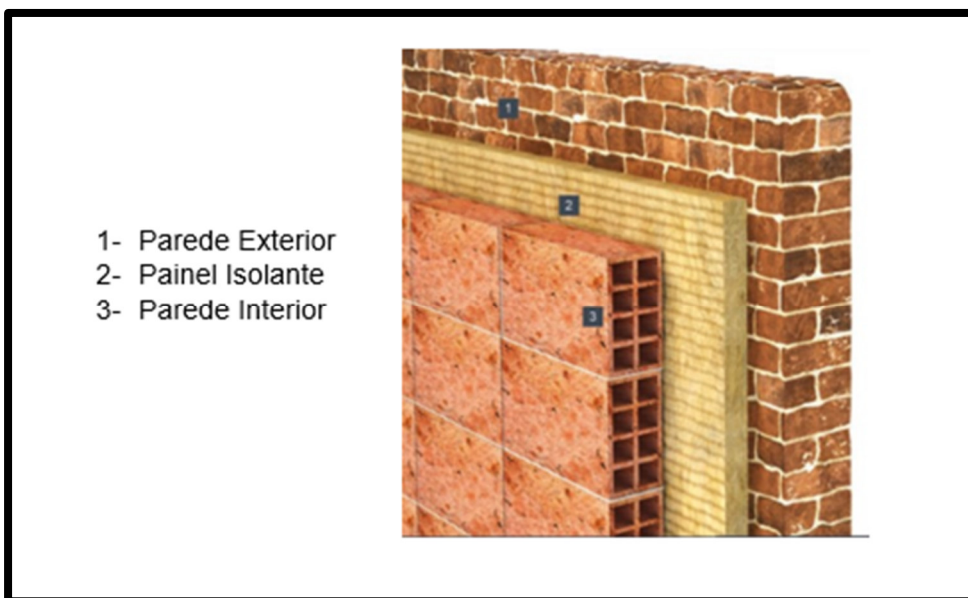


Figura 6- Exemplo Imperialum - Parede Dupla de fachada (caixa de ar totalmente preenchida por isolante)



Figura 7- Exemplo Imperialum - Parede dupla de fachada ventilada (caixa de ar parcialmente preenchida por isolante)

Paredes simples

O isolamento térmico em paredes simples é, na maioria dos casos, realizado pelo exterior do edifício.

Esta solução tem a vantagem de não reduzir a área útil interior e, simultaneamente, proteger a fachada contra variações térmicas e agentes atmosféricos. Além disso, a sua aplicação é geralmente mais simples e rápida [24][25].

Algumas opções comuns de materiais para isolamento exterior incluem:

- Placas rígidas de poliestireno extrudado (XPS) ou expandido (EPS);
- Sistemas compostos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems) [24].

No entanto, existem situações em que a única opção possível é o isolamento pelo interior do edifício.

Tal ocorre, por exemplo, em reabilitações de edifícios classificados, onde as fachadas são protegidas, ou em prédios onde não é possível garantir um isolamento exterior contínuo de toda a envolvente [25].

As soluções para isolamento pelo interior incluem:

- Sprays de materiais plásticos aplicados diretamente sobre as paredes;
- Painéis rígidos de lã mineral ou de fibras celulósicas;
- Painéis de poliestireno extrudido (XPS), igualmente aplicáveis no interior;
- O reboco térmico aplicado sobre o sistema isolante interior deve ser específico para ambientes interiores.

Nestes casos, uma vantagem adicional é que, devido à elevada eficácia térmica dos materiais aplicados, e da reduzida espessura do reboco final, otimiza-se o espaço interior sem comprometer o desempenho térmico do edifício [25].

Nas figuras 8 e 9 ilustram-se algumas soluções correntes de isolamento térmico de paredes simples.



Figura 8- Exemplo Imperialum - Parede simples de fachada ETIC (Isolamento Aderido pelo Exterior)



Figura 9- Exemplo Imperialum - Parede simples de fachada (Isolamento Interior)

Pavimentos

Nas lajes de pavimento pertencentes à envolvente térmica do edifício, quer em pavimentos térreos, quer sobre zonas exteriores ou sobre espaços interiores não climatizados, é comum registarem-se perdas térmicas significativas. Estas perdas justificam a necessidade de aplicação de um isolamento térmico eficaz, de forma a garantir o conforto térmico e a eficiência energética do edifício [24][25]. As soluções construtivas adotadas para este fim são, na maioria dos casos, semelhantes às utilizadas nas estruturas de cobertura, aproveitando a versatilidade de materiais e técnicas já testadas e consolidadas.

Exemplos de soluções técnicas comuns incluem:

- Painéis rígidos de poliestireno extrudido (XPS), adequados para suportar cargas elevadas,
- Lajes de betão leve com adição de materiais isolantes,
- Sistemas compostos de isolamento integrados no piso, protegidos por betonilhas estruturais.

O objetivo final é garantir a redução das perdas térmicas pela base do edifício, contribuindo para a eficiência energética e para o conforto térmico dos espaços interiores [24].

Nas figuras 10 a 12 ilustram-se algumas soluções correntes de isolamento térmico de pavimentos.

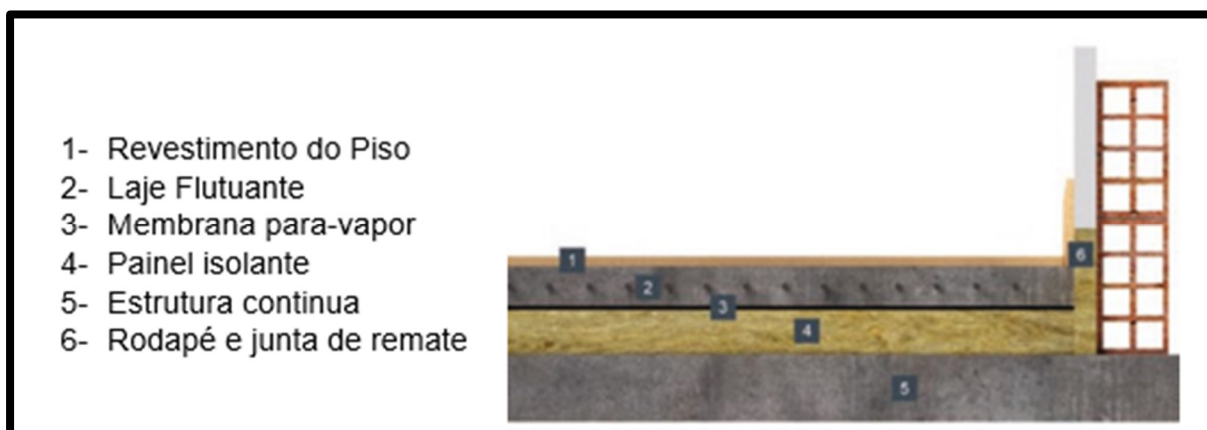


Figura 10- Exemplo Imperialum - Pavimento sobre espaço interior



Figura 11- Exemplo Imperialum - Pavimento sobre espaço exterior



Figura 12 - Exemplo Imperialum - Pavimento subterrâneo

Pontes térmicas

A existência de pontes térmicas na envolvente do edifício origina perdas térmicas adicionais, comprometendo a eficiência energética global do edifício [27][24].

Além disso, as pontes térmicas promovem a formação de humidades e condensações, o que acelera o processo de deterioração dos materiais e estruturas localizados nessas zonas críticas.

As pontes térmicas mais comuns encontram-se nas seguintes situações:

- Nas frentes de lajes,
- Em vigas e pilares,
- Nas caixas de estores,
- E em todos os elementos construtivos que interrompam a continuidade do isolamento térmico [27].

A correta identificação e tratamento das pontes térmicas é essencial para garantir:

- A redução do consumo energético do edifício;
- A melhoria do conforto térmico dos utilizadores;
- A prevenção de patologias associadas à condensação e ao desenvolvimento de fungos ou microalgas [24].

A solução eficaz pode passar por:

- A aplicação contínua dos materiais isolantes;

- A utilização de materiais de elevada resistência térmica nas zonas críticas, o que pode permitir trabalhar com menores espessuras;
- Se necessário, a reformulação dos detalhes construtivos para minimizar descontinuidades [24].

4. Casos Práticos de Isolamentos Térmicos em Edifícios

Neste capítulo serão apresentadas duas situações reais, abrangendo todas as fases desde o estudo térmico até à execução da obra. Ambos os casos baseiam-se nos requisitos estabelecidos pelo RT2012, regulamento térmico em vigor em França à data da elaboração dos projetos.

A principal diferença entre os dois casos apresentados reside na tipologia estrutural dos edifícios:

- Um dos edifícios é executado com estrutura de betão armado;
- O outro com estrutura em madeira.

4.1 Caso prático 1: Isolamento de paredes de estrutura de betão e tetos inclinados.

O primeiro caso de estudo refere-se a um empreendimento composto por 60 apartamentos, divididos em dois edifícios adjacentes.

