



# GUIA DE FORMAÇÃO EM ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS AÇORES





## FICHA TÉCNICA

**Título:**

Guia de formação em Arquitetura Bioclimática e Eficiência Energética dos Açores

**Promotor:**

Governo dos Açores – Direção Regional do Ambiente e Alterações Climáticas

**Edição:**

Ordem dos Arquitectos – Secção Regional dos Açores

**Coordenação Geral e Prefácio:**

Nuno Costa

Presidente do Conselho Diretivo da Secção Regional dos Açores da Ordem dos Arquitectos

**Coordenação Editorial:**

Joana Mourão

Nadir Bonaccorso

**Autores:**

Francisco Fernandes, Engenheiro

Joana Mourão, Arquiteta [Ph.D]

João Santa Rita, Arquiteto [Ph.D]

José Nunes, Engenheiro

Nadir Bonaccorso, Arquiteto [Ph.D]

Paula Serra, Arquiteta

Paulo Franco, Engenheiro

Pedro Perpétuo, Engenheiro

Ricardo Camacho, Arquiteto

Ricardo Resende, Engenheiro [Ph.D]

Sara Parece, Arquiteta

Vanessa Melo, Arquiteta [Ph.D]

**Design Gráfico:**

Pedro Martins

ISBN: 978-972-8897-69-7

**Local e Data:**

Ponta Delgada, janeiro de 2024

**Contacto:**

acores.presidencia@ordemdosarquitectos.org

# 1.3 Desafios do carbono Incorporado e da Avaliação de Ciclo de Vida nos edifícios

**SARA PARECE E RICARDO RESENDE**

*CENTRO DE INVESTIGAÇÃO EM CIÊNCIAS DA INFORMAÇÃO, TECNOLOGIAS E ARQUITETURA, INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA (ISTAR)*

## **1. O que são as emissões e porque é que são importantes?**

A presença, em proporções muito diminutas, de gases com efeito de estufa (GEE ou GHG, de Green House Gas) na atmosfera aumenta a temperatura média de  $-18^{\circ}\text{C}$  para  $15^{\circ}\text{C}$  tornando-a habitável. Os ciclos naturais dos GEE mantiveram-se relativamente estáveis até que foram alterados de forma abrupta pelo rápido desenvolvimento humano possibilitado pela extração e queima de combustíveis fósseis, que continuam a ser a fonte de energia potente, barata e flexível que tem permitido bem-estar a uma população crescente.

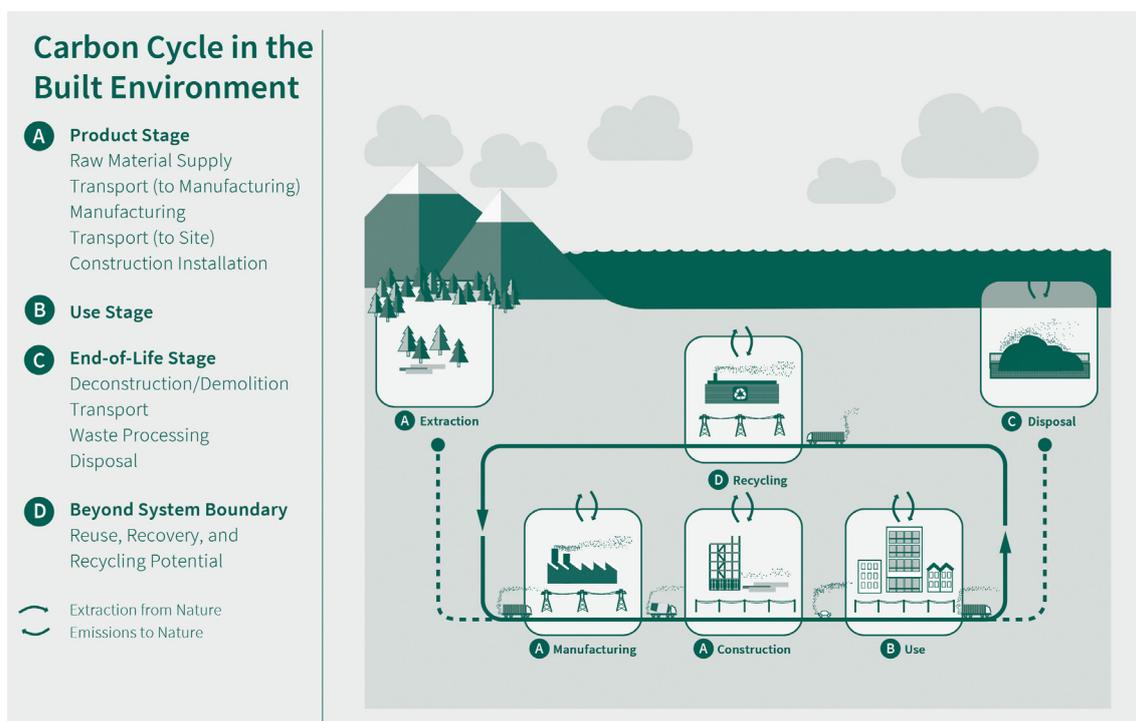
Para além da queima de combustíveis fósseis, atividades humanas como a Agricultura também libertam Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros GEE como o Metano, o Óxido de Azoto ou o Ozono, sendo que alguns deles, pela sua capacidade de retenção de calor e tempo de vida na atmosfera, são mais prejudiciais que o  $\text{CO}_2$ . Um quilograma de Óxido de Azoto, por exemplo, tem um Potencial de Aquecimento Global (PAG), ou GWP, de Global Warming Potential) 298 vezes superior. Por uma questão de conveniência, o  $\text{CO}_2$  é a referência para medir a capacidade de reter calor, englobando o efeito de todos estes gases. O PAG de um produto ou atividade é, portanto, expresso em quilogramas de  $\text{CO}_2$  equivalente, ou  $\text{kg CO}_2\text{e}$ . Hoje podemos estabelecer com grande confiança uma equivalência entre a quantidade de  $\text{CO}_2$  libertado e o aumento de temperatura: a cada mil gigatoneladas corresponde um aquecimento de  $0,45\text{ C}$  (IPCC, 2023).

