

Avaliação da Sustentabilidade de Soluções de Reabilitação Energética para Paredes Exteriores de um Edifício de Habitação

Andreia Macedo

Bolseira de Investigação, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal
andrea_maced2@hotmail.com

Ricardo Mateus

Universidade do Minho, Guimarães, Portugal
ricardomateus@civil.uminho.pt

Sandra Silva

Universidade do Minho, Guimarães, Portugal
sms@civil.uminho.pt

Resumo: A indústria da construção tem um papel de destaque no Desenvolvimento Sustentável, contribuindo de forma significativa para os impactes ambientais, sociais e económicos da humanidade. A construção de novos edifícios e infraestruturas e a sua reabilitação devem reger-se pelos princípios de desenvolvimento sustentável. A reabilitação de edifícios pode contribuir para uma melhoria do desempenho ambiental das cidades e da qualidade de vida dos seus cidadãos. O presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento sustentável através da identificação e seleção de soluções construtivas e materiais para a reabilitação de paredes exteriores de um edifício, de modo a que sejam o mais compatíveis possível com os objetivos do desenvolvimento sustentável

1 INTRODUÇÃO

Apesar do elevado ritmo de construção nova verificada nos últimos anos, o parque edificado português e em particular o setor residencial, mesmo considerando a construção mais recente, ainda é genericamente envelhecido (ADENE, LNEC, INETI e IPQ, 2004).

Segundo os dados do Instituto Nacional de Estatística, o parque habitacional de Portugal encontra-se degradado e com uma qualidade construtiva deficiente (INE, 2008). Com estes dados conclui-se que é necessário requalificar e preservar o parque habitacional existente, evitando a sua degradação física, adotando níveis de conforto e salubridade mínimos. O nível de degradação no parque habitacional justifica-se pelo facto de, na generalidade, não ser objeto de intervenções regulares de manutenção/reabilitação, pela falta de qualidade dos materiais, processos e sistemas construtivos empregues nos edifícios e pelo facto da época de construção ser anterior à existência de regulamentação térmica de edifícios (ADENE, LNEC, INETI e IPQ, 2004).

As construções anteriores à entrada em vigor do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, posteriormente revogado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006, são insatisfatórias do ponto de vista do seu contributo para o grau de conforto térmico do ambiente interior, pelo que estão associadas a um excessivo consumo energético para climatização. A reabilitação energética do edificado, para que este se enquadre nos requisitos impostos pelo atual RCCTE, contribui para uma redução significativa do seu consumo energético, maximizando, ao mesmo tempo, as condições de conforto, saúde e bem-estar dos seus ocupantes.

A envolvente de um edifício (paredes exteriores e cobertura) desempenha um papel fundamental na eficiência energética do mesmo. A aplicação de isolamento térmico pode possibilitar a economia de até 30% de energia, poupando-se no aquecimento e arrefecimento dos espaços interiores (Lisboa E-Nova, 2008).

A reabilitação energética de um edifício é assim uma abordagem inovadora e promissora para a correção de situações de inadequação funcional, proporcionando a melhoria das condições de

conforto térmico e de habitabilidade dos seus ocupantes, permitindo reduzir o consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação. Esta contribui também para o objetivo estratégico de redução das necessidades energéticas de Portugal e cumprimento das metas definidas com a assinatura do Protocolo de Quioto.

O presente trabalho tem como finalidade otimizar, sob o ponto de vista de eficiência energética, a solução de reabilitação de uma fachada que apresente o melhor nível de sustentabilidade. Para a avaliação do nível de sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação da envolvente vertical exterior dos edifícios, isto é do seu nível de desempenho global baseado em indicadores ambientais, sociais e económicos, será utilizada a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC).

Os resultados obtidos neste estudo resultam da aplicação da referida metodologia a um caso de estudo. A aplicação a um caso de estudo, correspondente a um edifício unifamiliar convencional em Portugal, permitiu avaliar a influência da solução de reabilitação nos impactes ambientais incorporados, no consumo de energia e nos custos de operação.

2 METODOLOGIA APLICADA

2.1 *Objetivo*

O objetivo fundamental deste trabalho passa pela seleção de soluções construtivas e processos de construção para as fachadas de edifícios, de modo a que a reabilitação seja o mais compatível possível com os objetivos relativos ao desenvolvimento sustentável.

A selecção da melhor solução de reabilitação para fachadas, segundo o nível de sustentabilidade será conduzida pela metodologia MARS-SC (Mateus e Bragança, 2006). Esta metodologia propõe que a sustentabilidade das soluções construtivas seja avaliada, para cada elemento construtivo, relativamente à solução de referência e considerando os três indicadores de sustentabilidade: ambiental, funcional e económico.

Após a hierarquização, por nível de sustentabilidade, do conjunto de cenários com vista à reabilitação de fachadas, optimizou-se o edifício em estudo, implementando a solução de reabilitação de fachadas com melhor nível sustentabilidade. Para o efeito analisaram-se os seguintes aspetos:

- O comportamento térmico, calculando os consumos energéticos anuais em função do aumento da espessura de material de isolamento térmico da fachada do edifício;
- Os custos associados à implementação das soluções reabilitação, com diferentes espessuras de material de isolamento térmico;
- Os custos associados aos consumos de energia dos cenários de reabilitação de fachadas para as diferentes espessuras de material de isolamento térmico;
- O tempo de retorno de investimento, em anos, das soluções de reabilitação em função da redução dos consumos energéticos para as diferentes espessuras de isolamento térmico dos cenários de reabilitação de fachadas.