O conjunto apresenta a seguinte configuração:

- RDC + 6 pisos superiores (Rés-do-chão mais seis andares),
- Dois níveis de subsolo destinados a estacionamento.

O desafio principal focou-se na definição das soluções de isolamento térmico para as paredes exteriores e para os tetos inclinados, assegurando o cumprimento das exigências do RT2012 em matéria de consumo energético e conforto térmico.

As figuras 13 a 17 ilustram as fachadas e plantas tipo do edifício em causa.

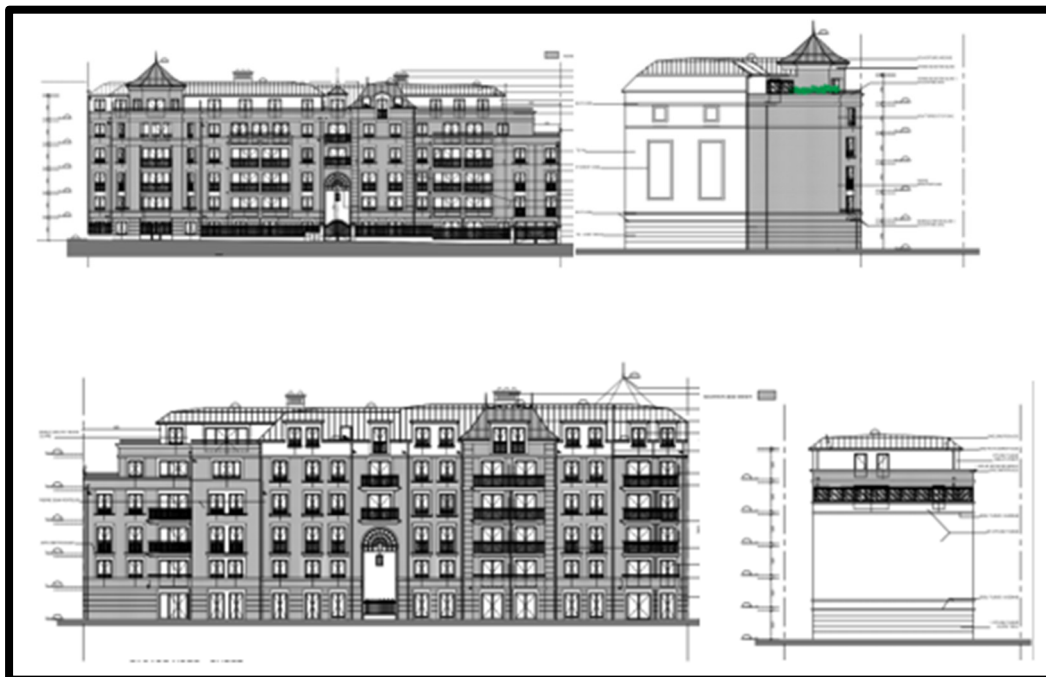


Figura 13 - Fachadas do edifício de estudo (fase projeto)

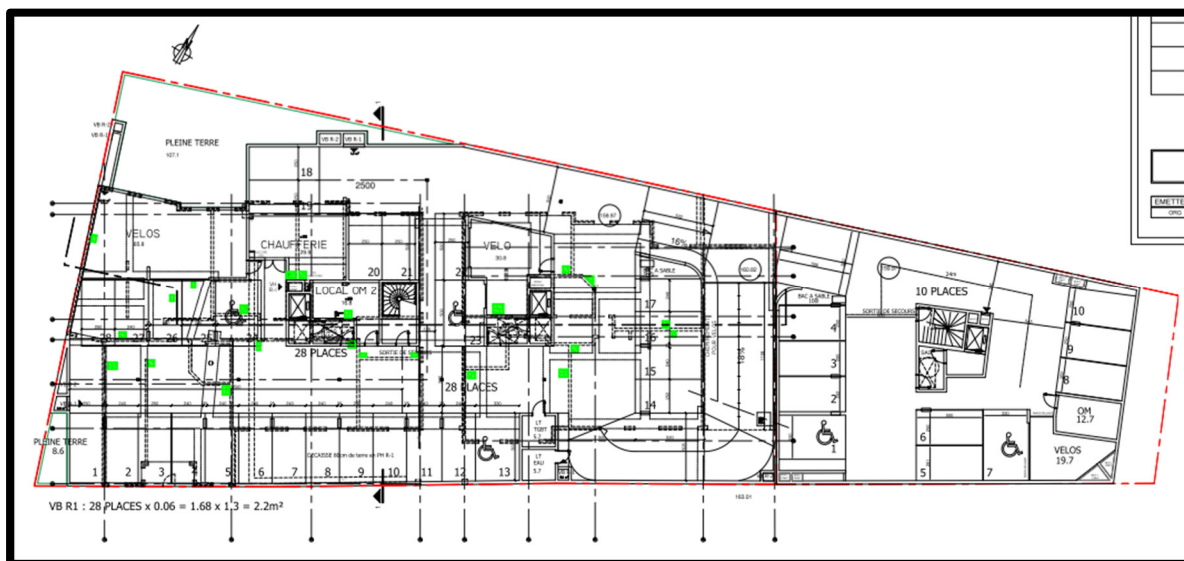


Figura 14 - Planta Sub-Solo do edifício de estudo (fase projeto)

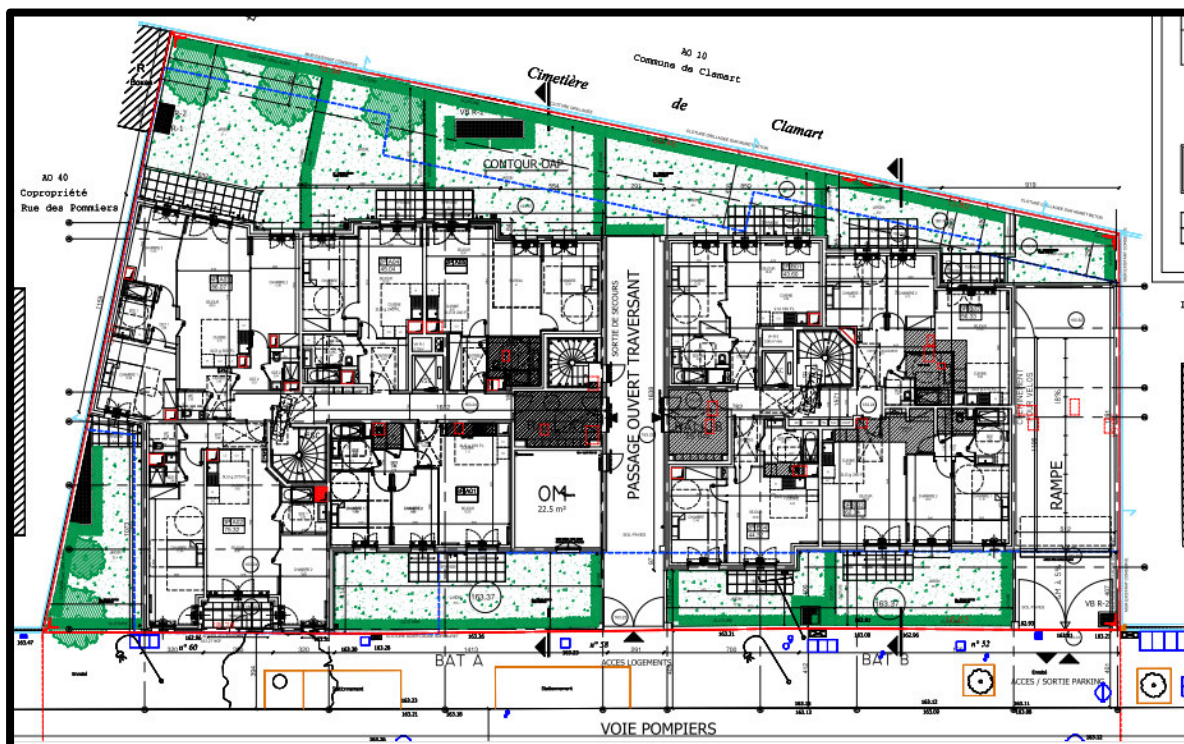


Figura 15- Planta RDC do edifício de estudo (fase projeto)