Mais de um terço (40%) dos GEE europeus são emitidos pela construção e operação dos edifícios e infraestruturas. O foco deste artigo são as emissões associadas ao Carbono Incorporado, também chamado Embodied Carbon: as emissões que não estão associadas à operação dos edifícios, mas sim à produção, transporte, construção e instalação, fim de vida dos materiais e produtos de construção. Por simplificação, e porque é a maior parcela, referimo-nos com frequência ao Carbono Incorporado como estando associado ao fabrico e construção.

## 2. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A ACV de um edifício é atualmente o método estabelecido para avaliar emissões e outros poluentes emitidos na atmosfera, nas fases do ciclo de vida, definidas abaixo e representados na Figura 19:

- A - Produção e Construção,
- B - Utilização,
- C - Fim de Vida,
- D - Impactes além da fronteira do sistema.



**Figura 19**

Fontes de emissões por fase do ciclo de vida (A, B, C, D) de um edifício de acordo com as fases definidas na Norma europeia (EN) 15978 (Fonte: *Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide*).

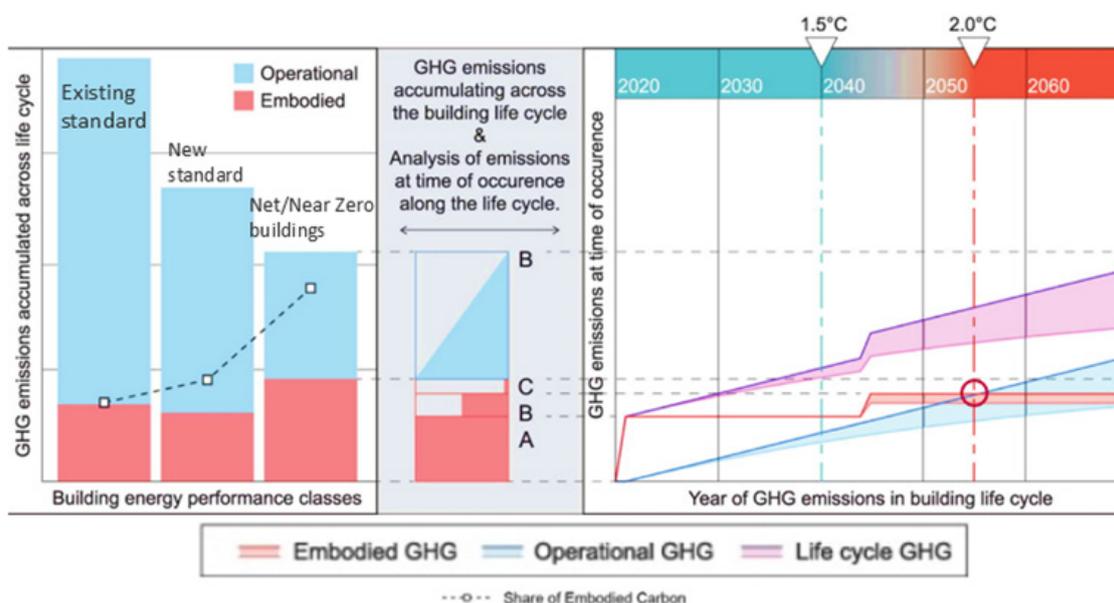
A ACV da construção é uma prática complexa alicerçada num conjunto de normas europeias (EN) e standards internacionais (ISO). A Comissão Europeia desenvolveu a metodologia Level(s) para o sector da construção. A Level(s) baseia-se em seis Macro Objetivos: Energia; Materiais e Resíduos; Água; Qualidade do Ar Interior; Resiliência às Alterações Climáticas; e Otimização do Valor. Para cada Macro Objetivo são definidos indicadores quantificáveis, no total de dezasseis, e os seus processos de cálculo.