De modo a obter a solução optimizada e determinar a solução de reabilitação mais adequada a implementar no edifício existente analisou-se o tempo de retorno do investimento da reabilitação para um caso de estudo.

2.2 *Descrição do edifício em estudo*

Para a realização do estudo definiu-se um edifício virtual equivalente a um edifício unifamiliar, localizado no Concelho de Guimarães. O edifício, de geometria quadrangular, encontra-se orientado a sul (Figura 1).

O edifício em estudo é constituído por um piso, com 64m² de área útil de pavimento e 2,7m de pé-direito livre. As paredes exteriores são constituídas por um pano duplo de alvenaria de tijolo vazado de 0,11m, separados por uma caixa-de-ar de 0,03m, rebocados em ambas as faces. A cobertura é inclinada, com quatro águas e desvão não habitável. A esteira horizontal é composta por uma laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas com 0,25m de espessura e 0,02m de reboco para revestimento inferior. A esteira inclinada é constituída por telhas cerâmicas apoiadas sobre uma estrutura de madeira. Os vão envidraçados são em vidro simples e caixilharia em alumínio, correspondendo a 22% da área de pavimento.

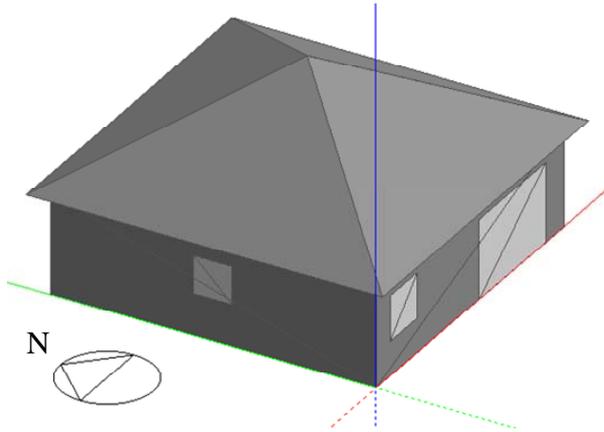


Figura 1. Edifício em estudo

2.3 Metodologia para a avaliação da sustentabilidade

A metodologia implementada neste estudo foi a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC).

Esta metodologia propõe que a sustentabilidade das soluções construtivas seja avaliada relativamente à solução de referência, isto é, a solução construtiva mais aplicada para um determinado local.

A metodologia MARS-SC desenvolve-se em quatro etapas:

- Quantificação dos parâmetros;
- Normalização dos parâmetros;
- Agregação dos parâmetros;
- Determinação do nível de sustentabilidade;

2.3.1. Quantificação dos parâmetros

A fase de quantificação dos parâmetros estabelece o número e tipo de parâmetros a analisar em cada um dos indicadores. A definição dos parâmetros depende dos objetivos da avaliação, das características próprias das soluções construtivas, das exigências funcionais que se pretendam satisfeitas, das características particulares do local e dos dados disponíveis (Mateus e Bragança, 2006)

Nos últimos anos, a ISO e o CEN têm-se destacado no desenvolvimento de ações de normalização no âmbito da avaliação da sustentabilidade dos edifícios. A ISO, através da norma ISO/TC 21929-1 (2006) fornece o enquadramento e as orientações para o desenvolvimento e seleção de indicadores de sustentabilidade adequado para os edifícios. Esta norma aborda a avaliação do desempenho ambiental, social e económico de um edifício.

Na aplicação da MARS-SC às soluções construtivas analisadas neste trabalho são considerados cinco parâmetros ambientais, dois funcionais e um económico (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros a analisar na metodologia MARS-SC

Ambientais	Funcionais	Económicos
- Potencial de Esgotamento das Reservas de Combustíveis Fósseis (FFDP);	- Consumo total de energia (kWh/m ² . ano);	- Custo de reabilitação (€m ²)
- Potencial de Aquecimento Global (GWP);	- Redução sonora aparente e isolamento sonoro normalizado ou padronizado ($D_{2m,nT,W}$)	
- Potencial de Acidificação (AP);		
- Potencial de Eutrofização (EP);		
- Potencial de Oxidação Fotoquímica (POCP).		

Neste trabalho foi utilizada a ferramenta informática SimaPro (PRé-consultants, 2008) e foram empregues os métodos CML Baseline 2000 (CML, 2001) para a avaliação de impactes ambientais e Cumulative Energy Demand (PRé-consultants, 2010) para a avaliação da energia primária incorporada.

No que concerne aos parâmetros funcionais em estudo na avaliação das soluções de reabilitação de fachadas, estes foram analisados através do consumo energético para aquecimento e arrefecimento (kWh/m².ano) e da qualidade acústica das soluções construtivas. Os consumos energéticos anuais foram estimados usando a ferramenta de simulação energética DesignBuilder (DesignBuilder, 2012). A qualidade acústica foi prevista através do cálculo do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{2m,nT,W}$), usando o método do Modelo Misto proposto por Meisser (Meisser, 1973) e cuja adequação às soluções construtivas portuguesas foi estudada por Diogo Mateus e António Tadeu (Mateus et al, 1999).