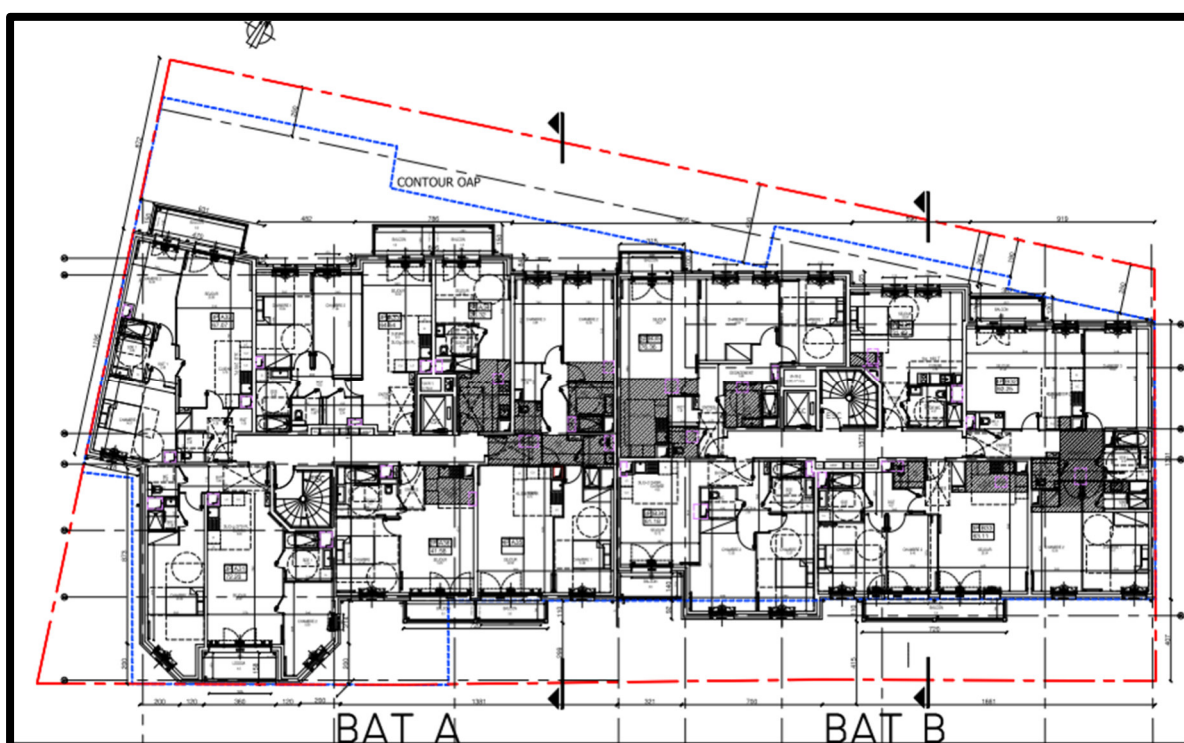


Figura 16- Planta Piso tipo do edifício de estudo (fase projeto)

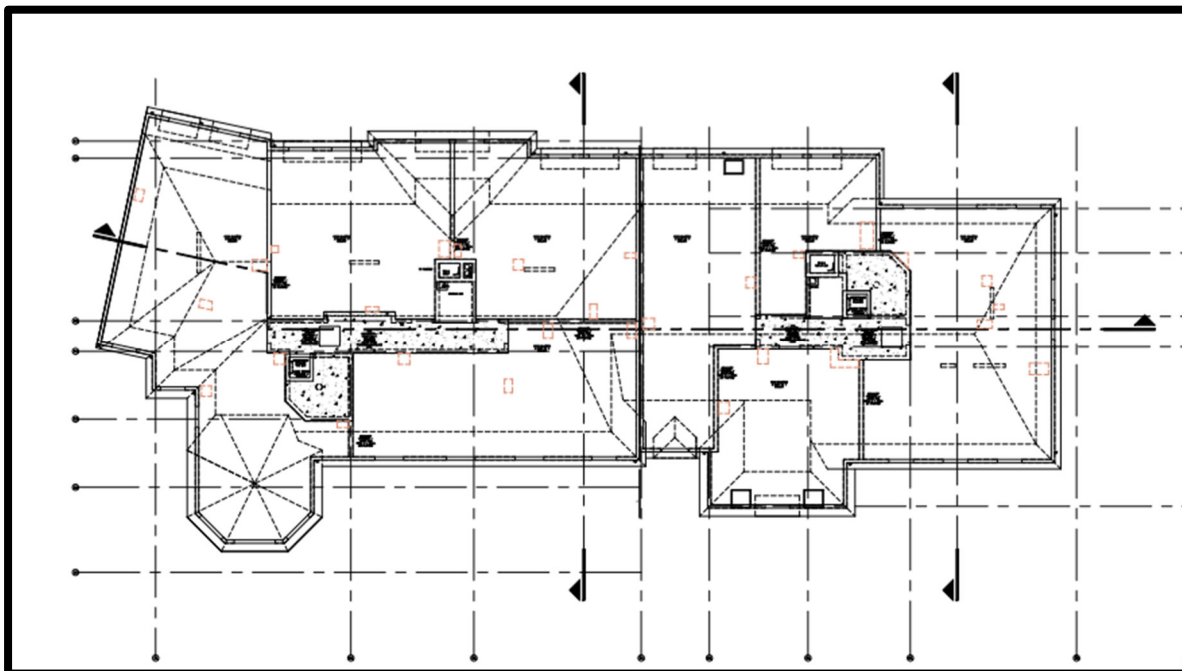


Figura 17 - Planta Cobertura do edifício de estudo (fase projeto)

4.1.1 Definições térmicas do projeto

O estudo térmico do edifício, datado de 16/05/2019, foi desenvolvido de acordo com as diretrizes do regulamento térmico francês RT2012.

São definidas as seguintes estruturas principais no estudo térmico:

Paredes verticais

Muros exteriores com isolamento pelo interior: compostos por um muro de betão armado, seguido de 120 mm de poliestireno ($R = 4,00 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) e 20 mm de revestimento e colas.

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,287 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Muros da rampa do parque: compostos por um muro de betão, 80 mm de poliestireno ($R = 2,65 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) e 20 mm de revestimento e colas.

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,344 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Muros de locais não aquecidos: compostos por um muro de betão, 80 mm de lã de vidro ($R = 2,50 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) e 20 mm de revestimento e colas.

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,353 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Pavimentos

Pavimento no parque: composto por uma laje de betão isolada sob a betonilha com 80 mm de poliuretano ($R = 3,45 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,256 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Pavimentos sobre locais não aquecidos: compostos por uma laje de betão e 105 mm de material isolante ($R = 3,40 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,261 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Pavimentos no exterior: compostos por uma laje de betão isolada na parte inferior com 125 mm de fibraestireno ($R = 4,00 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,233 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Tetos

Terraço acessível: laje de betão isolado com 80 mm de poliuretano ($R = 3,45 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,270 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Muros inclinados: compostos por elementos inclinados isolados com $2 \times 100 \text{ mm}$ de lã de vidro ($R = 6,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,190 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Telhados não acessíveis: compostos por cobertura leve isolada com $2 \times 100 \text{ mm}$ de lã de vidro ($R = 6,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).

→ Coeficiente de transmissão térmica: $U_p = 0,190 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

A figura 18 ilustra um dos pormenores de aplicação de isolamento de teto da referida obra.

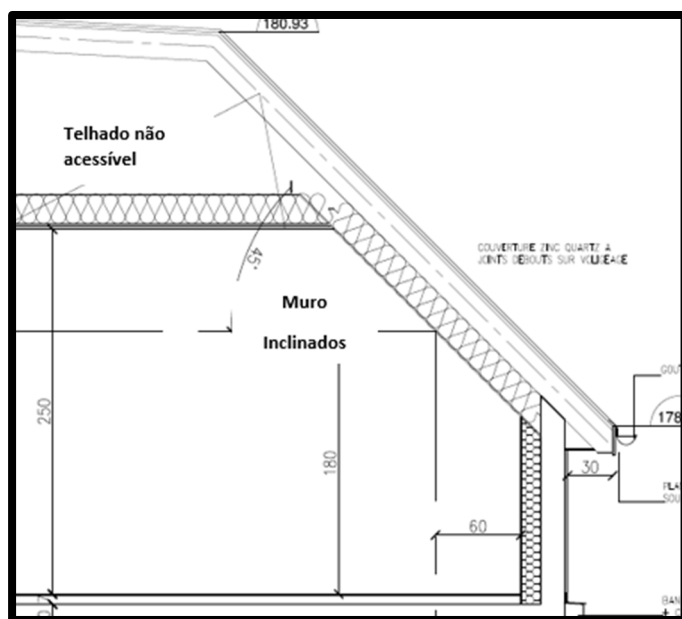


Figura 18- Detalhe representativo telhado não acessível e muro inclinado

4.1.2 Solução apresentada

A empresa responsável pela execução da obra atuou exclusivamente ao nível do isolamento de paredes e de tetos de apartamentos e dos halls de entrada. Assim, as soluções apresentadas ao cliente foram baseadas na gama de produtos comercializados pela própria empresa.

Relativamente às paredes, distinguiu-se:

- Paredes de fachada (envolvente exterior),
- Muros de locais não aquecidos, incluindo os muros de acesso ao parque de estacionamento subterrâneo.

Para os muros de fachada, foi proposta a instalação de placas Prégymax 13+120, com uma resistência térmica $R = 4,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Esta solução visa a otimização do isolamento térmico e acústico das paredes pelo interior, cumprindo os requisitos do RT2012.

