

## Comparação económica e ambiental entre a reabilitação do Palácio Condes de Murça e uma construção nova equivalente

J. Ferreira<sup>a</sup>, M.D. Pinheiro<sup>a</sup>, J. Brito<sup>a†</sup>

<sup>a</sup> *Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura e Georrecursos, Secção de Construção, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal*

<sup>†</sup> *Autor para correspondência: [jb@civil.ist.utl.pt](mailto:jb@civil.ist.utl.pt)*

### RESUMO

Na maioria dos países desenvolvidos, dos quais fazem parte os países da União Europeia, verifica-se a existência de um excedente de edifícios, cuja maioria necessita de obras urgentes de reabilitação e reforço. No que diz respeito ao reforço sísmico, tais exigências são ainda mais prioritárias em países que se localizam em zonas de sismicidade elevada, como é o caso de Portugal. No entanto, a solução para este problema pode não passar obrigatoriamente por uma reabilitação. Uma demolição seguida de uma reconstrução também respeita tais exigências e também contribui para uma renovação do parque construído. Assim, através da teoria do ciclo de vida, este trabalho procura perceber se a reabilitação é mais sustentável ambiental e economicamente do que uma construção nova equivalente, edificada sob as mesmas condicionantes. Numa primeira abordagem, recorre-se a uma comparação teórica de vários estudos de avaliação do ciclo de vida realizados internacionalmente para edifícios reabilitados e para edifícios novos. Posteriormente, procede-se a uma avaliação do ciclo de vida de uma reabilitação real de um antigo palácio de Lisboa, que é comparada com uma demolição hipotética seguida de uma reconstrução integral em betão armado, obra que se realizaria no mesmo local sob as mesmas condicionantes. Como conclusões, verifica-se que ambientalmente a reabilitação aparenta ser mais benéfica do que a construção nova equivalente, embora no caso avaliado os ganhos não sejam tão positivos quanto seria expectável, devido à utilização massiva da estrutura metálica e do betão projectado na obra de reabilitação. Por fim, a avaliação económica permitiu concluir que a reabilitação é mais cara do que a construção nova equivalente, o que reforça a necessidade de desenvolvimento de soluções mais viáveis economicamente, mecanismos financeiros e de um estudo económico e ambiental integrado, durante uma acção de tomada de decisão.

### Cronologia do artigo:

Recebido a 29 dezembro 2016  
Corrigido a 14 fevereiro 2020  
Aceite a 09 abril 2020  
Publicado a 08 maio 2020

### Palavras-chave:

Avaliação do ciclo de vida  
Custos do ciclo de vida  
Estrutura  
Reabilitação  
Sustentabilidade

## 1. Introdução

O século XX caracterizou-se por um aumento exponencial da população mundial, que passou de menos de dois mil milhões em 1900, para mais de sete mil milhões em 2011, sendo expectável que continue em crescimento durante as próximas décadas (US Census Bureau, 2004) (Goodking, 2011).

Assim, de modo a conjugar as necessidades crescentes de uma população cada vez maior, foi inevitável aumentar a produção industrial e económica, bem como os níveis de consumo, elevando-se o nível de pressão ambiental a uma escala sem precedentes (Faucheux *et al.*, 1998). Como consequência, a pegada ecológica actual encontra-se estimada em 1,5 planetas, principalmente devido aos consumos e às também crescentes emissões atmosféricas (Ewing *et al.*, 2010).

É, portanto, neste paradigma de elevadas pressões ambientais que se enquadra a indústria da construção, co-responsável por tais consequências. Com efeito, os edifícios representam 40% do consumo final de energia da União Europeia e 29% em Portugal (Eurostat, 2012a), por 33% da totalidade dos resíduos da União e 22% em Portugal (Eurostat, 2012b), entre outros possíveis exemplos, como o elevado desperdício de recursos hídricos em Portugal, que se estima poder ser de 66% (Afonso e Rodrigues, 2010).

Deste modo, é dever da Engenharia e da Arquitectura projectar edifícios com impactes ambientais cada vez menores, considerando, desde o início, os princípios da construção sustentável. É por isso que

se torna imprescindível contabilizar com rigor o balanço entre os impactes e o nível de desempenho prestado, tendo em consideração uma quantificação baseada nas diferentes fases do ciclo de vida de cada edifício (Langdon, 2007), para que se procurem as soluções mais eficientes e mais ecológicas.

Por outro lado, o sector imobiliário também se insere num quadro de profunda recessão, com um decréscimo de 15,4% dos fogos concluídos em 2011 face ao ano anterior. Como tal, se se atentar que os Censos 2011 concluíram que há 1,44 fogos / família e que ao longo da última década a reabilitação tem registado um crescimento médio anual de 5% da quota de mercado, atingindo 25% em 2011, pode antever-se um aumento substancial da reabilitação do património (desde que existam disponibilidades financeiras), com uma importância relativa cada vez menor da construção nova (INE, 2012a; 2012b).

Face ao exposto, pode depreender-se que um dos desafios deste século passa por aliar a reabilitação à eco-eficiência e aos princípios da construção sustentável, imperativos para a reduzir os impactes ambientais debatidos anteriormente, contribuindo ainda para a dinâmica económica e social.

De facto, reabilitar aparenta ser, desde logo, um acto sustentável, não só socialmente, mas também pelas poupanças ambientais alcançadas, podendo-se edificar construções tão confortáveis como as novas, com poupanças energéticas e de CO<sub>2</sub> que podem ascender a 70% (Ireland, 2008).

Devido a estas razões, este trabalho tem como hipótese de estudo que a reabilitação, por diminuir a quantidade de materiais a introduzir, é caracterizada por menores impactes ambientais do que uma construção nova equivalente, edificada no mesmo local e sob as mesmas condicionantes.

Para o demonstrar, utiliza-se duas abordagens distintas:

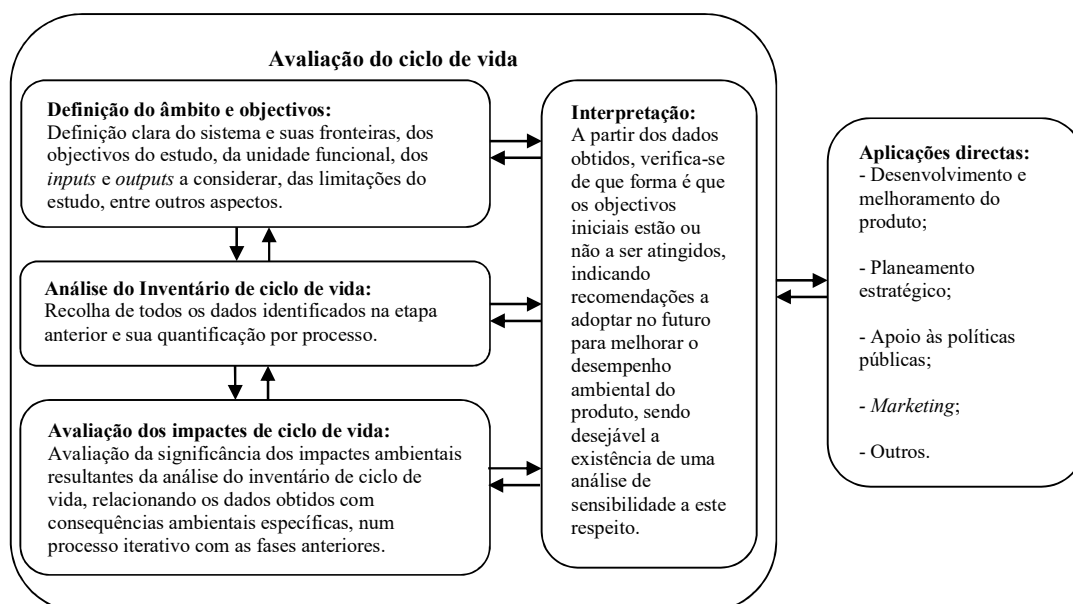
- uma teórica, baseada na revisão bibliográfica de estudos sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de edifícios, comparando os resultados de edifícios novos e reabilitados;
- uma mais prática, de aplicação da metodologia de ACV a um caso de estudo de uma reabilitação concreta, actualmente em fase de construção, que permite uma comparação expedita entre a solução adoptada e uma solução nova equivalente em betão armado; neste caso, analisam-se ainda as implicações económicas das soluções adoptadas.