Relativamente aos parâmetros económicos foi realizado o levantamento dos custos de construção (€/m²) de cada um dos cenários de reabilitação através do gerador de preços da construção incorporado na base de dados do software CYPE 2011.

2.3.2. Normalização dos parâmetros

A normalização dos parâmetros tem como objetivo evitar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros de cada indicador. Na normalização é utilizada a fórmula de Diaz-Balteiro (2004) equação 1.

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}} \quad (1)$$

Em que P_i representa o resultado da quantificação do parâmetro i . P_i^* e P_{*i} correspondem ao melhor e ao pior resultado do parâmetro de sustentabilidade i .

O método de normalização utilizada torna os parâmetros considerados na avaliação da sustentabilidade adimensionais e converte-os numa escala compreendida entre 0, o pior valor, e 1, o melhor valor.

2.3.3. Agregação dos parâmetros

A apresentação do desempenho de uma solução através da listagem dos resultados obtidos ao nível de todos os parâmetros considerados, isto é, ambientais, funcionais e económicos, complica a compreensão do desempenho global da solução. Para solucionar esta questão, são combinados, dentro de cada dimensão, os diversos parâmetros, em função do peso (importância) que é atribuído a cada um no cumprimento dos requisitos de projeto.

As equações (2), (3) e (4) apresentam o modo como se agregam os parâmetros dentro de cada dimensão para se determinar o desempenho ao nível de cada dimensão do desenvolvimento sustentável (Mateus e Bragança, 2006).

$$\bar{I}_A = \sum_{i=1}^n w_{Ai} \cdot \bar{P}_{Ai} \quad (2)$$

$$\bar{I}_F = \sum_{i=1}^n w_{Fi} \cdot \bar{P}_{Fi} \quad (3)$$

$$\bar{I}_E = \sum_{i=1}^n w_{Ei} \cdot \bar{P}_{Ei} \quad (4)$$

O peso de cada parâmetro na avaliação ao nível de cada dimensão, não é consensual, pois varia de metodologia para metodologia de avaliação e reconhecimento da construção sustentável.

2.3.4. Determinação do nível de sustentabilidade

A fase posterior à agregação de cada um dos parâmetros, ao nível de cada dimensão da sustentabilidade, consiste na determinação do desempenho global da solução construtiva. A nota sus-

tentável (NS) é determinada através da equação (5) (Mateus e Bragança, 2006).

$$NS = w_A \cdot I_A + w_F \cdot I_F + w_E \cdot I_E \quad (5)$$

Na equação (5), NS é o resultado da ponderação de cada dimensão I_j com o respetivo peso (W_j), na avaliação da sustentabilidade. A soma dos pesos atribuídos aos três indicadores tem de ser igual a 1, de modo a se obter uma nota sustentável compreendida entre 0 e 1 (Mateus e Bragança, 2006).

Como através da construção sustentável se pretende principalmente uma maior compatibilidade entre os ambientes construído e natural, sem que com isso se comprometa em primeiro lugar a funcionalidade e por fim a viabilidade económica do projeto, considera-se nesta avaliação (Mateus e Bragança, 2006):

- Peso do indicador ambiental: $W_A = 0,3$
- Peso do indicador funcional: $W_F = 0,5$
- Peso do indicador económico: $W_E = 0,2$

Calculados os índices de comparação é possível avaliar, ao nível de cada parâmetro, se a solução construtiva em estudo é melhor ou pior do que a solução construtiva de referência.

2.4 Metodologia para a otimização do isolamento térmico na solução de fachada

A otimização do isolamento térmico na solução de fachada foi conduzida através da simulação energética do edifício em estudo. Através do programa informático Design Builder, simulou-se o consumo de energia total, em kWh/ano, para cada uma das soluções de reabilitação para as diferentes espessuras de material de isolamento térmico a implementar no edifício.

Com os valores dos consumos energéticos em kWh converteram-se os mesmos em custo económico de acordo com as tarifas energéticas em vigor. Apesar do preço do tarifário incluir o preço da potência instalada e ainda o preço de energia que varia com o seu consumo, considerou-se o valor de energia de 0,1365€/kWh (EDP, 2012).

De modo a obter a solução otimizada e determinar a solução ideal de reabilitação a implementar no edifício existente analisou-se o tempo de retorno do investimento da reabilitação.

O custo correspondente ao primeiro ano corresponde à soma do custo de investimento (custo de reabilitação) com o custo de energia anual obtido através da simulação energética, tal como apresentado na equação (6).

$$C_1 = C_{reabilitação} + C_{energia} \quad (6)$$

Para um determinado período de t anos determinou-se a variação dos custos acumulados de investimento e energia através da equação (7).

$$C_t = Custo_{t-1} + (C_{energia} \times (1 + a)^t) \quad (7)$$

Em que t corresponde ao ano para o qual se pretende determinar o custo e a equivale à taxa de variação da energia, com valor de 4%.

3 SOLUÇÕES COM VISTA À REABILITAÇÃO DE FACHADAS

O reforço do isolamento térmico das paredes exteriores admite três grandes opções, caracterizadas pelas diferentes localizações possíveis do isolamento térmico a aplicar:

- Isolamento térmico exterior;
- Isolamento térmico interior;
- Isolamento térmico na caixa-de-ar (limitando-se apenas ao caso de paredes duplas).