A metodologia Level(s) pode ser aplicada com três níveis de desenvolvimento e detalhe: o primeiro implica apenas avaliações qualitativas na fase conceptual do projeto; o segundo nível corresponde ao projeto de execução e estima o desempenho do edifício de acordo com métodos normalizados; o terceiro nível avalia o desempenho do edifício em utilização e implica a monitorização e o levantamento da atividade local. Pode encontrar apresentações, manuais e calculadoras no site do Level(s).

### 3. A importância do Carbono Incorporado

A ACV avalia diversos indicadores, mas o PAG é frequentemente o foco do estudo, e é incluído no Macro Objetivo 1 da Level(s). A vantagem do estudo do PAG no ciclo de vida é que engloba os efeitos imediatos e diferidos do objeto de estudo, permitindo alinhar as escolhas presentes com as suas consequências nas próximas décadas. As maiores dificuldades são a relativa complexidade, e o facto de desconhecermos os cenários climáticos, sociais, económicos e energéticos nas próximas décadas. A consideração do PAG global, ou seja, de todo o ciclo de vida do edifício, evita consequências indesejadas de estratégias parciais. Por exemplo, a instalação de vidros triplos num determinado edifício poderá torná-lo mais eficiente energeticamente. Contudo, as emissões causadas pelo fabrico, transporte, instalação e tratamento em fim de vida destes vidros podem ser maiores que as emissões evitadas pelo menor consumo energético.

Os gráficos da Figura 20 ilustram este balanço. No lado esquerdo podemos observar como a maior eficiência energética – conseguida à custa do uso de mais materiais, na sua maioria poluentes – baixou as emissões operacionais (maioritariamente ventilação, climatização, iluminação, etc.). Como consequência, as emissões associadas à construção – Carbono Incorporado – aumentaram em termos absolutos e relativos. No lado direito observamos como as emissões são abruptas na construção e renovação, sendo graduais durante o uso. Os gráficos não espelham um fator importante, que é o tempo de vida do edifício. Se este for estendido devido à e capacidade de adaptação, durabilidade de uso e bom estado de conservação, as emissões embebidas são amortizadas por maior período.



**Figura 20**  
 Relevância do Carbono Incorporado no ciclo de vida. (Fonte: Röck et. Embodied GHG emissions of buildings– The hidden challenge for effective climate change mitigation, 2022)