Após estas duas análises complementares, termina-se este trabalho com a discussão de resultados e as conclusões que discutem a validade desta hipótese aqui introduzida.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. A metodologia de avaliação do ciclo de vida

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia definida na Norma ISO 14040 (resumida na Figura 1) que contabiliza rigorosamente todos os aspectos e impactes ambientais associados a um dado produto, em todas as fases da sua de vida útil, incluindo a exploração das matérias-primas, seu processamento, fabrico do produto, sua operação e seu fim de vida (ISO, 1997; Finnveden *et al.*, 2009).



**Figura 1** - Quatro fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ISO, 1997) (ISO,2006) (Goedkoop *et al.*, 2010).

## 2.2. Revisão bibliográfica (uma abordagem teórica)

Uma ACV é bastante completa e detalhada, promovendo uma quantificação fina da totalidade dos impactos ambientais existentes num dado projecto, razão pela qual tem sido largamente utilizada em trabalhos científicos, nos quais se tem verificado uma evolução desde os produtos / soluções construtivas avaliadas isoladamente, até a edifícios como um todo (Ortiz *et al.*, 2009).

Assim, no primeiro grupo, pode-se identificar exemplos de quase todos os tipos de materiais de construção, tais como:

- materiais estruturais, comparando soluções em betão armado com a construção metálica (Eaton e Amato, 1998), soluções estruturais em madeira (Petersen e Solberg, 2005), entre várias soluções estruturais (Kellenberger e Althaus, 2009) ou vários tipos de pavimentos (Reza *et al.*, 2011);
- materiais de cobertura tradicionais (Abeysondra *et al.*, 2007), incluindo até soluções de coberturas ajardinadas (Kosareo e Ries, 2007);
- sistemas de paredes não estruturais (Ottelé *et al.*, 2011) (Ortiz *et al.*, 2010);
- revestimentos, como a comparação entre revestimentos cerâmicos e de pedra natural (Nicoletti *et al.*, 2002) ou estudos que englobam materiais reciclados (Rivela *et al.*, 2006);
- soluções de argamassas com menores impactos ambientais (Huntzinger e Eatmon, 2009) (Moraes *et al.*, 2020);
- isolamentos térmicos, recorrendo a materiais naturais como o cânhamo (Ardente *et al.*, 2008), comparando isolamentos mais tradicionais, como a lã de rocha e o poliestireno extrudido (Papadoulos e Giama, 2007), ou comparando estes isolamentos tradicionais com outros mais recentes que englobam materiais naturais e/ou reciclados (Dylewski e Adamczyk, 2011);
- vãos envidraçados, avaliando, por exemplo, os benefícios dos vãos de madeira (Tarantini *et al.*, 2009), a influência de vidros electrocrómicos na redução das necessidades energéticas das habitações (Syrrakou *et al.*, 2006), ou identificando a área de envidraçados óptima em dados climas, como o de Xangai (Su e Zhang, 2010);
- equipamentos, como a comparação entre diferentes sistemas de produção de energia (Pehnt, 2006), sistemas de produção de águas quentes sanitárias (Battisti e Corrado, 2005), de mini-élicas (Zhong *et al.*, 2011), entre muitos outros sistemas.

Esta sistematização sumária de trabalhos científicos que utilizaram a avaliação do ciclo de vida para verificar os reais impactos ambientais de diferentes soluções e materiais permitiu perceber quão abrangente é o domínio da ACV e quão disseminado se encontra no meio científico.

Por conseguinte, é expectável a sua subsequente utilização futura no apoio à decisão e em instrumentos de avaliação de projectos públicos e privados, como uma ferramenta eficaz para a procura por espaços construídos mais sustentáveis.

Mas, como abordado, para além destes estudos sobre soluções construtivas, existe também um vasto leque de trabalhos de ACV que avaliam o edifício como um todo, possibilitando uma quantificação rigorosa dos impactos ambientais do produto final edificado.

Uma amostra de 88 edifícios diferentes encontra-se resumida na Tabela 1, que foi baseada nos trabalhos de revisão bibliográfica de Sharma *et al.* (2011), de Sartori e Hestnes (2007), Ramesh *et al.* (2010) e de Ortiz *et al.* (2009), tendo havido o cuidado de não repetir os edifícios que são referenciados em mais do que um trabalho.

Da avaliação desta amostra, pode concluir-se que a ACV é uma metodologia utilizada em todo o globo, tendo havido uma principal preocupação na procura de soluções energeticamente mais eficientes e na quantificação rigorosa dos impactos ambientais de determinados edifícios construídos dentro do prisma da construção sustentável, demonstrando o seu bom desempenho ambiental. Verificou-se, também uma maior incidência nos edifícios residenciais, sendo que nos de serviços foram abordadas tipologias muito distintas tais como escolas, universidades, edifícios comerciais e edifícios de escritórios, entre outros.

Como conclusões gerais, verifica-se que a fase de operação é a mais condicionante, podendo representar entre 80 e 85% dos impactos ambientais do ciclo de vida, nas situações mais correntes. Porém, quando se procuram edifícios de muito baixo consumo, recorrendo a uma construção mais eficiente, o peso dos impactos incorporados nos materiais de construção sofre um acréscimo, sendo que na energia incorporada se pode passar do intervalo de 2 a 38% para 9 a 46%. Mesmo assim, a fase de operação continua a ser a mais condicionante.

Procurando quantificar os impactos ambientais, esta pesquisa bibliográfica permitiu concluir que,

no caso da construção nova, pode ter-se:

- energia de ciclo de vida (50 anos) - 719,4 a 27500 kWh/m<sup>2</sup>;
- emissões de gases de efeito de estufa, CO<sub>2</sub> equivalente (50 anos) - 1,3 a 5,4 ton/m<sup>2</sup>;
- emissões acidificantes, SO<sub>2</sub> equivalente (50 anos) - 7,9 a 9,6 kg/m<sup>2</sup>.

**Tabela 1** - Edifícios avaliados.

Trabalho de revisão	Identificação do edifício/empreendimento no estudo	País	Tipo de edifício <sup>1</sup>	N.º de edifícios
Sharma <i>et al.</i> (2011)	Malmo	Suécia	R	1
	Helsingborg	Suécia	R	1
	Vaxjo	Suécia	R	1
	Stockholm	Suécia	R	1
	Low-density building	Canadá	R	1
	High-density building	Canadá	R	1
	Steel Framed	EUA	R	1
	Concrete Framed	EUA	R	1
	Via Garrone Building	Itália	R	1
	High-end	Finlândia	S	1
	Sam Wyly Hall University	EUA	S	1
	Office Building	Tailândia	S	1
	School building	Argentina	S	1
Sartori e Hestnes (2007)	Adalberth 2	Suécia	R	2
	Adalberth 3	Suécia	R	3
	Cole e Kernan	Suécia	R	8
	Fray <i>et al.</i>	Austrália	S	2
	Feist	Alemanha	R	6
	Hallquist	Noruega	R	1
	Hannon <i>et al.</i>	EUA	R	2
	Mithraratne e Vale	Nova Zelândia	R	3
	Suzuki e Oka	Japão	S	10
	Thormark	Suécia	R	1
	Treloar <i>et al.</i>	Austrália	R	1
	Winther e Hestnes	Noruega	R	5
	Winther	Noruega	R	1
	Zimmermann <i>et al.</i>	Suíça	S	4
Ramesh <i>et al.</i> (2010)	Asif <i>et al.</i>	Escócia	R	1
	Buchanan e Honey	Nova Zelândia	S	1
	Citherlet e Defaux	Suíça	R	3
	Junnla <i>et al.</i>	EUA e UE	S	2
	Kofoworola e Gheewala	Tailândia	S	1
	Medgar e VanGeem	EUA	S	1
	Oka <i>et al.</i>	Japão	S	1
	Peuportier	França	R	1
	Venkatarama Reddy e Jagadish	Índia	R	1
	Sartori e Hestnes	Alemanha	R	6
	Shukla <i>et al.</i>	Índia	R	1
	Utama e Gheewala	Indonésia	R	2
	Xing <i>et al.</i>	China	S	2
	Xing <i>et al.</i>	China	S	2
Ortiz <i>et al.</i> (200)	Jian <i>et al.</i>	Japão	R+S	1
	Koroneos e Kottas	Grécia	R	1
<b>Total</b>			<b>59 R</b> <b>29 S</b>	<b>88</b>

<sup>1</sup> - R - Residencial; S - Serviços (inclui edifícios comerciais)

Nesta amostra bastante representativa de diversas tipologias construtivas em diferentes climas e em diferentes locais do globo, são poucos os trabalhos que comparam uma reabilitação com uma solução nova equivalente, edificada sob as mesmas condicionantes e permitem perceber quais os reais benefícios da reabilitação.