Neste trabalho serão analisadas cinco soluções de reabilitação pelo exterior, duas pelo interior e uma por injeção de isolamento na caixa-de-ar, perfazendo um total de oito soluções.

3.1 Soluções de isolamento térmico pelo exterior

Nesta secção apresentam-se cinco soluções construtivas de isolamento térmico pelo exterior.

Solução Fach. 1 – Sistemas de isolamento térmico por revestimento delgado sobre o isolante

Os sistemas de isolamento térmico por revestimento espesso sobre o isolante (Figura 2) são

constituídos por: um isolante, em placas, colado ao suporte; um revestimento de ligantes hidráulicos armados com rede metálica; e por uma camada de um revestimento delgado de massas plásticas ou uma tinta aplicada sobre o paramento exterior.

Nesta solução considerou-se o isolamento térmico em placas de poliestireno expandido extrudido com 0,03m de espessura. Nos revestimentos considerou-se argamassas não-tradicionais, armadas com uma rede de fibra de vidro para camada base e para o revestimento de acabamento argamassas não-tradicionais, com aplicação de tinta com rendimento de 13,00 m²/l/demão aplicada sobre o paramento exterior em argamassa.

Solução Fach. 2 – Sistemas de isolamento térmico por revestimento espesso sobre o isolante

Os sistemas de isolamento térmico por revestimento delgado sobre o isolante (Figura 3) são constituídos por: um isolante em placas colado ao suporte; um revestimento delgado de ligante misto, armado com uma rede flexível, quase sempre em fibra de vidro, formando-se assim a camada base do revestimento; e um revestimento de acabamento, em geral um revestimento delgado de massas plásticas, formando assim a camada de acabamento de revestimento.

Na presente solução considerou-se isolamento térmico em placas de poliestireno expandido extrudido com 0,03m de espessura. No que respeita aos revestimentos ligantes considerou-se argamassas não-tradicionais, armadas com uma rede metálica em aço-galvanizado. A camada de revestimento delgado é um reboco não-tradicional e o acabamento corresponde à aplicação de uma tinta com rendimento de 13,00 m²/l/demão sobre o paramento.

Solução Fach. 3 – Revestimentos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia

As soluções de revestimentos independentes descontínuos (Figura 4), com interposição de um isolante na caixa-de-ar, consistem na colocação de uma camada de isolamento térmico, fixo directamente à parede através de uma estrutura de suporte metálica ou em madeira. Esta estrutura é formada por montantes e travessas, sobre as quais é colocado um revestimento independente exterior, constituído por elementos descontínuos (ADENE, LNEC, INETI e IPQ, 2004).

Nesta solução considerou-se: uma camada de isolamento térmico em placas de poliestireno expandido extrudido com 0,03m de espessura; uma estrutura de suporte em aço-inoxidável com os perfis horizontais de dimensão 0,50x0,125m e verticais com 0,40x0,70m, ambos com espessura de 0,002m; e um revestimento exterior em placas cerâmicas com dimensão de 0,60x0,30 m com espessura de 0,03m.

Solução Fach. 4 – Componentes prefabricados constituídos por um isolante e um paramento, fixados directamente à parede

Os sistemas de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados (Figura 5) são obtidos a partir de elementos previamente produzidos em fábrica, constituídos por um material isolante em placa, revestido exteriormente por uma película de natureza metálica, mineral ou orgânica.

Na presente solução considerou-se a aplicação de um painel pré-fabricado de poliestireno expandido moldado com 0,03m de espessura e de um revestimento liso em chapa de aço-galvanizado, de 0,004m de espessura.

Solução Fach. 5 – Rebocos Isolante

Esta solução trata-se da aplicação de argamassas que incorporam grânulos de pequeno diâmetro de isolante térmico, Figura 6. Estas argamassas em comparação com as convencionais conseguem reduzir a condutibilidade térmica.

3.2 Soluções de isolamento térmico pelo interior

Nesta secção serão apresentadas duas soluções de reabilitação de isolamento térmico pelo interior.

Solução Fach. 6 – Execução de uma contrafachada pelo interior em alvenaria

A execução de uma contra-fachada de alvenaria no lado interior da parede a reabilitar (Figura 7), com colocação de isolante na caixa-de-ar, implica a seguinte sequência de operações: colagem de placas de um isolante térmico, execução de um pano interior de alvenaria de tijolo furado, e aplicação no paramento interior um revestimento tradicional de ligantes hidráulicos e uma pintura com tinta de emulsão aquosa não texturada com base em polímero sintético.

Nesta solução considerou-se a aplicação de placas de isolamento térmico com espessura de

0,03m em poliestireno expandido extrudido; tijolo furado de 11 com dimensão de 0,30x0,20m e espessura de 0,11m; argamassas tradicionais para assentamento e revestimento, e aplicação de tinta com rendimento de 13,00 m²/l/demão sobre o revestimento.

Solução Fach. 7 – Execução de uma contrafachada pelo interior em gesso

A execução de uma contra-fachada de placas de gesso cartonado no lado interior da parede a reabilitar (Figura 8), com colocação de isolante na caixa-de-ar implica as seguintes operações: colagem de placas de um isolante térmico, fixação à parede exterior de uma estrutura de suporte, fixação à estrutura das placas de gesso cartonado.