Nos muros de locais não aquecidos, foi proposta uma solução da mesma gama, mas com menores valores de resistência térmica. Neste caso, propôs-se a utilização de Prégymax 13+80, com $R = 2,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

O sistema Prégymax consiste num painel compósito destinado ao isolamento térmico e acústico, composto por:

- Uma placa de gesso cartonado standard de 12,5 mm de espessura com arestas cónicas,
- Uma barreira de vapor incorporada,
- E um painel de poliestireno expandido (EPS) enriquecido com grafite.

O sistema é ideal para isolamentos interiores de paredes exteriores, estando disponível em diversas espessuras de isolamento para responder a diferentes exigências térmicas [50].

Nas figuras 19 e 20 podemos ver uma placa do isolante em questão (Pregymax) e uma tabela da gama deste disponível.

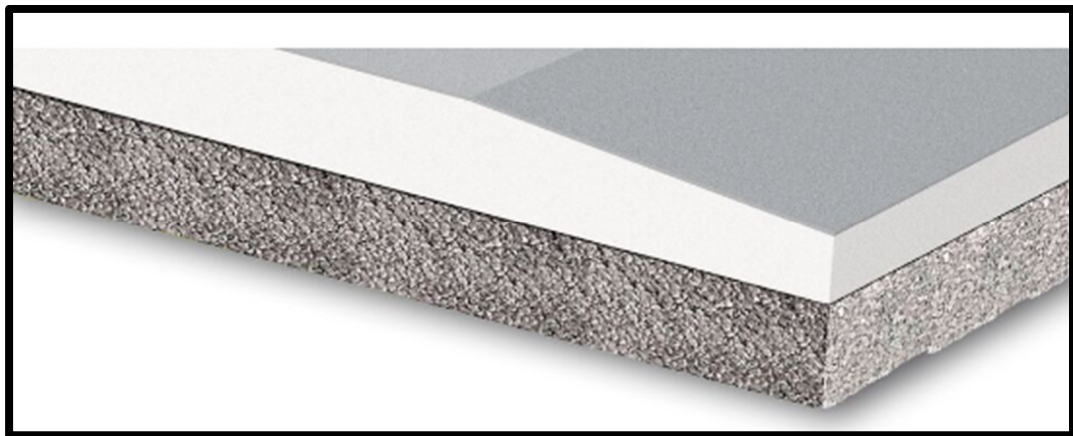
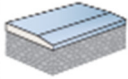
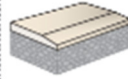
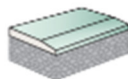
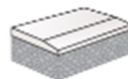
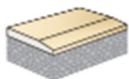


Figura 19 - Placa Pregymax

Type de doublage	Prégymax Std	Prégymax PV	Prégymax Hydro	Prégymax PV Hydro	Prégymax Déco	Prégymax Hydro Déco	Prégymax Dur
							

Performances thermiques

Recommandations SINIAT*	Niveau	Doublage et résistance thermique (m ² .K/W)	Épaisseur d'isolant (mm)	λ (W/(m.K))	Certification
Niveau Rénovation (RT dans l'existant) : Zone H3 (altitude < 800 m)	PRÉGYMAX R2	PRÉGYMAX R2,55	80	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R2,75	81	0,030	ACERMI 09/009/543
Niveau Rénovation (RT dans l'existant) : Zones H1, H2 et H3 (alt > 800 m)	PRÉGYMAX R3	PRÉGYMAX R3,15	100	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R3,40	101	0,030	ACERMI 09/009/543
Niveau RT 2012		PRÉGYMAX R3,80	120	0,032	ACERMI 11/009/717
Niveau RT 2012	PRÉGYMAX R4	PRÉGYMAX R4,10	122	0,030	ACERMI 09/009/543
		PRÉGYMAX R4,40	140	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R4,80	143	0,030	ACERMI 09/009/543
Niveau RT 2012 optimisée	PRÉGYMAX R5	PRÉGYMAX R5,05	160	0,032	ACERMI 11/009/717
		PRÉGYMAX R5,45	163	0,030	ACERMI 09/009/543

Figura 20 - Gama de placas pregymax SINIAT

Relativamente aos tetos falsos, foi proposta a aplicação de:

- Uma placa de gesso cartonado tipo BA18 ou BA13,
- Associada a 120+100 mm de lã mineral.

Esta solução cumpre as exigências definidas no estudo térmico do projeto, assegurando uma resistência térmica total de $R = 6,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, tal como estabelecido no estudo de desempenho energético [26].

A utilização combinada da placa de gesso cartonado com a lã mineral permite garantir:

- Um elevado desempenho em termos de isolamento térmico,
- Uma boa performance de isolamento acústico,
- E a manutenção da conformidade com os requisitos do RT2012.

4.1.3 Processo de execução

A aplicação de placas Pregymax em paredes de betão.

É um processo que visa reforçar e melhorar a capacidade estrutural das paredes existentes. Estas placas são usadas em projetos de reabilitação de edifícios ou na construção de novas estruturas, com o objetivo de aumentar a resistência do betão e prolongar a vida útil da parede. O processo de aplicação das placas Pregymax envolve várias etapas, que podem ser resumidas da seguinte forma:

1. Preparação da superfície:

Antes de aplicar as placas Pregymax, é essencial preparar a superfície da parede de betão. Isso inclui a remoção de quaisquer revestimentos antigos, tais como tintas, argamassa solta ou sujidade. A superfície deve estar limpa, seca e livre de qualquer material solto que possa comprometer a aderência das placas.

2. Inspeção da parede:

Antes de prosseguir com a aplicação das placas Pregymax, é importante realizar uma inspeção da parede para avaliar sua integridade estrutural. Quaisquer danos existentes devem ser reparados antes da aplicação das placas para garantir que a parede esteja em condições adequadas. O processo é ilustrado na figura 21.

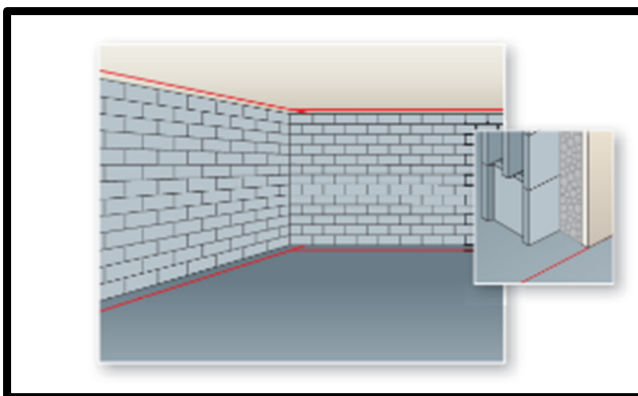


Figura 21 - Preparação das paredes para aplicação das placas Pregymax

3. Preparação das placas Pregymax:

As placas Pregymax são geralmente feitas de materiais reforçados, como fibras de carbono ou vidro. Elas vêm em tamanhos e espessuras diferentes, dependendo das necessidades do projeto. Antes da aplicação, as placas devem ser cortadas e moldadas de acordo com as dimensões da parede e os requisitos do projeto. O processo é ilustrado na figura 22.

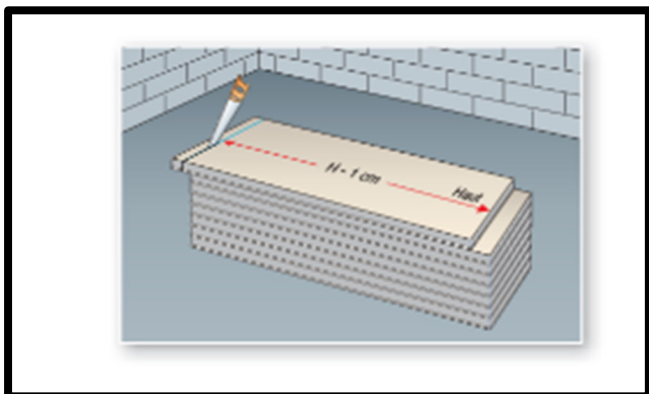


Figura 22- Preparação das placas Pregymax

4. Aplicação da cola adesiva:

Para fixar as placas Pregymax na parede de betão, é necessário aplicar um adesivo epóxi de alta resistência na superfície da parede e nas placas. A cola adesiva deve ser aplicada de maneira uniforme e em uma camada consistente. O processo é ilustrado nas figuras 23 e 24.



Figura 23- Preparação da cola Pregycolle

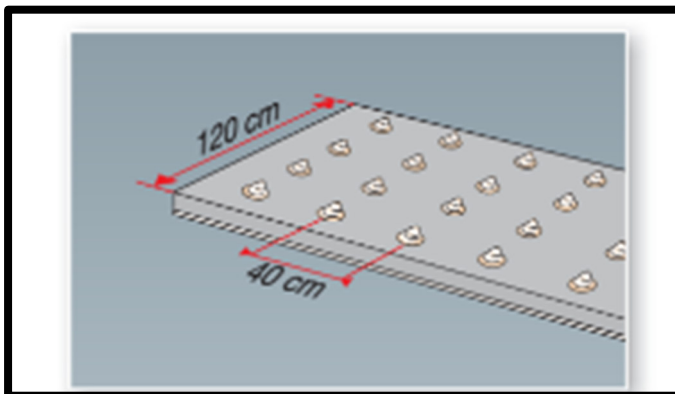


Figura 24- aplicação da Pregycolle nas placas Pregymax

5. Colocação das placas:

As placas Pregymax são cuidadosamente posicionadas na parede, garantindo que estejam alinhadas de acordo com o projeto e as especificações. É importante pressionar firmemente as placas para garantir uma aderência adequada. O processo é ilustrado na figura 25.