O trabalho com um objectivo mais parecido a este é o de Ireland (2008) que compara edifícios novos e reabilitados com soluções construtivas idênticas, em termos energéticos e de CO<sub>2</sub>, verificando que os

reabilitados podem ser tão eficientes como os novos e com menores impactes. Contudo, nem é uma ACV formal, nem compara duas soluções equivalentes.

Um outro exemplo de um estudo semelhante é o trabalho de Frey *et al.* (2011), que utiliza a abordagem ACV para comparar o impacto ambiental relativo da reutilização de edifícios antigos com a uma reconstrução integral, para períodos de vida útil de 75 anos. No entanto, à semelhança do trabalho anterior, as construções novas e as reabilitações não dizem respeito ao mesmo edifício, embora tenha havido o cuidado de normalizar as diferenças entre eles. Ainda assim, pôde concluir-se que a reabilitação gera poupanças entre 4 a 46% na maioria dos casos, com excepção da reconversão de armazéns em edifícios de escritórios, para a qual os impactes ambientais sofrem um acréscimo de 1 a 6%.

Mais comuns têm sido as avaliações do ciclo de vida da reabilitação que se focam essencialmente na quantificação dos ganhos ambientais da intervenção face à situação inicial. Nestes casos, verifica-se que são sempre positivos, quer para os sistemas (numa amostra de 139 edifícios, as poupanças totais foram de entre 21 e 43%) (Techato *et al.*, 2009), quer para vários edifícios europeus alvo de reabilitações energéticas (Ardente *et al.*, 2011), ou mesmo na reabilitação de uma moradia no clima frio do Canadá (Bin e Parker, 2012).

A partir destes estudos, e comparando-os com os resultados do conjunto dos edifícios focados na Tabela 1, pode-se verificar que o acréscimo de impactes de ciclo de vida médio para a reabilitação pode variar:

- de +0,3 a +1,77 kWh/m<sup>2</sup>, para a energia incorporada (enquanto que numa construção de raiz o impacto de ciclo de vida se situa entre 719,4 e 27500 kWh/m<sup>2</sup>);
- até +0,05 ton/m<sup>2</sup> de CO<sub>2</sub> equivalente (face a 1,3 a 5,4 ton/m<sup>2</sup> da construção nova);
- de +0,01 a +0,35 de SO<sub>2</sub> kg/m<sup>2</sup> (face a 7,9 a 9,6 kg/m<sup>2</sup> da construção nova);
- até +2,17x10<sup>-5</sup> kg/m<sup>2</sup> de CFC<sub>11</sub>;
- até +0,05 kg/m<sup>2</sup> de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

Contudo, esta comparação foi realizada em termos de acréscimos face à situação inicial e deve ser encarada com muito cuidado. De facto, para além de não comparar situações equivalentes, os diferentes edifícios localizam-se em regiões distintas, com necessidades distintas e utilizações muito diferentes.

Assim, embora a reabilitação aparente ser mais sustentável ambientalmente do que a construção nova, existindo estudos que referem ganhos ambientais que chegam a atingir 46% (Frey *et al.*, 2011), tais comparações deveriam ser efectuadas dentro das mesmas condicionantes, para avaliar os ganhos ambientais efectivos da reabilitação.

É, portanto, esse tipo de estudo que será alvo de debate nos capítulos seguintes, através da comparação da reabilitação do Palácio Condes de Murça, com uma estrutura em betão armado equivalente, que seria edificada no mesmo local, permitindo aferir, neste caso, o valor lógico da hipótese enunciada.

### 3. Palácio Condes de Murça

#### 3.1. Breve descrição do empreendimento

O edifício em análise neste trabalho é o Palácio Condes de Murça, localizado em Lisboa, na freguesia de Santos-o-Velho, inserindo-se numa zona de especial protecção em termos do valor dos imóveis. Por esse motivo, a opção pela reabilitação foi desde logo imperativa, permitindo conservar e reaproveitar um antigo palácio devoluto, cujas primeiras referências históricas remontam ao séc. XVII.

Tendo desempenhado diversas funções, desde convento, a quartel militar, passando por hospital, por uma oficina, tendo sido até sede de um estabelecimento de ensino, a actual reabilitação do Palácio pretende reconvertê-lo num edifício misto de habitação e comércio (na frente de rua), inserido num empreendimento maior, que contempla um jardim interior, no logradouro, e um novo edifício.

Com uma área de implantação de 1317 m<sup>2</sup>, trata-se de um palácio com três pisos acima do solo e com uma cave, ocupando parcialmente a área de implantação (área da cave igual a 402,6 m<sup>2</sup>) e cuja fotomontagem pode ser visualizada na Figura 2.

Assim, estão previstos para o Palácio 5 apartamentos, de tipologias T4 e T5 (incluindo duplex) e cinco lojas comerciais, entre as quais um banco.

Por fim, em termos patrimoniais, para além da sua vasta história, o Relatório de Levantamento Histórico (Ferreira e Correia, 2007) destaca a recuperação de uma antiga capela desactivada a integrar num apartamento e a reabilitação do claustro Serliano (Figura 3), que é pouco comum na construção barroca em Portugal e ainda menos em construções de âmbito residencial.



**Figura 2** - Fotomontagem do Palácio (Website comercial do empreendimento).



**Figura 3** - Claustro Serliano (Website comercial do empreendimento).

### 3.2. Os trabalhos de reabilitação

Com o encerramento da Escola Fonseca Benavides na década de 1980, o Palácio começou a degradar-se, alojando-se na sua frente de rua alguns estabelecimentos comerciais, que ainda se mantêm em funcionamento.

Este factor, aliado à vida muito longa do edifício, caracterizada por alterações sucessivas de utilização, muito possivelmente acompanhadas por modificações do foro arquitectónico e estrutural, tiveram como principal consequência um elevado grau de deterioração.

A sua resistência estrutural era conseguida através de paredes muito espessas de alvenaria nas fachadas, contraventadas por outras perpendiculares também de elevada espessura (Figura 4). Em alguns locais, existiam algumas paredes com gaiola pombalina, embora não fosse uma solução presente na maioria do Palácio. Para além disso, encontravam-se recorrentemente muito degradadas (Figura 5).

O contraventamento de todas as paredes era efectuado pelos pavimentos em vigamentos de madeira e tábuas de solho, sobre os quais assentavam as paredes divisórias interiores em tabique, revestido a estuque, através do auxílio de ripados de madeira.

Após uma análise extensa e de um conjunto vasto de sondagens, verificou-se que a grande maioria das paredes de tabique apresentava problemas de ligação com as demais paredes verticais, existindo também diversos problemas associados a ataques biológicos, essencialmente na ligação aos pavimentos de madeira.

O telhado era composto por uma estrutura em vigamentos e ripados de madeira, que servia de apoio a telhas lusas, num estado de degradação muito elevado, e que tinha permitido a entrada de água no interior do edifício, contribuindo para a degradação dos elementos em madeira.

Por fim, a campanha de sondagens levada a cabo permitiu concluir que não existia qualquer alargamento da base das paredes-mestras ou qualquer tipo de sapata.

Por conseguinte, tendo-se verificado que a construção não verificava os regulamentos actualmente em vigor, em especial no tocante à acção sísmica, e tendo em conta o actual estado de degradação dos elementos interiores em madeira e da sua cobertura, a reabilitação estrutural do Palácio apenas permitiu o reaproveitamento das paredes-mestras (da fachada e a ela perpendiculares), bem como a manutenção do pátio Serliano. O estado das paredes e as futuras cargas previstas levam a considerar a necessidade de soluções de reforço mais intrusivas.