Para a execução da contra-fachada em gesso considerou-se as placas de isolamento térmico em poliestireno extrudido expandido com 0,03m de espessura; estrutura de suporte em alumínio com o perfis horizontais e verticais de dimensão 0,03x0,08m e espessura de 0,0008m, painéis de gesso cartonado com 0,0125m de espessura e ainda uma camada de reboco tradicional com espessura de 0,015m com aplicação de tinta com rendimento de 13,00 m²/l/demão sobre a mesma.

3.3 Soluções de isolamento térmico em caixa-de-ar

Nesta secção será apresentada uma solução de reabilitação de injecção de isolamento térmico na caixa de ar.

Solução Fach. 8 – Injecção de isolamento na caixa-de-ar de paredes dupla

Esta solução é aplicável exclusivamente a edifícios em que as paredes exteriores sejam construídas por dois panos. O reforço do isolamento térmico por preenchimento da caixa-de-ar é, nestes casos, a solução mais económica e mais simples de executar. Para a sua concretização, basta abrir furos de injecção. Nesta solução considerou-se o preenchimento de uma caixa-de-ar com 0,03m de espessura com a injecção de espuma de ureia-formaldeído.

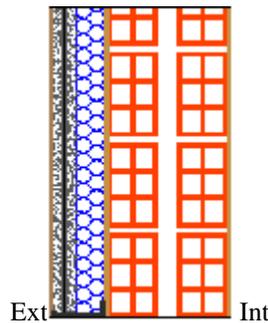


Figura 2. Solução Fach. 1 - Sistemas de isolamento térmico por revestimento delgado sobre o isolante

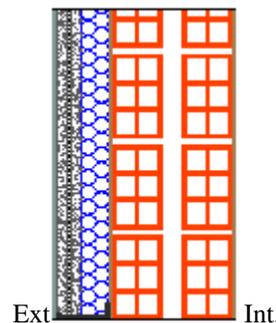


Figura 3. Solução Fach. 2 - Sistemas de isolamento térmico por revestimento espesso sobre o isolante

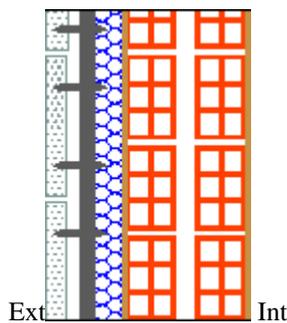


Figura 4. Solução Fach. 3 - Revestimentos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia

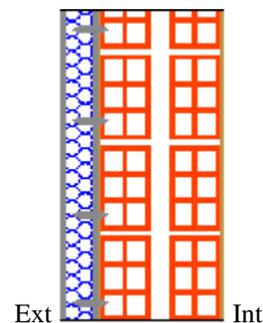


Figura 5. Solução Fach. 4 - Componentes prefabricados constituídos por um isolante e um paramento, fixados diretamente à parede

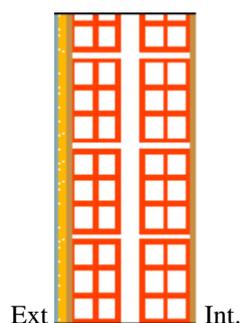


Figura 6. Solução Fach. 5 - Rebocos Isolantes

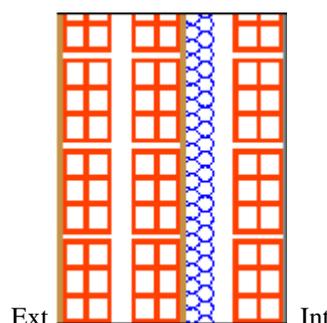


Figura 7. Solução Fac.h 6 - Execução de uma contrafachada pelo interior em alvenaria

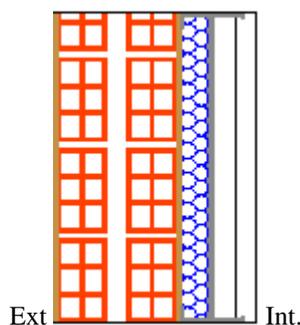


Figura 8. Solução Fach. 7 - Execução de uma contrafachada pelo interior em gesso

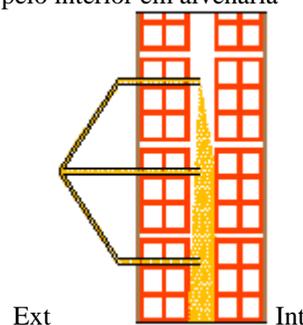


Figura 9. Solução Fach. 8 - Injeção de isolamento na caixa-de-ar de paredes dupla

4 RESULTADOS

4.1 Avaliação da sustentabilidade das soluções de fachada

Tendo em consideração a importância do comportamento térmico, relativamente às restantes exigências funcionais dos elementos da envolvente vertical, as soluções de reabilitação em análise foram definidas de modo a que os seus coeficientes de transmissão térmica fossem, no mínimo o mais semelhante possível.

Como solução de reabilitação de referência adotou-se a solução de sistemas compostos de isolamento térmico pelo exterior, com revestimento delgado aplicado sobre o isolante (Fach. 1). Esta consideração deveu-se ao facto desta ser a solução convencionalmente aplicada na reabilitação da envolvente vertical exterior de edifícios em Portugal.