#### 4. A importância do Carbono Incorporado em Contexto Insular Açoriano

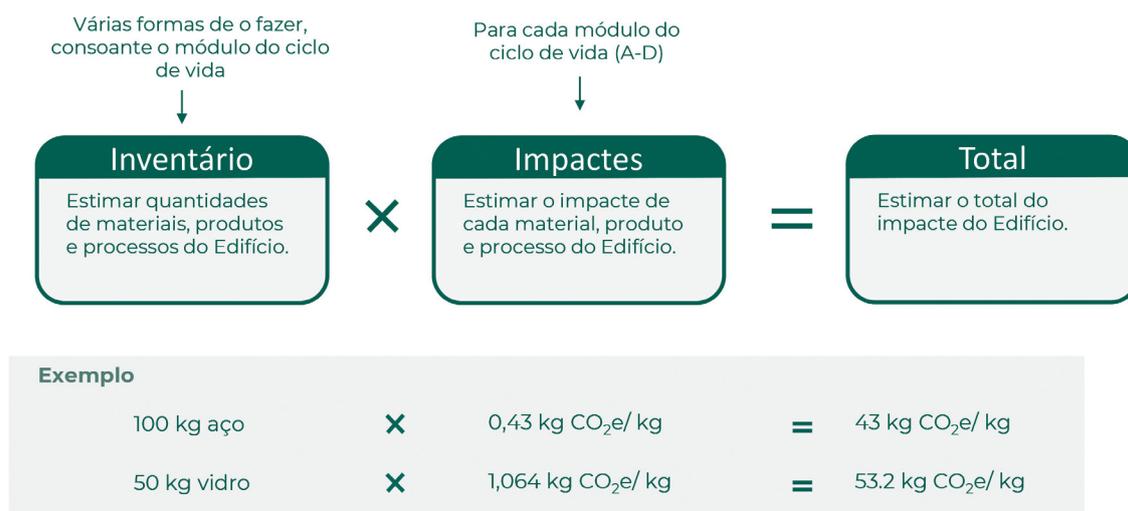
A baixa amplitude térmica, elevada pluviosidade e humidade relativa prevalentes nos Açores implicam baixas necessidades de aquecimento e arrefecimento e por isso menor consumo de energia em fase de operação, onde os consumos advêm maioritariamente da climatização. Contudo, a elevada humidade relativa está diretamente relacionada com condensações e bolores, afetando a qualidade do ar e a durabilidade das construções, sendo necessária implementar medidas de ventilação e de tratamento do ar. Por outro lado, a humidade reduz o tempo de vida dos materiais, implicando renovações mais frequentes a que estão associados picos de carbono incorporado na fase de uso. Já o uso de materiais e produtos não endógenos como o cimento e aço aumenta as emissões devido ao transporte marítimo de longa distância.

Finalmente, cada ilha tem um *mix* energético diferente e em evolução, o que vai ter implicações nas emissões operacionais e nas emissões associadas à produção de materiais endógenos.

#### 5. Metodologias de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

Para a ACV de um edifício ou infraestrutura, são recolhidas as quantidades de materiais, produtos e processos que formam um Inventário ou Mapa de Quantidades e Processos, semelhante ao Mapa de Quantidades de Trabalhos que integra um Projeto de Execução. Essas quantidades são multiplicadas pelo impacte ambiental de cada produto e processos. Os resultados são, então, somados para obter os impactes ambientais globais do edifício ou infraestrutura (Figura 21).