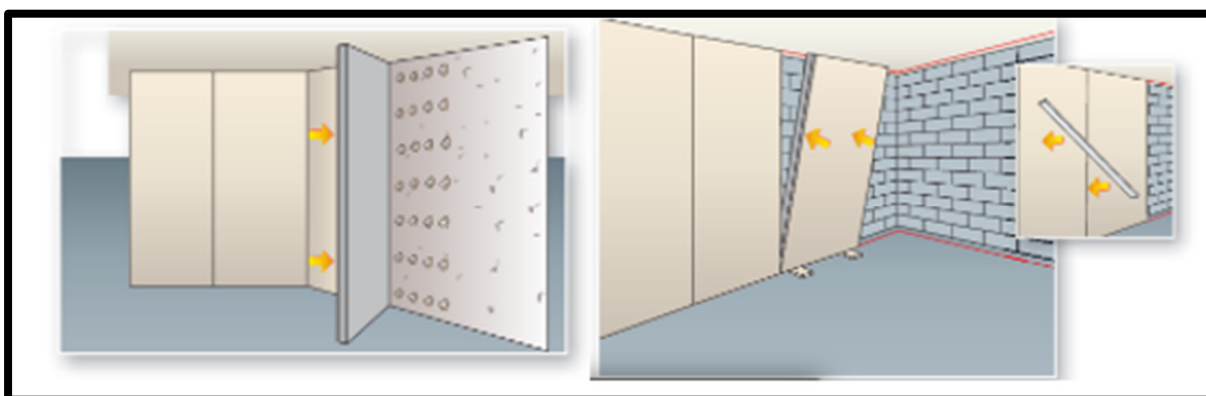


Figura 25 - Aplicação de placas Pregymax

6. Curagem:

Após a aplicação das placas Pregymax, o sistema precisa passar por um período de cura. Isso permite que o adesivo epóxi seque e cure completamente, proporcionando a máxima resistência.

7. Acabamento:

Após a cura completa, é possível fazer acabamentos na parede, como pintura ou outros revestimentos decorativos, de acordo com o design e a estética desejados.

É fundamental seguir as especificações do fabricante das placas Pregymax e as normas de construção locais ao realizar esse processo, uma vez que a aplicação inadequada pode comprometer a eficácia do reforço estrutural. Além disso, a contratação de profissionais qualificados e experientes para executar o trabalho é essencial para garantir a segurança e a qualidade da obra.

Aplicação de isolamento em tetos.

A aplicação de placas de gesso cartonado com isolamento acústico BA18+LV em tetos falsos é um processo que procura melhorar o isolamento acústico e térmico, bem como a estética do ambiente. O BA18+LV é um sistema que combina placas de gesso cartonado com uma camada de lã de vidro (LV) para proporcionar isolamento acústico adicional. Abaixo, descreve-se o processo de aplicação dessas placas em tetos falsos:

1. Preparação do teto:

Certifique-se de que a superfície do teto falso esteja limpa e livre de quaisquer irregularidades. Verifique também a presença de estruturas de suporte adequadas para fixação das placas. Se necessário, faça os ajustes e correções necessários na estrutura do teto.

2. Fixação das estruturas de suporte:

Instalação das estruturas de suporte, que normalmente consistem em perfis metálicos ou madeira, no teto. Essas estruturas servirão como base para a fixação das placas de gesso cartonado. Certificar-se de que estão niveladas e alinhadas de acordo com o projeto. O processo é ilustrado na figura 26.

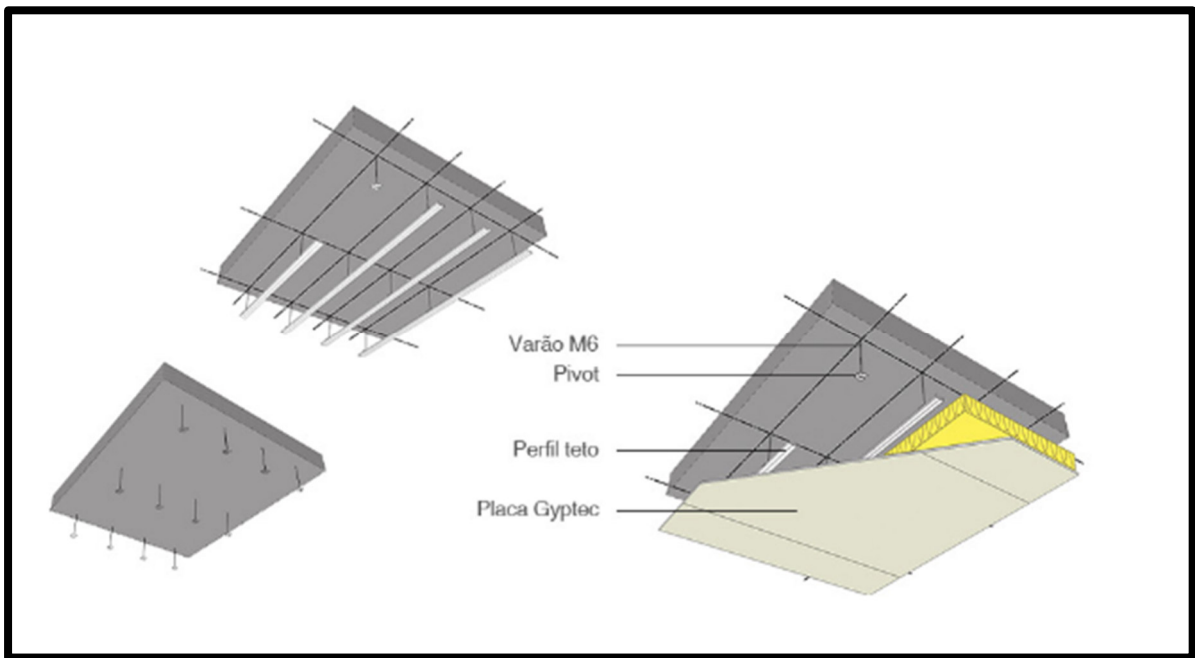


Figura 26 - Detalhe colocação teto falso - exemplo Gyptec

3. Inserção do isolamento de lã de vidro:

A camada de isolamento de lã de vidro (LV) é inserida entre as placas de gesso cartonado. Certificar-se de que o isolamento esteja bem distribuído e preencher completamente o espaço entre as placas. Isso ajudará a melhorar o isolamento acústico e térmico do teto falso. O processo é ilustrado na figura 27.

4. Colocação das placas de gesso cartonado:

As placas de gesso cartonado BA18+LV são fixadas nas estruturas de suporte. Elas são aparafusadas ou pregadas nas estruturas, garantindo uma fixação segura e uniforme. Certificar-se de que as placas estejam bem alinhadas e ajustadas para evitar lacunas ou irregularidades.

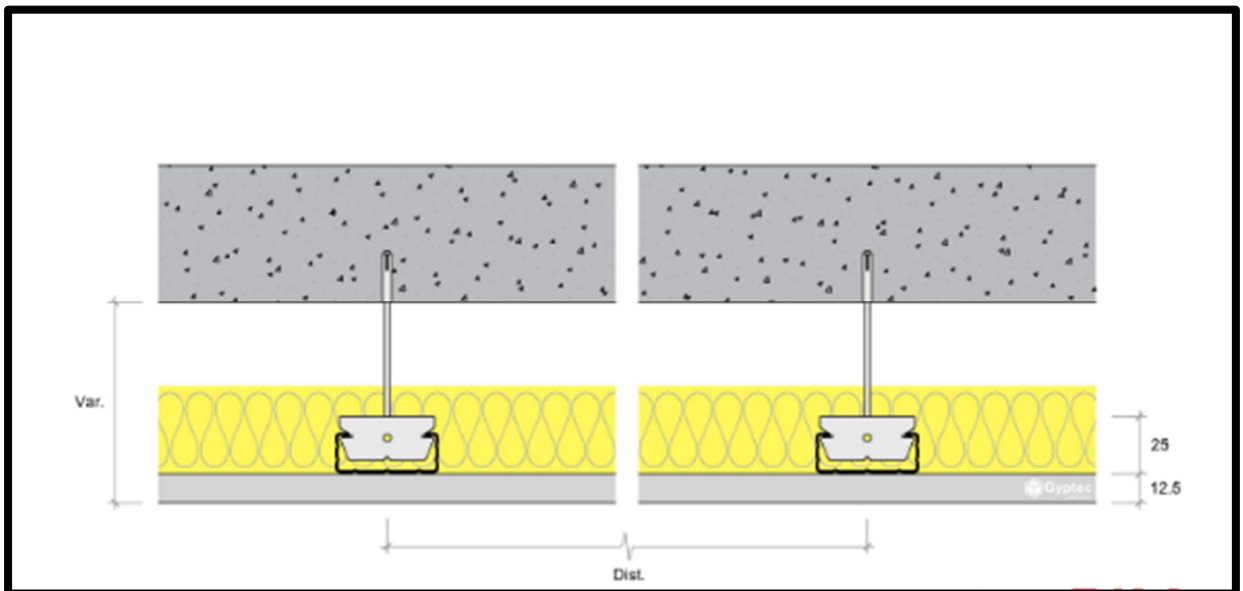


Figura 27 - Resultado Esquemático da solução com isolamento do teto – Gyp tec

5. Vedação das juntas:

Após a instalação das placas e do isolamento, é importante vedar as juntas entre as placas de gesso cartonado com fita e massa de rejunte próprias para gesso. Isso garantirá que as juntas fiquem lisas e uniformes.