A espessura do isolante térmico de cada uma das soluções foi definida tendo por base o valor de referência do coeficiente de transmissão térmica ($U=0,45\text{W/m}^2\text{°C}$) para elementos exteriores verticais em zona corrente (zonas opacas) de edifícios situados na zona climática de inverno I2, de acordo com o RCCTE. A espessura de isolamento de todas as soluções foi definida de modo a: respeitar os requisitos do RCCTE para a zona climática considerada; utilizar as espessuras de material isolante disponíveis no mercado; que todas as soluções tivessem um coeficiente global de transmissão térmica (U) semelhante ao da solução referência. Desta forma, todas as soluções apresentam um U de aproximadamente $0,44\text{W/m}^2\text{°C}$.

Os resultados obtidos para cada uma das soluções construtivas no que respeita à agregação dos parâmetros ambientais, funcionais e económicos estão representados na Tabela 2. Estes, foram obtidos através das equações (2), (3) e (4) que apresentam o modo de agregação dos parâmetros dentro de cada um dos indicadores.

A fase posterior à agregação de cada um dos parâmetros, ao nível de cada dimensão da sustentabilidade, consiste na determinação do desempenho global da solução construtiva. A nota sustentável (NS) é determinada através da equação (5).

Na Tabela 3 apresentam-se as soluções de reabilitação hierarquizadas por ordem decrescente de sustentabilidade.

Analisando os resultados obtidos através da aplicação da metodologia para avaliação da sustentabilidade aos oito cenários de reabilitação para fachadas, verificou-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a solução de reabilitação mais sustentável é a solu-

ção Fach.6 enquanto a solução de reabilitação menos sustentável é a solução Fach.5.

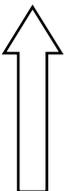
As características que mais contribuem para que a solução Fach.6 (execução de contrafachada em alvenaria pelo interior) seja a mais sustentável são: menor consumo de energia para proporcionar conforto aos seus ocupantes, melhor desempenho a nível acústico, menor custo de construção, assegurando a necessária inércia térmica, quando comparada com a solução referência. Esta solução também apresenta alguns inconvenientes tais como, por exemplo, a redução da área útil dos espaços interiores, a realização de obras no interior do edifício (com os respetivos impactes sobre os ocupantes) e necessidade de refazer parte das instalações.

Tabela 2. Desempenho ambiental (I_A), funcional (I_F) e económico (I_E) de cada um dos cenários de reabilitação

Solução	I_A	I_F	I_E
Fach.1	0,67	0,55	0,66
Fach.2	0,72	0,55	0,64
Fach.3	0,05	1,00	0,00
Fach.4	0,31	0,66	0,69
Fach.5	0,98	0,00	0,94
Fach.6	0,59	0,54	0,88
Fach.7	0,70	0,53	0,63
Fach.8	1,00	0,07	1,00

Tabela 3. Soluções de reabilitação de fachadas, hierarquizadas por ordem decrescente de sustentabilidade

Solução	NS
Fach.6	0,63
Fach.2	0,62
Fach.1	0,61
Fach.7	0,60
Fach.4	0,56
Fach.8	0,54
Fach.3	0,51
Fach.5	0,48

Mais sustentável

 Menos sustentável

4.2 Metodologia para a otimização do isolamento térmico na solução de fachada

Na solução em análise na metodologia de avaliação da sustentabilidade foi considerada a aplicação de placas de poliestireno expandido extrudido com espessura de 0,03m. Esta solução apresenta um consumo energético anual, para aquecimento e arrefecimento, de 85,20kWh/m².ano, o que representa um custo de 744,33€/ano. No que concerne ao custo de investimento este é de 1350,94€

No que se refere à otimização do isolamento térmico, na avaliação do desempenho energético do edifício foi avaliado o efeito do aumento da espessura de isolante térmico para 0,05m, 0,10m, 0,15m e 0,20m.

Na Tabela 3 são apresentados os consumos energéticos, os custos energéticos associados aos consumos de energia e os custos associados à implementação da solução construtiva otimizada.

Tabela 4. Consumos energéticos e custos associados para as diferentes espessuras de isolamento térmico

Solução	Consumo energético	Custo de energia	Custo de reabilitação
Solução existente	111,55	974,47	0,00 €
Fach.6 com 0,03m de isolamento	85,20	744,33	1.350,94€
Fach.6 com 0,05m de isolamento	84,14	735,05	1.489,27 €
Fach.6 com 0,10m de isolamento	82,51	720,81	1.832,23 €
Fach.6 com 0,15m de isolamento	81,61	712,94	2.175,91 €
Fach.6 com 0,20m de isolamento	81,03	707,87	2.519,59 €

Analisando os resultados apresentados na Tabela 3 é possível verificar que qualquer que seja a espessura de isolamento a implementar é possível obter reduções significativas no consumo

energético e nos custos associados, quando comparado com a solução base.

Através da equação (6) determinou-se o valor de energia para o primeiro ano. Para os restantes oito anos o custo da energia foi obtido através da equação (7).

Com os resultados obtidos através das equações referidas anteriormente e definindo um período de retorno de investimento de 8 anos analisou-se graficamente o ano em que os custos acumulados da solução existente se igualam aos das soluções com diferentes espessuras de isolamento térmico. Essa análise encontra-se apresentada na Figura 10.