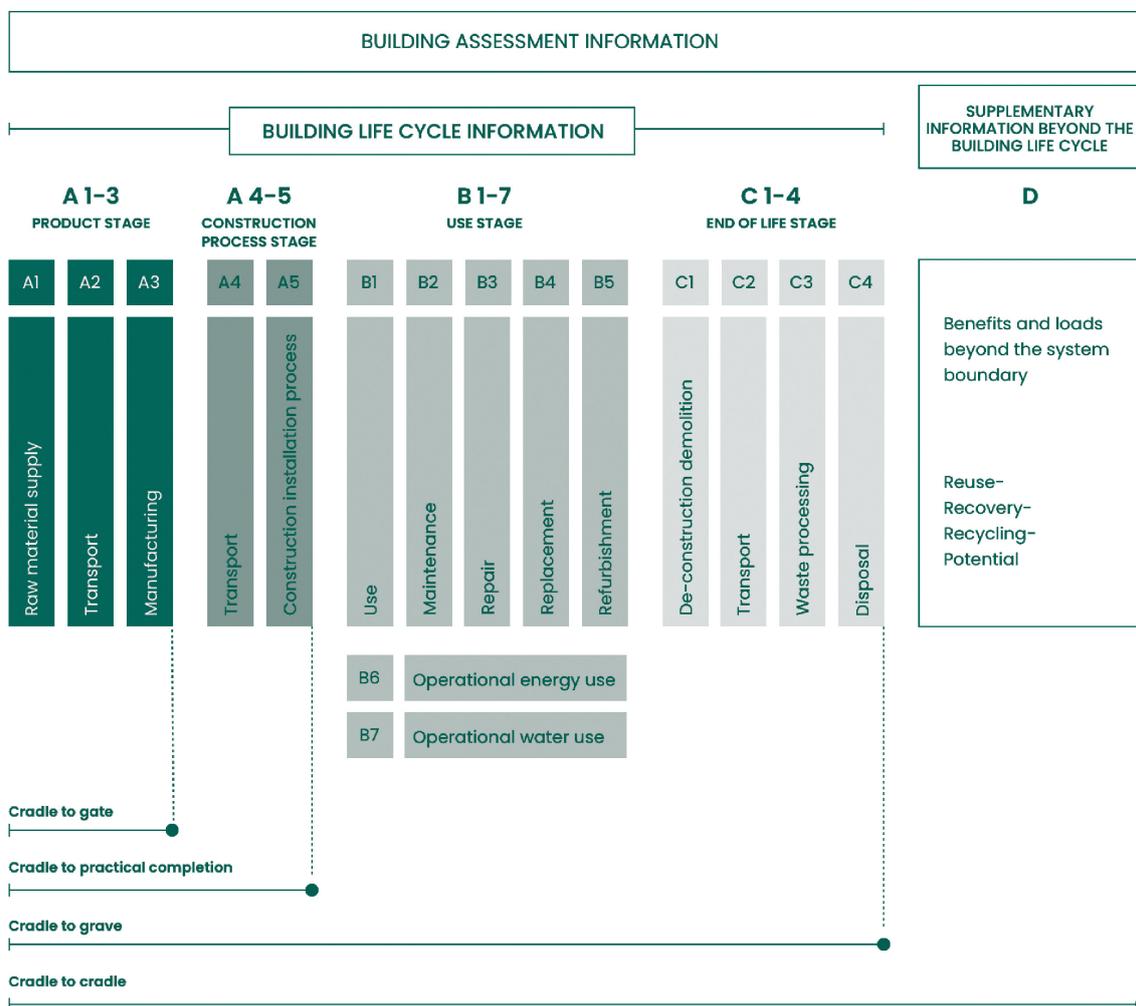
A consolidação do Inventário, devido à sua extensão, apresenta uma complexidade considerável, assim como a coleta de dados sobre os impactes ambientais associados, e exige uma colaboração estreita entre projetistas, construtores e fabricantes.



**Figura 21**

Exemplo simplificado do processo de cálculo da ACV. (Fonte: *Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide*).

Para cada fase do ciclo de vida – representadas na Figura 22 – temos estratégias diversas para a recolha do inventário.



**Figura 22**  
Fases do ciclo de vida de um edifício de acordo com a EN 15804 e ISO 21930. (Fonte: *Ebook - OneClick LCA*).

A Fase de Produção [A1-3] lida com as emissões de carbono que decorrem dos processos de extração de matérias-primas, transporte e fabricação. Estes dados devem ser recolhidos de bases de dados ACV de fontes recomendadas<sup>1</sup>, e sempre que possível enquadrando-se no contexto geográfico. Esta é a parcela mais relevante na maioria dos casos.

O Transporte deve incluir todas as etapas do trajeto dos produtos e materiais da fábrica até à obra [A4] e também o transporte de resíduos de desmontagem e demolição no fim de vida do edifício para o local apropriado de descarte, incluindo quaisquer estações intermediárias [C2]. Os fatores que influenciam as emissões devidas ao Transporte são a quantidade de material a transportar, a distância e o fator de carbono associado ao tipo de transporte. Esta parcela pode adquirir um peso maior em locais remotos com poucos recursos próprios, e deve ser considerada quando se compram materiais de origens distantes.

<sup>1</sup> Level(s). Indicator 1.2 Indicative list of LCA software and databases for use with indicator 2021-07-08

A fase de Construção [A5] respeita às emissões decorrentes de quaisquer atividades relacionadas à construção no local ou fora dele, incluindo resíduos. Portanto, é calculado com base no consumo energético da operação a realizar e na quantidade de desperdício de material.

Na fase de uso [B1], este critério considera as emissões carbono libertadas e absorvidas pelos elementos de construção durante o uso. Inclui, por exemplo, a reabsorção de CO<sub>2</sub> pela cal e cimento através da carbonatação, ou crescimento vegetal na obra.

As fases de Manutenção e Reparação [B2] e [B3] incluem os processos de manutenção e reparação de sistemas técnicos, produtos e materiais.

Na fase de Substituição [B4] contabilizam-se as emissões relacionadas com a substituição prevista dos sistemas, produtos e materiais de construção. Estimativas para as vidas úteis dos materiais podem ser encontradas no *Level(s) User Manual 3: Indicator 2.1* e são um fator a considerar no projeto.