Uma vez que as paredes de fachada se encontravam contraventadas interiormente por outras perpendiculares, a contenção provisória foi conseguida unicamente com a aplicação de tirantes passivos em aço roscado A400 ( $\Phi 20$ ), fixados às paredes através de uma chapa de aço S275 JR de 150x150x12 cm, evitando-se a realização de uma estrutura exterior de contenção periférica (elemento A da Figura 6).

Posteriormente, as paredes estruturais foram reforçadas com 8 cm de betão projectado por via húmida

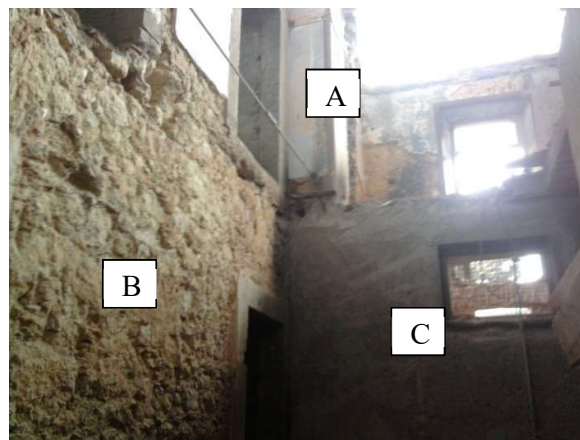
do tipo C30/37 XC3 (Pt) C1 0,40 D6,3 S3, nas quais foi introduzida uma malha metálica quadrada do tipo *nervurex*  $\Phi 8//0,15$  em aço A500 EL (Figura 6). A ligação desta malha à parede ainda foi reforçada com ferrolhos  $\Phi 8$  numa malha quadrada, espaçados de 60 cm, em A500 NR SD. As suas fundações foram também alargadas, recorrendo a betão armado betonado *in situ* e contra o terreno.



**Figura 4** - Corte de um pavimento e pormenor de uma parede interior de contraventamento da fachada.



**Figura 5** - Parede com gaiola pombalina.



**Figura 6** - Soluções construtivas do Palácio (A - tirante passivo, B - parede picada para receber betão projectado, C - parede já com betão projectado).

Os elementos verticais ficaram completos com a incorporação de um novo corpo em betão armado na zona do núcleo de elevadores e de escadas, e de alguns perfis metálicos em zonas mais solicitadas, nomeadamente para reforço do claustro a partir do piso 1 e para receber os elementos da cobertura a partir do piso 2, ambos em perfis HEB 200 e em aço S355 J0.

Nas lajes, foi adoptada uma solução mais leve, de modo a não sobrecarregar a antiga estrutura, utilizando chapas metálicas colaborantes do tipo *haircol* 59s, com 0,88 mm de espessura, preenchida com betão C30/37 XC3 (Pt) C1 0,40 D25 S3 e uma armadura em malhasol AQ50 em aço A500 EL (Figura 7).

Os seus apoios foram conseguidos através de vigas em estrutura metálica, que descarregam nas paredes-mestras, utilizando diversos tipos de perfis, consoante o vão, desde HEB120 a HEB200 e em aço S355 J0. Na bordadura destas lajes, foi também inserido um perfil de cantoneira UNP 140 em aço S355 J0, para garantir uma ligação eficaz entre os pavimentos e os paramentos, melhorando o comportamento à acção sísmica. De forma a reforçar esta ligação, ainda se introduziram pontos de ancoragem com varões A500 NR SD  $\Phi 12//0,60$ , selados com resina epóxida RE500.

Finalmente, toda a estrutura resistente da cobertura recorre a asnas metálicas (Figura 8), nas quais se apoiam madres que recebem o painel *sandwich* para acabamento e isolamento térmico e acústico, a subtelha e o ripado em estrutura metálica para assentamento das telhas cerâmicas lusas.

Por fim, apresenta-se um extracto do projecto de Arquitectura do edifício do piso 1 (Figura 9), que permite uma percepção mais espacial da obra em questão.



**Figura 7** - Pormenor da construção uma laje metálica em chapa colaborante.



**Figura 8** - Estrutura metálica da cobertura do Palácio.



**Figura 9** - Extracto do projecto de Arquitectura do piso 1.

### 3.3. A construção nova equivalente

A solução nova equivalente (que assegure as áreas equivalentes em termos imobiliários), que seria edificada no mesmo local, é a base de comparação com a reabilitação, representando os métodos de construção mais comuns no seio da construção actual. Como tal, toda a estrutura seria em betão armado C30/37 XC3 (Pt) C1 0,40 D25 S3 e A500 NR SD, com as seguintes densidades (valores do edifício em construção nova do mesmo empreendimento):

- sapatas - 88,4 kg/m<sup>3</sup>;
- vigas de fundação - 162,5 kg/m<sup>3</sup>;
- paredes e muros - 153,4 kg/m<sup>3</sup>;
- escadas - 207,1 kg/m<sup>3</sup>;
- pilares - 209,4 kg/m<sup>3</sup>;
- vigas - 126,2 kg/m<sup>3</sup>;
- lajes - 143,4 kg/m<sup>3</sup>.
- Adicionalmente, com excepção das paredes estruturais, todas as paredes divisórias que substituiriam apenas as mestras que foram mantidas no Palácio são em alvenaria de tijolo furado (simples ou dupla em tijolo 30 x 20 x 11 cm), prática também rotineira no panorama nacional.

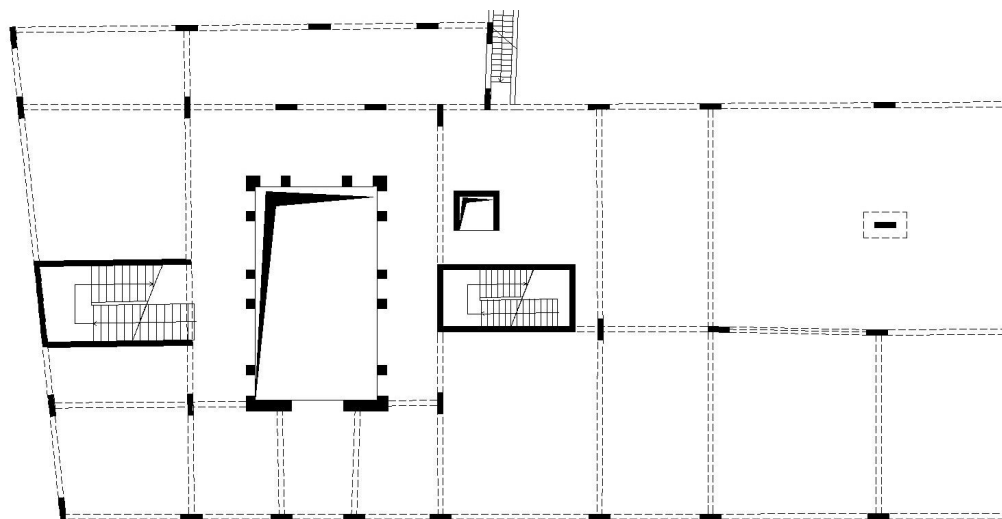
Para além disso, haveria a necessidade de se demolir integralmente todo o edifício antigo actualmente existente, com consequente encaminhamento dos resíduos para operador licenciado. Sob este ponto de vista, considerou-se que todos teriam o mesmo tratamento do que os verdadeiros, produzidos nas demolições reais, permitindo uma comparação mais fidedigna com uma hipotética situação real.

Portanto, todos os resíduos de alvenarias, metálicos ou mistura de resíduos foram sujeitos à operação de valorização R13 - Armazenagem para posterior reciclagem e os de madeira foram sujeitos à operação R3 - Reciclagem e/ou recuperação.

Como se trata de um imóvel com características patrimoniais muito importantes, parte-se do princípio de que todas as cantarias seriam reaproveitadas no próprio edifício, pelo que não se procedeu a qualquer avaliação destes elementos, por serem comuns às duas soluções.