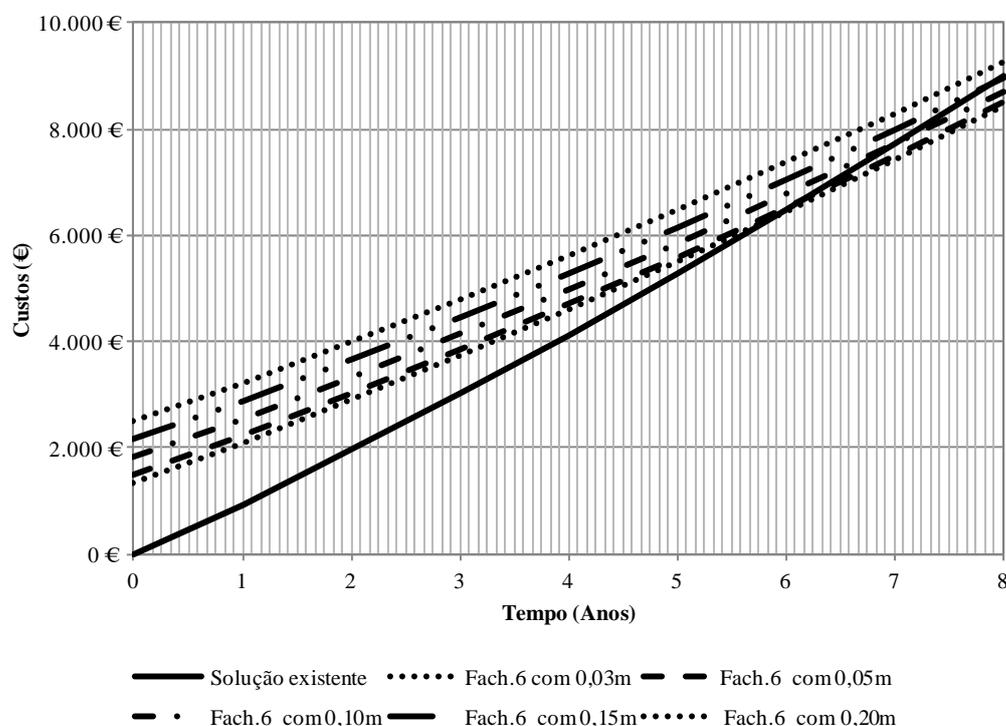


Figura 10. Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas

Pela análise da Figura 10, verifica-se que o tempo de retorno do investimento correspondente às soluções de reabilitação com espessuras de 0,03m, 0,05m, 0,10m e 0,15m é inferior a 8 anos.

A solução de reabilitação otimizada consiste na execução de um pano de alvenaria pelo interior, incorporando um material de isolamento térmico em poliestireno expandido extrudido, pois na aplicação da metodologia de avaliação da sustentabilidade aos oito cenários de reabilitação para fachadas, verificou-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, esta era solução de reabilitação mais sustentável.

Esta solução tem a desvantagem de reduzir a área útil dos compartimentos, isto é, quanto maior for a espessura de isolamento térmico menor será a área útil do compartimento. Desta forma, determinou-se que a solução com 0,10m de isolamento em poliestireno extrudido expandido é a solução a implementar na reabilitação, com um consumo energético de $82,51\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, que em termos de custos corresponde a $720,81\text{€}/\text{ano}$. Esta solução apresenta um custo de investimento em reabilitação de $1.832,23\text{€}$

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A reabilitação energética de um edifício existente é uma abordagem importante, que tem por objetivo melhorar a qualidade térmica da envolvente, as condições de conforto térmico dos ocupantes e racionalizar os consumos de energia.

A eficiência energética de edifícios envolve a redução do consumo de energia ao mesmo tempo que se mantém ou melhoram os níveis de conforto, qualidade do ar, entre outros requisitos dos edifícios.

As medidas de reabilitação energética a implementar num edifício podem ser de quatro géneros: reforço da proteção térmica conferida pela envolvente dos edifícios; controlo das infiltrações de ar; recurso a tecnologias solares passivas e ativas e melhoria da eficiência energética dos sistemas e equipamentos energéticos.

Numa primeira fase deste estudo pretendeu-se hierarquizar os cenários de reabilitação de fachadas de acordo com seu nível de sustentabilidade. Esta análise foi conduzida através da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas – MARS-SC.

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC aos oito cenários de reabilitação de fachadas, verificou-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a solução de reabilitação mais sustentável corresponde à execução de uma contrafachada de alvenaria (Fach.6), enquanto a solução de reabilitação menos sustentável é a solução de rebocos isolantes (Fach.5).

No procedimento da otimização do isolamento térmico nas soluções de fachadas, a solução em análise foi a execução de uma contrafachada de alvenaria - Fach.6 (solução que obteve o melhor nível de sustentabilidade dentro das soluções de reabilitação de fachadas). Nesta solução, Fach.6, considerou-se a aplicação de placas de isolamento térmico com espessura de 0,03m em poliestireno expandido extrudido. Esta solução apresentou um consumo energético de aquecimento e arrefecimento para o período de um ano de 85,20kWh/m².ano, o qual economicamente representa um custo de 744,33€/ano e um custo de investimento em reabilitação de este representa um valor de 1350,94€

No que se refere à otimização do isolamento térmico na solução de fachada, considerou-se o aumento da espessura de isolante térmico para as espessuras de 0,05m, 0,10m, 0,15m e 0,20m.