6. Acabamento:

Finalizar o teto falso de acordo com o design desejado. Isso pode incluir a aplicação de tinta, papel de parede ou outros revestimentos decorativos. O processo é ilustrado na figura 28.



Figura 28- Finalização de juntas

A instalação de placas de gesso cartonado com isolamento acústico BA18+LV em tetos falsos é uma excelente maneira de melhorar o conforto acústico e térmico de um espaço. É importante seguir as especificações do projeto e as normas de construção locais, além de contar com profissionais qualificados para garantir que o sistema seja instalado corretamente e alcance os objetivos de isolamento acústico e térmico desejados.

4.1.4 Resultado em obra

Nas figuras 29 a 33 estão algumas fotos da aplicação das placas Pregmax na obra acima descrita.



Figura 29- Teto após aplicação de isolamento pronto a receber acabamento



Figura 30 - Aplicação de Isolamento em muros inclinados



Figura 31- Teto finalizado pronto a receber acabamento



Figura 32 – Paredes preparada para receber placas Pregymax



Figura 33 - Aplicação das placas Pregymax em obra

4.2 Caso prático 2: Isolamento de paredes de estrutura de madeira

O segundo caso de estudo diz respeito a um edifício residencial composto por 30 apartamentos, com a configuração de RDC (rés-do-chão) + 3 pisos superiores e 1 nível de subsolo destinado a estacionamento. A estrutura principal do edifício é predominantemente em madeira. As figuras 34 a 38 ilustram as fachadas e plantas tipo do edifício em causa.



Figura 34 - Fachada do Edifício do 2º caso de estudo (fase projeto)

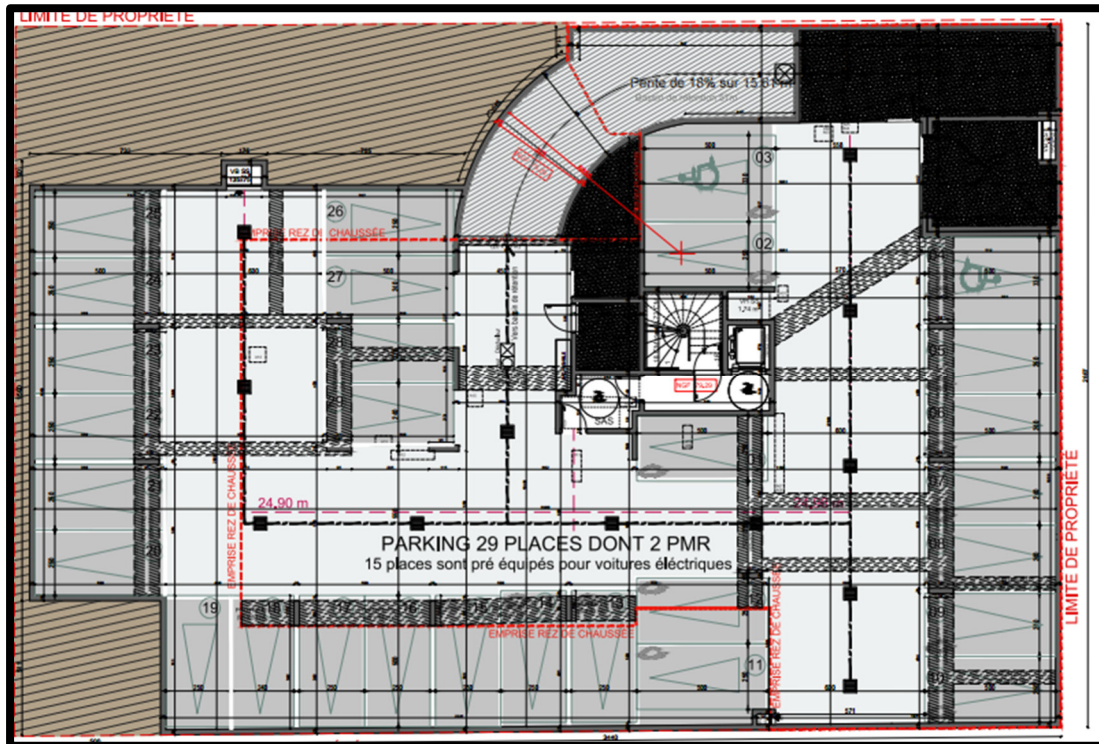


Figura 35- Planta Sub-Solo do edifício de estudo (fase projeto)

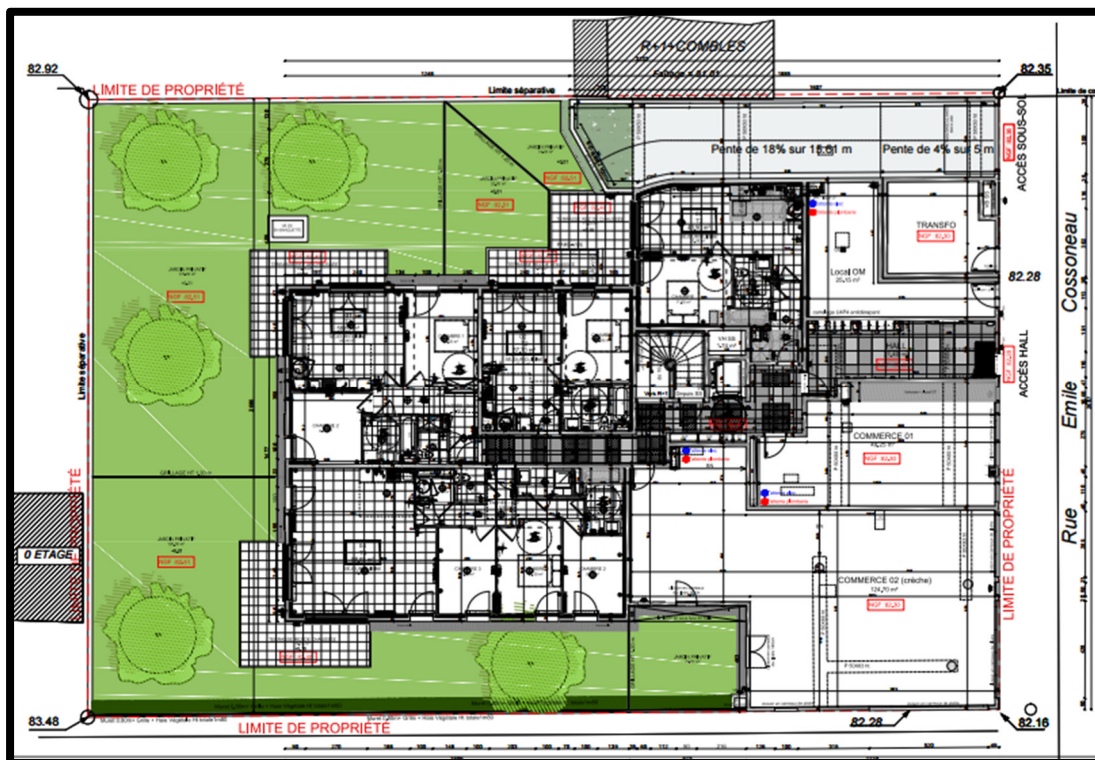


Figura 36 - Planta RDC do edifício de estudo (fase projeto)