Por fim, a cobertura seria em lajes inclinadas de betão armado, sobre as quais se aplicaria isolamento térmico, subtelha e telhas lusas. Como a solução de isolamento é muito semelhante à da reabilitação, não foi estudada em nenhuma das hipóteses, por originar impactes muito semelhantes.

Assim, a Figura 10 representa a estrutura hipotética deste mesmo piso 1 desta solução nova equivalente, permitindo uma comparação com o projecto de arquitectura real apresentado na secção anterior.



**Figura 10** - Estrutura da solução nova equivalente (piso 1).

### 3.4. Lista de quantidades

Face ao descrito nos pontos anteriores, a Tabela 2 resume as quantidades de trabalhos a avaliar nas duas situações de intervenção estrutural.

**Tabela 2** - Lista resumida de quantidades.

Reabilitação				Nova construção equivalente			
Art.	Descritivo	Un.	Qt.	Art.	Descritivo	Un.	Qt.
1	Demolição parcial	vg	1	1	Demolição total	vg	1
2	Contenção periférica			2	Betão de limpeza	m <sup>2</sup>	1016,12
2.1	Tirantes passivos	m	513,54	3	Betão C30/37	m <sup>3</sup>	1328,37
2.2	Ancoragens passivas	un	28	4	Cofragens	m <sup>2</sup>	5530,73
3	Micro-estacas	m	520,88	5	Armaduras de aço	kg	187928,3
4	Betão de protecção	m <sup>2</sup>	376,84	6	Laje térrea	m <sup>2</sup>	559,63
5	Betão C30/37			7	Alvenarias		
5.1	Em elementos maciços	m <sup>3</sup>	416,6	7.1	Parede simples	m <sup>2</sup>	497,21
5.2	Betão projectado	m <sup>3</sup>	346,87	7.2	Parede dupla	m <sup>2</sup>	1087,56
6	Cofragens	m <sup>2</sup>	1331,99				
7	Armaduras de aço						
7.1	Em varão	kg	44446,1				
7.2	Em rede electrossoldada	kg	16096,7				
8	Laje colaborante	m <sup>2</sup>	1505,61				
9	Aço S355 J0	kg	138408,2				
10	Laje térrea	m <sup>2</sup>	764,24				

## 4. Avaliação do ciclo de vida

### 4.1. Principais considerações

Este estudo teve em consideração as directrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044 e pretende comparar a reabilitação estrutural do Palácio Condes de Murça efectuada, com uma solução equivalente em betão armado e em alvenaria de tijolo furado, avaliando quantitativamente os ganhos ambientais da escolha da primeira.

Assim, em termos de fronteiras do sistema, vai-se avaliar única e simplesmente os elementos estruturais, considerando-se que os demais não são diferenciadores das soluções, uma vez que são similares em ambas as situações. Efectivamente, o que diferencia a reabilitação da construção nova equivalente é a própria estrutura, porque os acabamentos seriam similares. O mesmo ocorre nas escavações, que para as duas estruturas seriam exactamente iguais, o que permite que não sejam consideradas em qualquer destas análises.

No que diz respeito aos impactos incorporados no fabrico dos materiais de construção, utilizaram-se as bases de dados existentes para o efeito no *software Gabi*, sendo que, para os materiais equivalentes usados nas duas soluções, como o betão armado, considerou-se que tinham a mesma origem e que eram fornecidos pelo mesmo fabricante. Também se entrou em linha de conta com os impactos devidos ao transporte rodoviário dos materiais. A unidade funcional considerada foi o m<sup>2</sup>.

Em termos de vida útil, o projecto de estruturas foi elaborado para um período mínimo de 50 anos, durante o qual não se prevê qualquer tipo de manutenção. Do mesmo modo, a solução equivalente criada respeita a especificação E464 do LNEC, garantindo-se esse mesmo período. Logo, como o estudo só engloba aspectos estruturais, o impacto da operação é negligenciável.

No final deste período, poder-se-ia equacionar teórica e academicamente que ambas as estruturas seriam demolidas, terminando-se nesta etapa a avaliação integral do ciclo de vida. Porém, por se tratar de um palácio antigo, é pouco provável que tal aconteça. Para além disso, com esta opção, os ganhos em termos de poupança de materiais devidos à não demolição do Palácio não seriam contabilizados. Por isso, não se previu qualquer fim de vida nesta situação. Assim, esta ACV vai basear-se numa perspectiva de *cradle-to-gate*.

Por fim, os valores dos consumos de água e de energia do estaleiro foram gentilmente fornecidos pela Direcção de Obra, o que permitiu contabilizar mais correctamente os impactos da fase de construção. Também as distâncias aos fornecedores de materiais foram estimadas a partir das fichas técnicas dos materiais aplicados, fornecidos pela Direcção de Obra. Os desperdícios e rendimentos dos materiais foram obtidos pela mesma via.

A Tabela 3 resume os dados recolhidos para cada actividade, que permitiram calcular os impactos ambientais através do *software Gabi*.

Como complemento à análise ambiental, realizou-se uma avaliação dos custos do ciclo de vida, com base em preços reais de mercado, relativos ao ano de 2011. Tal como referido, como as intervenções são estruturais para um período de vida útil de 50 anos, as únicas fases contempladas nesta análise são

a de demolições prévias e a de construção, numa perspectiva de *cradle-to-gate*.

**Tabela 3** - Dados para a Avaliação do Ciclo de Vida.

Actividade	Dados para a Avaliação do Ciclo de Vida
Demolições	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquina de construção (10 km/dia)</li> <li>- 0,22 m<sup>3</sup>/água por m<sup>3</sup> alvenaria</li> <li>- 0,8 kWh por m<sup>3</sup> alvenaria</li> <li>- 632,17 ton de alvenarias (reabilitação) e 4348,17 ton de alvenarias (nova equivalente)</li> <li>- 53,11 ton de madeira</li> <li>- 29 km até ao operador licenciado (ida e volta)</li> </ul>
Contenção periférica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0,0026 kg aço/kg varão</li> <li>- 0,0074 kg resina epóxida/kg varão</li> <li>- distancia à fábrica: 50 km</li> </ul>
Betão armado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 223 kg cimento/m<sup>3</sup> (a 100 km da central)</li> <li>- 71 kg cinzas volantes/m<sup>3</sup> (a 162 km da central)</li> <li>- 1020 kg britas/m<sup>3</sup> (a 25 km da central)</li> <li>- 880 kg areia/m<sup>3</sup> (a 25 km da central)</li> <li>- 170 L água/m<sup>3</sup></li> <li>- 2,82 kWh/m<sup>3</sup> para amassadura</li> <li>- distância à central (ida e volta): 30 km</li> <li>- cofragem: contraplacado marítimo de 500 kg/m<sup>3</sup> e de 20 mm (5 reutilizações)</li> <li>- distância à siderurgia (ida e volta): 50 km</li> <li>- 0,1 m<sup>3</sup>/água por m<sup>3</sup>/betão em obra</li> <li>- 0,36 kWh por m<sup>3</sup>/betão em obra</li> </ul>
Micro-estacas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trado partindo 98 kg/rocha por metro linear de micro-estaca</li> <li>- raio-médio da micro-estaca: 12,5 cm</li> <li>- relação a/c da calda: 0,45, com 5,8 kg/cimento por metro linear</li> <li>- peso médio da micro-estaca: 31,9 kg/m</li> <li>- distância à central de cimento: 30 km</li> <li>- distância à fábrica das micro-estacas: 50 km</li> </ul>
Estrutura metálica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distância à siderurgia e serralharia (ida e volta): 600 km</li> <li>- caso da laje colaborante: galvanização com zinco - 1 mm de espessura</li> <li>- distância à fábrica de produção da chapa galvanizada (ida e volta): 35 km</li> </ul>
Alvenarias	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 25,9 kg de argamassa por m<sup>2</sup> de parede simples de tijolo 30x20x11</li> <li>- 4,5 L de água por m<sup>2</sup> de parede simples de tijolo 30x20x11</li> <li>- 18,9 kg de areia e 7 kg de cimento por m<sup>2</sup> de parede simples de tijolo 30x20x11</li> <li>- distância à fábrica da argamassa pré-doseada (ida e volta): 30 km</li> <li>- 17 tijolos 30x20x11 por m<sup>2</sup> de parede simples de tijolo 30x20x11 (fábrica a 171 km ida e volta)</li> </ul>

#### 4.2. Resultados - Avaliação ambiental e económica

A partir das considerações anteriores e das medições dos impactes e consumos da fase de obra, foi possível obter os seguintes resultados da ACV das duas situações (numa perspectiva *cradle-to-gate*) e que são resumidos na Tabela 4.