Para o aumento de 0,05m de espessura de isolamento térmico na solução de fachada obteve-se através da simulação energética um consumo de 84,14kWh/m².ano que em termos de custos corresponde a 735,05 €/ano. Esta solução apresenta um custo de investimento em reabilitação de 1.489,27€

No que concerne ao aumento de espessura de poliestireno extrudido expandido na solução de fachada para 0,10m, obteve-se um consumo energético de 82,51kWh/m².ano, que em termos de custos corresponde a 720,81€/ano. Esta solução apresenta um custo de investimento em reabilitação de 1.832,23€

Relativamente ao aumento da espessura de isolamento térmico na fachada para 0,15m, apurou-se através da simulação um consumo energético de 81,61kWh/m².ano, correspondendo a um custo económico de 712,94€/ano. Esta solução apresenta um investimento em reabilitação no valor de 2.175,91€

Aumentando para 0,20m de espessura de poliestireno extrudido expandido na solução de fachada, obteve-se um consumo energético no valor de 81,03kWh/m².ano o qual corresponde a um custo de 707,87€/ano. Esta solução apresenta um investimento em reabilitação no valor de 2.519,59€

Com os resultados obtidos verificou-se que qualquer que seja a espessura de isolamento a implementar na reabilitação é possível obter reduções significativas de consumo energético e custos associados, quando comparado com a solução existente no edifício em estudo.

De modo a obter a espessura otimizada de poliestireno expandido extrudido e determinar a solução ideal de reabilitação a implementar na fachada do edifício existente, estudou-se o período de tempo de retorno para o investimento da reabilitação, tendo em atenção os custos de investimento de reabilitação, os custos para climatização e AQS do edifício existente e das várias espessuras de isolamento térmico.

Definiu-se um período de retorno de investimento de 8 anos e analisou-se o ano em que os custos acumulados da solução existente se igualavam às soluções com diferentes espessuras de isolamento térmico. Concluiu-se que os custos acumulados da solução existente igualavam os custos acumulados das soluções com espessura de isolante térmico de 0,03, 0,05m, 0,10m e 0,15m num período inferior a 8 anos.

Com os resultados alcançados na otimização do isolamento térmico na solução de fachada, determinou-se que a solução que incorporava um isolamento térmico em poliestireno expandido extrudido com 0,10m de espessura seria a solução a implementar na reabilitação da fachada do edifício.

Este estudo mostra a importância da análise do tempo de retorno do investimento na reabilitação, de forma a mostrar aos clientes a relevância de não se focarem apenas no custo inicial das

intervenções de reabilitação, pois é possível aumentar o conforto dos utilizadores e reduzir significativamente os custos de utilização em períodos de retorno curtos (até 8 - 10 anos).

Espera-se, que este estudo contribua de forma positiva e significativa nas tomadas de decisão dos projetistas que tenham como objetivo proporcionar melhorias nas condições de conforto dos seus utilizadores, a um patamar mínimo de custos e de impactes ambientais.

REFERÊNCIAS

- ADENE, LNEC, INETI & IPQ (2004). Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais. Informação disponível online em [<http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/0000008f/dlsmbi-zoqgvncjxjfdkgikimrulbfcqg/Reabilitaçãoenergética.pdf>], acessado em 17 de junho de 2010.
- CML (2001). CML 2 Baseline Method (2000). Centre for Environmental Studies (CML), University of Leiden, 2001. Informação online disponível em [<http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/lca2/index.html>] acessado em 15 de Fevereiro de 2012.
- CYPE (2011). CYPECAD (Versão After Hours). Software para engenharia e Construção versão 2011. Portugal.
- DesignBuilder (2012). DesignBuilder. Building design, simulation and visualisation software version 3.0.0.105. DesignBuilder Software Ltd. London, United Kingdom.
- Diaz-Balteiro, L. & Romero C. (2004). In a Search of a Natural Systems Sustainability Index. *Ecological Economics* 49. P. 401-405.
- EDP (2012). Tarifa edp casa. Informação disponível online em [<http://www.edp.pt/pt/particulares/edp/edpcasa/Pages/Tarifario.aspx>], acessado em 13 de Maio de 2012.
- ISO/TC 21929-1 (2006). Sustainability in building construction – Sustainability indicators - part1: Framework for the Development of indicators for buildings. Geneva. International Organization for Standardization.
- Lisboa E-Nova (2005). Matriz Energética do Concelho de Lisboa. Lisboa: Lisboa E-Nova. Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa.
- Mateus, Diogo Manuel Rosa; Tadeu, António José Barreto (1999). Comportamento Acústico de Edifícios. Laboratório de Construções, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Mateus, Ricardo; Bragança, Luis (2006). Tecnologias Construtivas com Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção. Edições Ecopy: Porto. ISBN 978-989-95194-1-1.
- Meisser, Mathias (1973). Acustica de los Edifícios. Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 1973 (Tradução do título original “La Pratique de L’Acoustique dans les Batiments”, S.D.T.B.T.P., Paris.
- Pimentel, D. (1973). Food Production and the Energy Crisis. *Science*, 182(4111), pp.443-449.
- RCCTE (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE). Decreto-Lei 80/2006.
- PRé-consultants (2010). SimaPro 7. LCA software version 7.2. Amersfoort, The Netherlands: Product Ecology Consultants.
- PRé-consultants (2008). SimaPro Database Manual – Methods Library. Amersfoort, The Netherlands: Product Ecology Consultants.