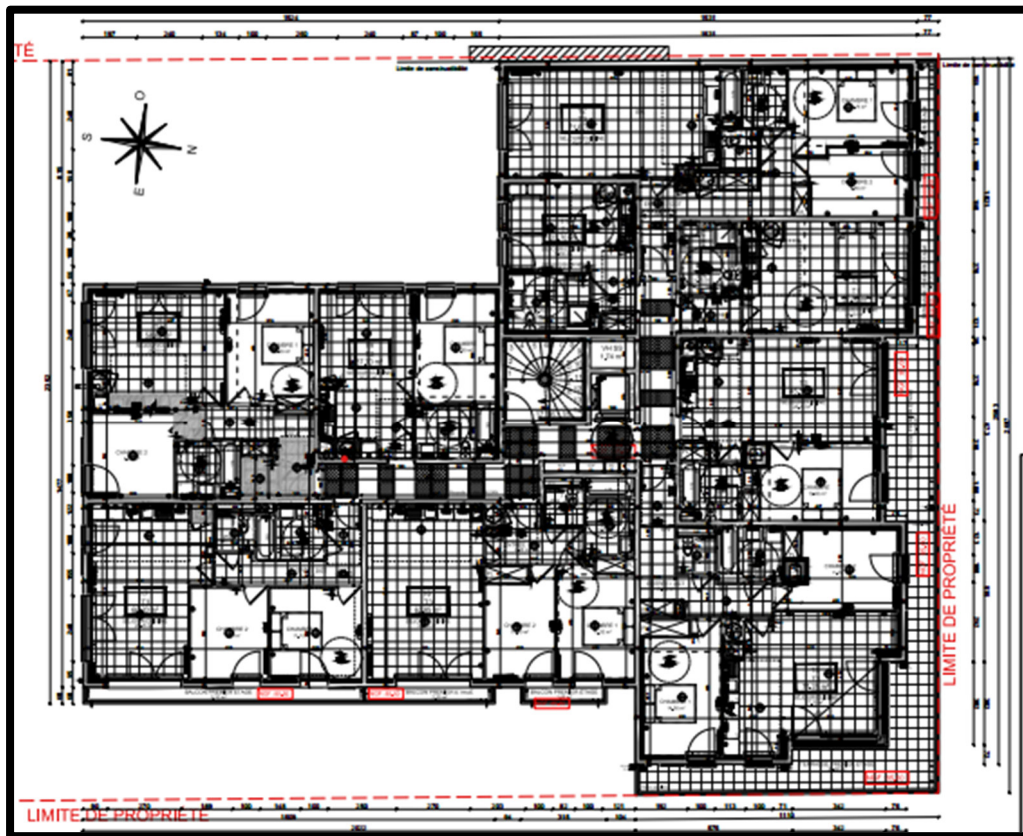


Figura 37- Planta piso tipo do edifício de estudo (fase projeto)

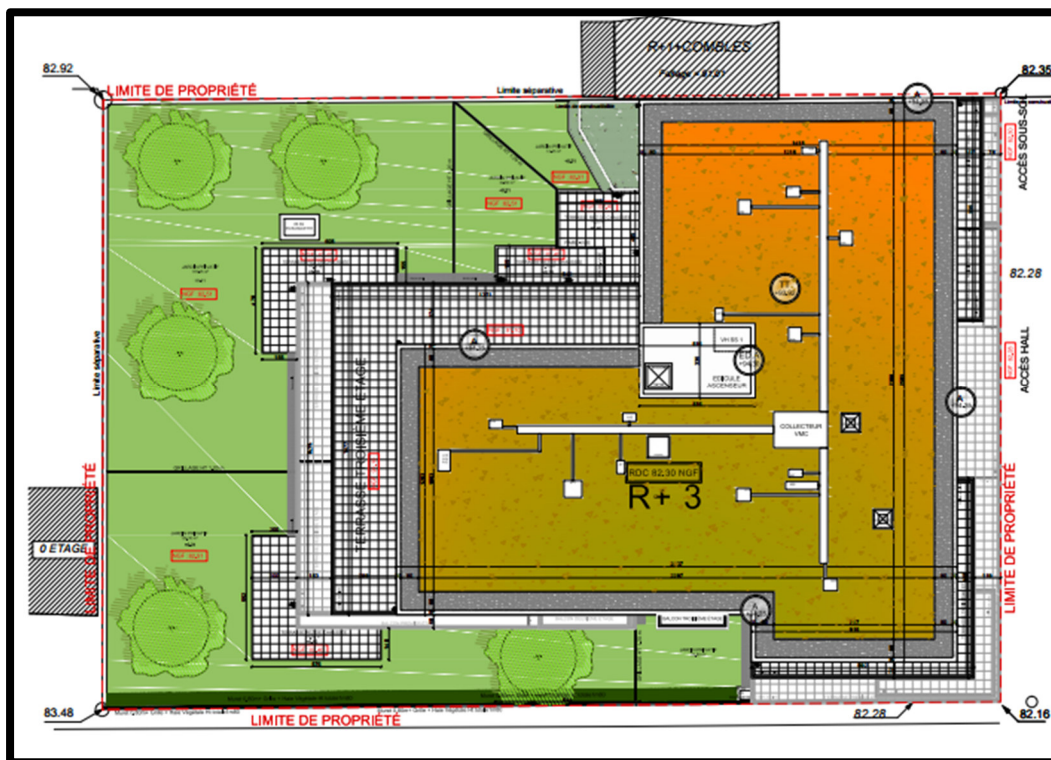


Figura 38 - Planta Cobertura do edifício de estudo (fase projeto)

4.2.1 Definições térmicas do projeto

O estudo térmico do edifício, datado de 19 de abril de 2019, foi realizado segundo as diretrizes estabelecidas pelo Regulamento Térmico RT2012 em vigor em França à data da sua conceção.

As principais definições construtivas são:

Paredes verticais

- Muros exteriores (com isolamento pelo interior): estrutura em madeira + placa BA13 + 60 mm de isolamento, $R = 1,85 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$;
- Muros de separação entre apartamentos: estrutura em madeira + placa BA13 + 60 mm de isolamento, $R = 1,85 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$;
- Muros de locais não aquecidos: estrutura em betão + 120 mm de isolamento + 20 mm de revestimento e colas, $R = 4,10 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, $U_p = 0,353 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Pavimentos

Sem informações detalhadas de isolamento térmico disponíveis nesta fase.

Tetos

Muros inclinados com isolamento de lã de vidro 220 + 120 mm, resultando numa resistência térmica de $R = 10,00 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$.

4.2.2 Solução apresentada

Dado o âmbito da atuação da empresa, a proposta incidiu na aplicação de soluções para paredes e tetos dos apartamentos e zonas comuns.

As soluções propostas foram:

Paredes exteriores:

- Aplicação de 1 placa BA13 associada a 60 mm de lã mineral, conferindo $R = 1,85 \text{ m}^2.K/W$.

Paredes de locais não aquecidos:

- Utilização de Prégymax 13+120, atingindo $R = 4,10 \text{ m}^2.K/W$.

Tetos falsos (último piso):

- Instalação de 1 placa BA18 associada a 2 camadas de lã mineral de 160 mm cada, perfazendo $R = 8,00 \text{ m}^2.K/W$.

4.2.3 Processo de execução

A aplicação de isolamento em paredes de madeira.

A utilização de sistemas de parede de gesso cartonado com isolamento aplicado sobre estrutura de madeira constitui uma solução eficaz para reforçar o conforto interior, permitindo simultaneamente a passagem de infraestruturas técnicas e a correção de irregularidades das paredes existentes. Abaixo descreve-se, de forma estruturada, o processo de instalação de sistemas de parede de gesso cartonado com isolamento térmico e acústico, utilizando uma estrutura de madeira e placas de gesso cartonado, detalhando os materiais necessários e os passos fundamentais da execução.

1. Preparação da Estrutura de Madeira

Antes da instalação do gesso cartonado, é essencial verificar a estrutura principal de madeira, garantindo que os montantes e travessas se encontram em bom estado, nivelados e devidamente fixos. Esta estrutura é o elemento base sobre o qual será montado o isolamento e as placas de gesso cartonado. Processo ilustrado na figura 39.

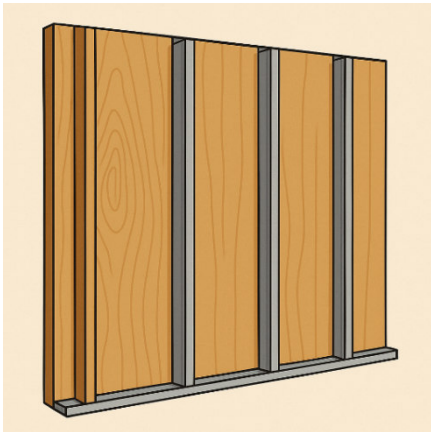


Figura 39 - Esquema técnico gerado por inteligência artificial: Parede de madeira com montantes metálicos.

2. Colocação do Material Isolante

O material isolante, como lã de vidro ou lã de rocha, é aplicado entre os montantes metálicos. A instalação deve ser cuidadosa, preenchendo completamente os espaços disponíveis para maximizar o desempenho térmico e acústico da parede. Processo ilustrado na figura 40.



Figura 40 - Esquema técnico gerado por inteligência artificial: parede de madeira com montantes metálicos e isolamento em lã mineral.

3. Fixação das Placas de Gesso Cartonado

As placas de gesso cartonado (tipo BA13, por exemplo) são cortadas conforme necessário e fixadas diretamente à estrutura de madeira através de parafusos apropriados. Deve garantir-se o correto alinhamento e espaçamento das juntas entre placas. Processo ilustrado na figura 41.