**Tabela 4** - Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida.

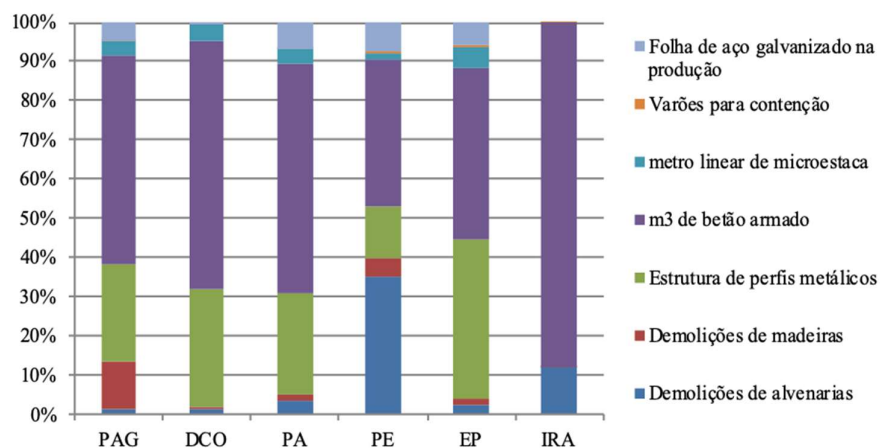
Impacte	Reabilitação	Nova	Reabilitação por m <sup>2</sup>	Nova por m <sup>2</sup>	Desvio <sup>1</sup>
(PAG) Potencial de Aquecimento Global (kg CO <sub>2</sub> eq)	6,27x10 <sup>5</sup>	7,09x10 <sup>5</sup>	149,44	169,0	13%
(DCO) Depleção da Camada de Ozono (kg CFC <sub>11</sub> eq)	2,23x10 <sup>-2</sup>	2,04x10 <sup>-2</sup>	5,55x10 <sup>-6</sup>	4,86x10 <sup>-6</sup>	-12%
(PA) Potencial de Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	1,74x10 <sup>3</sup>	2,33x10 <sup>3</sup>	0,41	0,56	34%
(PE) Potencial de Eutrofização (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	2,39x10 <sup>2</sup>	8,75x10 <sup>2</sup>	0,06	0,21	266%
(EP) Energia primária (MJ)	5,29x10 <sup>6</sup>	5,84x10 <sup>6</sup>	1260,8	1391,9	10%
Resíduos (ton)	685,28	4401,28	0,16	1,05	542%
(IRA) Indicador restabelecimento de água (mm/m <sup>2</sup> )	18,1	34,6	0,0043	0,0082	91%

<sup>1</sup> - Desvio da construção nova equivalente face à reabilitação

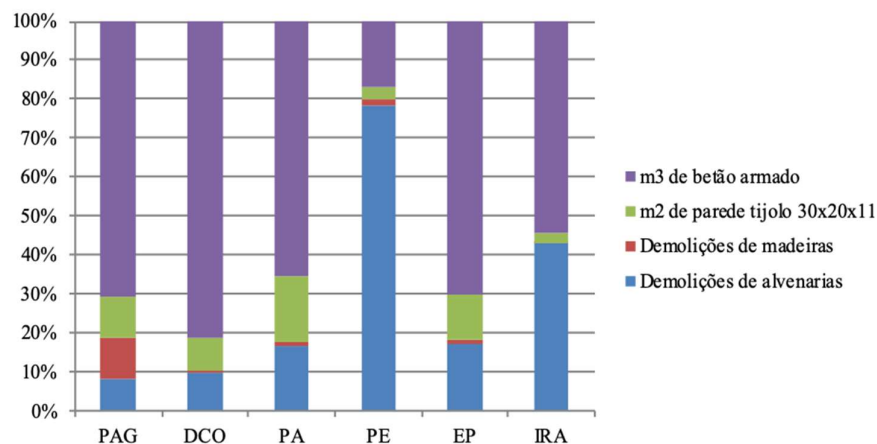
As Figuras 11 e 12 ilustram a importância relativa de cada uma das actividades, para a solução de reabilitação e da construção nova equivalente, respectivamente.

Por fim, os resultados da estimativa de custos encontram-se discriminados na Tabela 5, para a

demolição e para as actividades de construção, apresentando-se também as Figuras 13 e 14, que permitem uma avaliação qualitativa da importância de cada actividade. Os gráficos são apresentados em percentagem, para salvaguardar a confidencialidade dos dados detalhados.



**Figura 11** - Impactes relativos da reabilitação do Palácio.

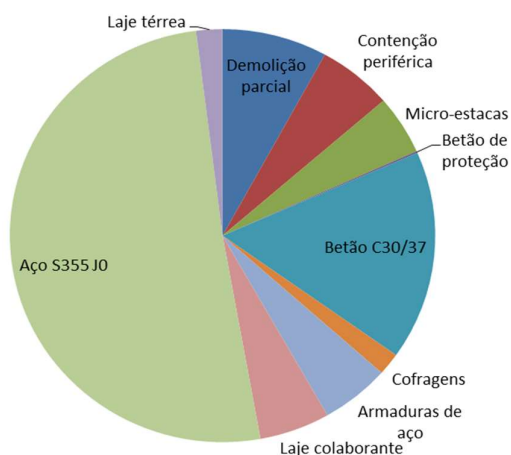


**Figura 12** - Impactes relativos da construção nova equivalente.

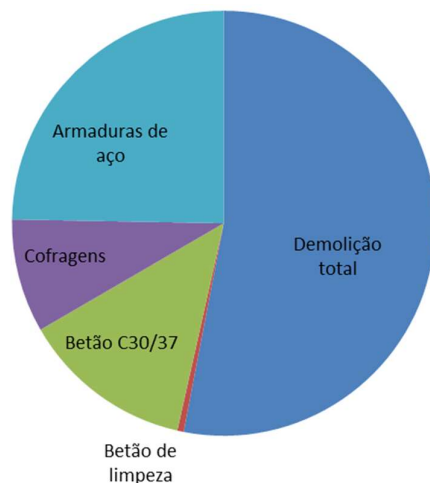
**Tabela 5** - Custos das duas soluções.

	Reabilitação	Nova	Reabilitação por m <sup>2</sup>	Nova por m <sup>2</sup>	Desvio <sup>1</sup>
Demolição (€)	74474,73	375000,00	17,75	89,38	403,5%
Construção (€)	857189,36	332096,35	204,30	79,15	-61,26%
Total	931664,09	707096,35	222,05	168,53	-24,1%

<sup>1</sup> - Desvio da construção nova equivalente face à reabilitação



**Figura 13** - Distribuição de custos na reabilitação.



**Figura 14** - Distribuição de custos na construção nova equivalente.

## 5. Discussão dos resultados

A principal constatação deste caso de estudo permite identificar que a reabilitação foi de facto ambientalmente mais sustentável do que a construção nova equivalente, permitindo poupanças ambientais por  $m^2$  de: 131,1 MJ; 0,89 ton de resíduos; 19,56 kg  $CO_2$  eq; 0,15 kg  $SO_2$  eq; 0,15 kg  $PO_4^{3-}$  eq; 0,0039 mm/ $m^2$  de água.

A ordem de grandeza destes benefícios encontra-se em linha de conta com o obtido no estudo de Frey *et al.* (2011) para os edifícios multifamiliares, o que permite alargar a base de concordância neste domínio, fornecendo dados importantes a possíveis decisores futuros. No entanto, estes valores não permitem que a reabilitação por si só seja capaz de resolver todas as pressões ambientais actualmente existentes no mercado da construção, podendo, sim contribuir para a sua redução.

Com efeito, Portugal localiza-se numa zona de sismicidade elevada, que requer intervenções urgentes de reforço do património antigo, de modo a prevenir eventuais catástrofes desta natureza. Por conseguinte, uma reabilitação responsável de um palácio com vários séculos de História implica sempre a realização de um reforço sísmico considerável, que só se consegue eficazmente recorrendo a técnicas bastante intrusivas, como a introdução de betão projectado e de estrutura metálica.

Consequentemente, embora com a reabilitação se poupem várias toneladas de materiais, o que por si só já é muito benéfico ambientalmente, a fase de obra continua a ter impactos muito significativos, o que lhe permite uma diferença positiva de apenas 13% do potencial de aquecimento global e de 10% de energia primária.

No caso do potencial de depleção da camada de ozono, a reabilitação acaba por ser um pouco pior do que a construção nova equivalente. Isto deve-se essencialmente à estrutura metálica, cujos impactos ambientais incorporados são muito elevados.

Os ganhos são mais consideráveis no potencial de acidificação, onde o betão armado tem um peso muito grande, com impactos muito superiores na construção nova, na qual a densidade de armadura e a densidade de cofragens são muito superiores.

Por fim, para além dos resíduos, os benefícios são notórios no potencial de eutrofização, onde houve uma evolução positiva de 266%. Verifica-se que tais impactos provêm essencialmente da fase de demolições que, por esse motivo, é evidente ser muito mais positiva na reabilitação.

Estas constatações podem ser retiradas das Figuras 11 e 12, sendo reforçadas e comprovadas pela análise de robustez funcionalidade do *software* Gabi. Nesta análise, o programa identifica directamente as fases que são mais responsáveis por cada impacto, apresentando-se na Tabela 6 estes mesmos resultados.

Este caso de estudo permitiu concluir que o impacto do betão armado e da estrutura metálica é muito elevado, mesmo na reabilitação, representando o betão armado mais de 50% dos impactos em quase todas as categorias avaliadas e a estrutura metálica entre 15 e 30%.

No caso da construção nova equivalente, o betão armado representa quase a globalidade dos impactos, havendo um aumento do peso relativo das demolições, particularmente no potencial de eutrofização.

Em termos da incerteza dos resultados, houve uma preocupação especial na sua diminuição, medindo os consumos e os rendimentos em fase de obra, utilizando o planeamento da obra e registando as

distâncias aos fabricantes reais e os seus consumos por produto. Ainda assim, para os impactes incorporados em cada material unitário, recorreu-se à base de dados do *software* Gabi. Como se trata de uma base de dados do mercado alemão e não do português, é possível que alguns dos impactes sejam diferentes.

**Tabela 6** - Fases mais condicionantes para cada impacte ambiental de ciclo de vida.

Impacte	Fases mais condicionantes	
	Reabilitação	Nova equivalente
Potencial de Aquecimento Global (kg CO <sub>2</sub> eq)	Betão armado e estrutura metálica	Betão armado
Depleção da camada de Ozono (kg CFC <sub>11</sub> eq)	Betão armado e estrutura metálica	Betão armado
Potencial de Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	Betão armado	Betão armado
Potencial de Eutrofização (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	Betão armado e demolições	Demolições
Energia primária (MJ)	Estrutura metálica e betão armado	Demolições prévias e betão armado
Resíduos (ton)	Demolições	Demolições prévias
Indicador restabelecimento de água (mm/m <sup>2</sup> )	Betão armado	Demolições prévias e betão armado

Do mesmo modo, escolheu-se para contabilização dos impactes do transporte um tipo de camião comum existente no mesmo *software*. Porém, cada fornecedor utiliza o seu camião com cargas distintas e com consumos distintos. Também o percurso utilizado entre a fábrica e a obra poderá não ter sido o mesmo que aqui foi equacionado, embora se tenha tido o cuidado de escolher o percurso mais provável.

De forma idêntica, as máquinas de construção utilizadas foram máquinas-tipo do *software*, que poderão ter impactes e consumos diferentes dos das máquinas reais utilizadas na obra.

Paralelamente, consideraram-se os *mix*'s energéticos referentes à electricidade e ao *diesel* como sendo os da UE-15, onde Portugal se insere, que poderão ser distintos do nacional, o que gera impactes incorporados também distintos.

No entanto, mesmo considerando estes níveis de incerteza, este trabalho pode afirmar que, no caso em análise, a reabilitação do Palácio Condes de Murça foi mais sustentável ambientalmente do que a sua demolição integral e substituição por uma construção nova equivalente.

Quanto à componente económica, a análise feita baseou-se em preços de mercado praticados em 2011, não havendo lugar a qualquer incerteza, já que foram usados os valores acordados para a obra em questão.

Assim, em termos de resultados, verifica-se que a construção nova seria mais competitiva financeiramente do que a reabilitação. De facto, mesmo com um aumento de 71,63 €/m<sup>2</sup> devido à demolição total, a utilização global de betão armado, em vez de se recorrer a soluções especiais em estrutura metálica e em laje colaborante, permitiria poupar 61,26% nos trabalhos de edificação da estrutura. Logo, globalmente, a poupança financeira de demolir e reconstruir seria de 53,52 €/m<sup>2</sup> face à solução adoptada.

A falta de competitividade económica deste tipo de reabilitação estrutural em Portugal em muito se deve às exigências sísmicas do local e ao elevado preço da estrutura metálica, que, em contrapartida, permite soluções leves e com resistências compatíveis com os referidos esforços.

## 6. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho procurou avaliar a hipótese de uma reabilitação ser mais sustentável do que uma construção nova equivalente. Para isso, recorreu-se a uma base teórica e a uma base experimental, aplicando a avaliação do ciclo de vida a um caso de estudo real.

Tal como discutido na secção anterior, pôde verificar-se que, no caso da reabilitação apresentada, esta foi globalmente mais positiva ambientalmente do que a construção nova equivalente. Porém, como a reabilitação é muito intrusiva, os benefícios ambientais não são tão grandes como seria expectável, embora o balanço seja quase sempre positivo nos vários domínios estudados: 13% no CO<sub>2</sub>, 34% no SO<sub>2</sub>, 266% no PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, 10% na energia, 542% nos resíduos e 91% na água (só no potencial para a depleção do ozono é que foi pior em 12%).

Em termos económicos, a reabilitação, numa perspectiva de reconstrução, não mostrou ser mais competitiva do que a total demolição e reconstrução do Palácio. É certo que a demolição do edifício em questão nunca foi uma hipótese plausível, devido ao seu elevado valor patrimonial e também por aspectos normativos. Contudo, esta conclusão é um desafio para a maioria dos edifícios que necessitam de intervenções de reforço sísmico e que não apresentam qualquer tipo de valor patrimonial, desafiando o desenvolvimento de soluções de maior viabilidade económica, já que os desvios aqui calculados não tornam a reabilitação muito atractiva monetariamente.

Por outro lado, durante a discussão de resultados, levantou-se a problemática da incerteza no cálculo dos verdadeiros impactes ambientais. Considera-se, por isso, que seria fundamental criar bases de dados nacionais indicando os impactes incorporados das diferentes soluções construtivas, dos diferentes equipamentos utilizados, e do *mix* energético nacional (em combustíveis e em electricidade) para diminuir a incerteza do modelo.

Adicionalmente, nem sempre é possível medir com rigor os impactes em fase de obra, como aqui se efectuou. Com efeito, pretendendo que a ACV seja uma ferramenta de apoio à decisão, os cálculos serão efectuados antes da obra e não durante ou após a mesma.

Quando tal acontece, surge um outro nível de incerteza, ligado à fase de construção. Assim seria interessante criar uma base de dados nacional com os impactes de cada processo construtivo, em termos médios e de desvio-padrão, para que possa ser utilizada em cálculos futuros.

Por fim, realça-se a necessidade de se entrar em linha de conta com aspectos sociais aquando de uma tomada de decisão desta natureza. Como foi perceptível, foram mesmo estes os aspectos mais importantes neste caso de estudo, obrigando à reabilitação de um edifício com valor patrimonial. Todavia, há casos em que a reabilitação pode ser socialmente tão bem recebida como uma reconstrução.