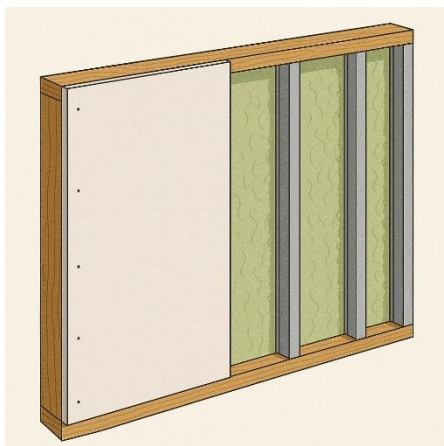


Figura 41- Esquema técnico ilustrativo gerado por inteligência artificial: parede de madeira com estrutura metálica, lã mineral e placa de gesso cartonado.

4. Aplicação do Adesivo

Para reforçar a ligação entre placas e reduzir a possibilidade de fissuração, recomenda-se a aplicação de adesivo nas bordas das placas, especialmente nas uniões entre elas.

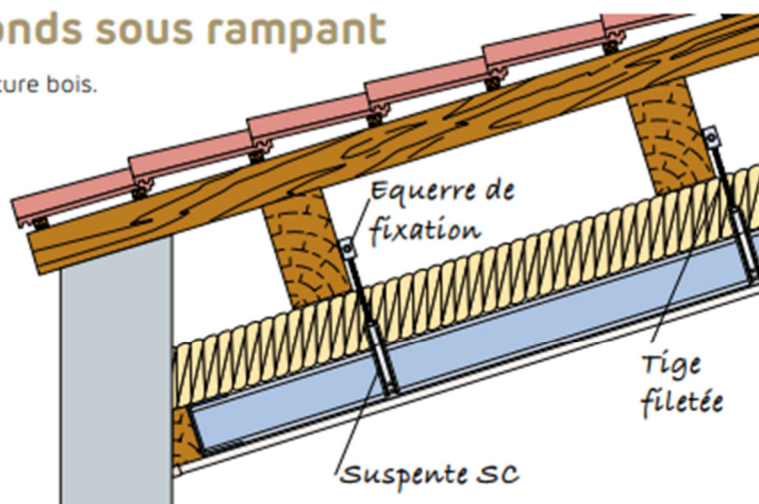
5. Acabamentos

Após a instalação das placas, procede-se ao tratamento das juntas com fita e massa própria. Uma vez seca e lixada a superfície, esta encontra-se pronta para receber o acabamento final, que poderá incluir pintura, aplicação de papel de parede ou outro tipo de revestimento conforme o projeto decorativo.

A figura 42 representa um exemplo da aplicação e fixação de isolamento num teto de estrutura de madeira inclinada.

► Plafonds sous rampant

■ Sous structure bois.



Conseil Pro

Pour reprendre les efforts horizontaux, bloquer les montants en partie basse.



Figura 42 - Esquema representativo de execução de teto inclinado, Siniat

A execução do isolamento em tetos é semelhante á descrita no caso prático 1, Capítulo 4.1 da presente dissertação.

4.2.4 Resultado em obra

Nas figuras 43 e 44 estão algumas fotos da aplicação do isolamento na obra acima descrita.



Figura 43 - Aplicação de acabamento em gesso cartonado em parede



Figura 44 - teto falso pronto a receber acabamento de gesso cartonado

5. Notas conclusivas

A análise desenvolvida, com base na experiência profissional, permitiu realizar uma comparação entre as soluções de isolamento térmico adotadas nos mercados francês e português, com especial aprofundamento no contexto francês, dada a inserção laboral nesse mercado. Foram ainda estudados dois casos concretos que evidenciam as exigências térmicas em França, demonstrando como estas variam consoante o tipo de estrutura dos edifícios e os métodos de aplicação utilizados.

Conclui-se que, em França, as exigências em matéria de desempenho térmico são significativamente mais rigorosas do que em Portugal, em parte devido às condições climáticas. O mercado francês revela-se também mais evoluído no que diz respeito às soluções de isolamento, oferecendo opções mais diversificadas, de aplicação mais simples e rápida. Um exemplo é o uso de placas BA13 com isolamento integrado, aplicadas pelo interior, que representam uma solução economicamente vantajosa em França, em contraste com os métodos tradicionais de isolamento pelo exterior mais comuns em Portugal. No contexto português, esta solução não é amplamente adotada, apresentando-se como menos acessível e, por consequência, menos competitiva em termos de custo.

Do ponto de vista ambiental, salienta-se a necessidade de uma maior promoção e apoio a soluções ecológicas de isolamento, que representam um contributo relevante para a sustentabilidade ambiental. Para tal, torna-se essencial o reforço de incentivos e exigências regulamentares que fomentem a adoção de práticas de construção mais sustentáveis. Esta reflexão reveste-se de particular pertinência, tendo em conta a formação académica na área ambiental, e reforça a importância de uma abordagem à construção que esteja em consonância com os princípios da sustentabilidade e da responsabilidade ecológica.

6. Referências

- [1] European Commission. Buildings – Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (consultado em junho de 2025).
- [2] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. Diretiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios. JOUE L 1/65, de 16 de dezembro de 2002.(consultado em junho de 2025).
- [3] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). JOUE L 153/13, de 19 de maio de 2010.(consultado em junho de 2025).
- [4] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. Diretiva (UE) 2018/844 que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE relativa à eficiência energética. JOUE L 156/75, de 19 de junho de 2018.(consultado em junho de 2025).
- [5] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. Diretiva (UE) 2024/1275 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). JOUE L 2024/1275, de 24 de abril de 2024.(consultado em junho de 2025).
- [6] European Commission. European Green Deal – Communication COM(2019) 640 final. Brussels, 2019.(consultado em junho de 2025).
- [7] Comissão Europeia. (2016). Pacote "Energia Limpa para Todos os Europeus". Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en .(consultado em junho de 2025).
- [8] Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas. (2015). Acordo de Paris. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> .(consultado em junho de 2025).
- [9] European Commission. Sustainability and the Built Environment. Bruxelas, 2022. Disponível em: <https://ec.europa.eu> (Acesso em abril 2025).

- [10] Torcellini, P., et al. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. National Renewable Energy Laboratory (NREL), EUA, 2006. Disponível em: <https://www.nrel.gov> (Acesso em abril 2025).
- [11] European Parliament. Towards Nearly Zero-Energy Buildings (NZEB). Bruxelas, 2010. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu> (Acesso em abril 2025).
- [12] Torcellini, P., Pless, S., Deru, M. Zero Energy Buildings: Definitions and Performance Measurements. NREL, EUA, 2006. Disponível em: <https://www.nrel.gov> (Acesso em abril 2025).
- [13] Laustsen, J. Energy Efficiency Requirements in Building Codes: Policies for New Buildings. International Energy Agency (IEA), 2008. Disponível em: <https://www.iea.org> (Acesso em abril 2025).
- [14] European Commission. Recommendations on Nearly Zero-Energy Buildings (NZEB). Bruxelas, 2016. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy> (Acesso em abril 2025).
- [15] ASHRAE. Definition of Net Zero Energy Buildings. Atlanta, EUA, 2015. Disponível em: <https://www.ashrae.org> (Acesso em abril 2025).
- [16] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. 5.^a edição. McGraw-Hill Education, 2015.
- [17] ASHRAE. Fundamentals – Thermal Properties and Heat Transfer. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017. Disponível em: <https://www.ashrae.org> (Acesso em abril 2025).
- [18] European Committee for Standardization (CEN). EN ISO 13790:2008 – Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. Bruxelas, 2008.
- [19] European Committee for Standardization (CEN). EN ISO 6946:2007 – Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method. Bruxelas, 2007.

- [20] ADEME – Agence de la Transition Écologique. Guide pratique de l'isolation thermique. França, 2021. Disponível em: <https://www.ademe.fr> (Acesso em abril 2025).
- [21] European Committee for Standardization (CEN). EN ISO 10456:2007 – Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Bruxelas, 2007.(Acesso em abril 2025).
- [22] ADENE – Agência para a Energia. Guia Técnico: Isolamentos Térmicos na Construção e na Reabilitação. Lisboa, 2020. Disponível em: <https://www.adene.pt> (Acesso em abril 2025).
- [23] International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency in Buildings: Guidance for Material Selection. Paris, 2020.
- [24] ADENE – Agência para a Energia. Guia Técnico: Isolamentos Térmicos na Construção e na Reabilitação. Lisboa, 2020. Disponível em: <https://www.adene.pt> (Acesso em abril 2025).
- [25] LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Manual de Boas Práticas de Isolamento Térmico em Edifícios. Lisboa, 2021.
- [26] Saint-Gobain Placo. Prégymax® – Placa de isolamento térmico e acústico para interiores. Catálogo Técnico, 2021. Disponível em: <https://www.placo.pt> (Acesso em abril 2025).