Logo, se se pretende diminuir os impactes ambientais do edificado, procurando uma reabilitação do património obsoleto, seria útil desenvolver soluções de melhor desempenho económico e dotar o mercado de ferramentas financeiras que a apoiem em detrimento da construção nova. Só assim os investidores poderão encarar a reabilitação como um caminho mais benéfico e, consequentemente, só assim se conseguirá aliar os objectivos ambientais aos económicos, numa perspectiva clara de sustentabilidade.

Como conclusão, procurar ferramentas que promovam uma construção com baixos impactes ambientais e com um preço global tão competitivo como a construção nova aparenta ser um dos desafios cuja discussão futura poderia ter resultados bastante profícuos numa procura por um edificado mais sustentável. A conjugação destas abordagens de avaliação ambiental e custos de ciclo de vida, suportadas por base de dados sobre processos construtivos, materiais e respectiva variabilidade podem ser a base de uma metodologia de apoio à tomada de decisão.

## Agradecimentos

À Concreto Plano Construções e à FCT que financiaram a investigação; à Plano Sustentável que gentilmente cedeu os dados da avaliação da sustentabilidade do empreendimento; à Artepura, à ESAF e à Coporgest pela sua autorização de divulgação do trabalho; ao CERIS.

## Referências

- Abeysondra, U., Babel, S., Gheewala, S. (2007). A decision making matrix with life cycle perspective of materials for roofs in Sri Lanka, *Materials & Design*, 28(9), pp. 2478-2487.
- Afonso, A.S., Rodrigues, C.P. (2010). Avaliação do impacte global em Portugal da adoção de medidas de eficiência hídrica ao nível dos produtos, Actas do Congresso de Inovação na Construção Sustentável 2010, Curia, Portugal, pp. 47-57.
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M. (2011). Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp. 460-470.
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M. (2008). Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board, *Energy and Buildings*, 40(1), pp. 1-10.
- Battisti, R., Corrado, A. (2005). Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage, *Journal of Cleaner Production*, 13(13-14), pp. 1295-1300.
- Bin, G., Parker, P. (2012). Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home - The REEP House, *Applied Energy*, 93, pp.24-32.
- Dylewski, R., Adamczyk, J. (2011). Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls, *Building and Environment*, 46(12), pp. 2615-2623.
- Eaton, K., Amato, A. (1998). A Comparative Life Cycle Assessment of Steel and Concrete Framed Office Buildings, *Journal of Constructional Steel Research*, 46(1-3), pp. 286-287.
- Eurostat (2012a). Final energy consumption, by sector, disponível na Internet em <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdpc320&language=en>
- Eurostat (2012b). Generation of waste by economic activity, disponível na Internet em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ten00106&plugin=1>

- Ewing, B., Moore, D., Goldfinger, S., Oursler, A., Reed, A., Wackernagel, W. (2010). The ecological Footprint Atlas 2010, Global Footprint Network, EUA.
- Faucheux, S., O'Connor, M., Der Straaten, J.V. (1998). Economy and Environment: Sustainable development: concepts, rationalities, and strategies, Volume 13, Springer, Holland.
- Ferreira, T., Correia, A. (2007). Palácio Murça - Relatório Histórico, Portugal.
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management*, 91(1), pp. 1-21.
- Frey, P., Dunn, L., Cochran, R., Spataro, K., McLennan, J.F., DiNola, R., Tallering, N., McDaniel, E., Haas, D., Heider, B., Clem, S., Pike, A., Dettling, J., Humbert, S. (2011). The Greenest Building: Quantifying the Environmental Value of Building Reuse, National Trust for Historic Preservation, EUA.
- Goedkoop, M., Schryver, A.D., Oele, M., Durksz, S., de Roeste, D. (2010). Introduction to LCA with Simapro 7, PRé Consultants, Países Baixos.
- Goodking, D. (2011). The World Population at 7 Billion, Population Division, US Census Bureau, disponível na Internet em: <http://blogs.census.gov/2011/10/31/the-world-population-at-7-billion/>  
<http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/construction/competitiveness/life-cycle-costing>.
- Huntzinger, D., Eatmon, T. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies, *Journal of Cleaner Production*, 17(7), pp. 668-675.
- Instituto Nacional de Estatística (2012a). Estatísticas da Construção e Habitação 2011, Instituto Nacional de Estatística, Portugal.
- Instituto Nacional de Estatística (2012b). Resultados preliminares dos Censos 2011, disponível na Internet em: <http://www.ine.pt>
- Ireland, D. (2008). New tricks with old bricks. How reusing old buildings can cut carbon emissions, The Empty Houses Agency, UK.
- ISO - International Organization for Standardization, Environmental management (1997). Life cycle assessment - Principles and framework, International Standard ISO 14040, First edition, International Organization for Standardization.
- ISO - International Organization for Standardization, Environmental management (2006) - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines, International Standard ISO 14044, First Edition, International Organization for Standardization.
- Kellenberger, D., Althaus, H.-J. (2009). Relevance of simplifications in LCA of building components, *Building and Environment*, 44(4), pp. 818-825.
- Kosareo, L., Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs, *Building and Environment*, 42(7), pp. 2606-2613.
- Langdon, D. (2007). Life Cycle Costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology, disponível na Internet em:
- Moraes, C., Kieling, A., Caetano, M.; Gomes, L. (2010). Life cycle analysis (LCA) for the incorporation of rice husk ash in mortar coating, *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), pp. 1170-1176.
- Nicoletti, G., Notarnicola, B., Tassielli, G. (2002). Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles, *Journal of Cleaner Production*, 10(3), pp. 283-296.
- Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA, *Construction and Building Materials*, 23(1), pp. 28-39.
- Ortiz, O., Pasqualino, J., Diez, G., Castells, F. (2010). The environmental impact of the construction phase: An application to composite walls from a life cycle perspective, *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), pp. 832-840.
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A., Haas, E., Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems, *Energy and Buildings*, 43(12), pp. 3419-3429.
- Papadoulos, A., Giama, E. (2007). Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building, *Building and Environment*, 42(5), pp. 2178-2187.
- Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies, *Renewable Energy*, 31(1), pp. 55-71.
- Petersen, A., Solberg, B. (2005). Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden, *Forest Policy and Economics*, 7(3), pp. 249-259.
- Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K., (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview, *Energy and Buildings*, 42(10), pp. 1592-1600.
- Reza, B., Sadiq, R., Hewage, K. (2011). Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran:

- An AHP-based life cycle analysis, *Construction and Building Materials*, 25(4), pp. 2053-2066.
- Rivela, B., Moreira, M., Muñoz, I., Rieradevall, J., Feijoo, G. (2006). Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture, *The Science of the total environment*, 357(1-3), pp. 1-11.
- Sartori, I., Hestnes, A. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article, *Energy and Buildings*, 39(3), pp. 249-257.
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp. 871-875.
- Software Gabi, disponível na Internet em: <http://www.gabi-software.com/international/index/>
- Su, X., Zhang, X. (2010). Environmental performance optimization of window-wall ratio for different window type in hot summer and cold winter zone in China based on life cycle assessment, *Energy and Buildings*, 42(2), pp. 198-202.
- Syrrakou, E., Papaefthimiou, S., Yianoulis, P. (2006). Eco-efficiency evaluation of a smart window prototype, *The Science of the total environment*, 359(1-3), pp. 267-282.
- Tarantini, M., Loprieno, A., Porta, P. (2009). A life cycle approach to Green Public Procurement of building materials and elements: A case study on windows, *Energy*, 36(5), pp. 2473-2482.
- Techato, K.-A., Watts, D., Chaiprapat, S. (2009). Life cycle analysis of retrofitting with high energy efficiency air-conditioner and fluorescent lamp in existing buildings, *Energy Policy*, 37(1), pp. 318-325.
- US Census Bureau (2004). Global Population Profile 2002 - International Population Reports, US Census Bureau/US Government Printing Office, EUA.
- Website comercial do empreendimento do Palácio condes de Murça, disponível na Internet em: <http://palaciocondesdemurca.com>
- Zhong, Z., Song, B., Loh, P. (2011). LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine, *Renewable Energy*, 36(8), pp. 2227-2237.