A fase de Reabilitação [B5], é contabilizada quando existe uma alteração planeada nas características físicas e/ou no desempenho da construção (por exemplo, na ampliação e na alteração de uso), considerando os impactos [A1-5] e os ajustes correspondentes nos módulos B, C e D.

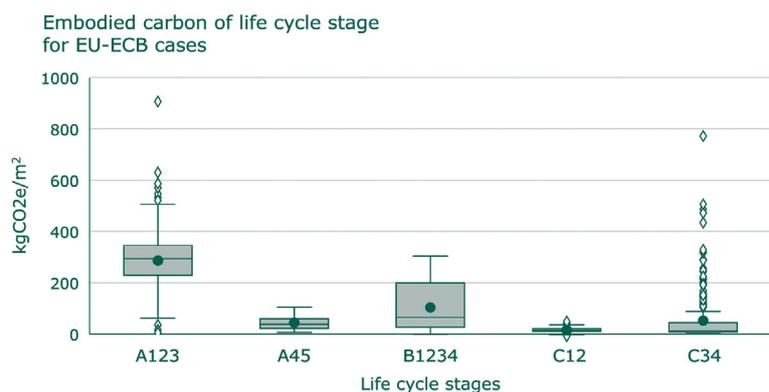
A fase de Desconstrução e Demolição [C1] abrange todas as atividades no local necessárias para desconstruir e/ou demolir o ativo. É calculado de forma semelhante à fase [A5].

É necessário definir cenários de fim de vida para cada produto/material para o cálculo das fases de Processamento de resíduos [C3] e Descarte [C4]. Exemplos de cenários de fim de vida de produtos são a Reutilização, a Reciclagem e a Incineração ou Aterro.

Finalmente a fase [D] abrange quaisquer benefícios decorrentes da reutilização/reciclagem de elementos descartados do ativo construído, ou energia recuperada a partir deles para além do ciclo de vida do projeto. Capta emissões evitadas (ou cargas potenciais) resultantes.

## 6. Contribuição de cada fase de ciclo de vida

Ao analisar o contributo das emissões de carbono incorporado ao longo do ciclo de vida do edifício, conforme ilustrado na Figura 23, identifica-se que sensivelmente metade advém da fase de produção (A1-3), com um valor médio de cerca de 300 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Quase um quarto ocorre durante a fase de uso (B1-4), com um valor médio de cerca de 120 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>, revelando a importância da escolha de materiais de baixo impacto ambiental e a otimização do seu uso. Cabe ao projetista definir estratégias que minimizam o volume de material necessário sem comprometer a exigências programáticas e técnicas do edifício, como o conforto térmico passivo.



	Production stage	Construction process	Use stage	End of life stage NL	
	A1-3	A4-5	B1-4	C1-2	C3-4
Absolute (mean)	300	40	120	20	60
Relative (mean)	56%	7%	22%	4%	11%

**Figura 23**  
Distribuição do Carbono Incorporado por fase do ciclo de vida. (Fonte: Report - Towards embodied carbon benchmarks for iin Europe #2 Setting the baseline: A bottom-up approach).

### 7. Dados de ACV

É necessário considerar dados de diferentes fontes e precisão para cada fase de um projeto, conforme demonstrado na Figura 24.

Típos de data	Des.	Conceptual	Licenciamento	Execução	Construção	Uso	Fim-de vida
<b>Dados Genéricos</b>	Dados para um tipo de componente, produto e/ou material	X	X	O	O	O	O
<b>Dados médios</b>	Média de dados de diferentes produtores para o mesmo material ou produto.	X	X	X	X	X	X
<b>Dados específicos</b>	Dados de um produto ou material de um produtor específico (DAP)	O	X	X	X	X	X
<b>Dados reais</b>	Dados recolhidos diretamente no local				X	X	X

**(X)** preferível **(O)** alternativo

**Figura 24**

Tipos de dados de potencial de aquecimento global de materiais e produtos em cada fase do ciclo de vida (Fonte: Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide).

Nas fases iniciais de projeto, em que as marcas e tipos de produtos e materiais ainda não estão definidos, é aconselhado o uso de dados genéricos ou médios. À medida que o projeto avança e a informação específica se torna disponível, é recomendável recorrer a dados específicos, recolhidos nas Declarações Ambientais de Produto (DAP).

As DAP são elaboradas pelos produtores e fornecem informações ambientais quantificadas sobre o ciclo de vida de um produto. Seguem padrões como as Normas ISO 14040, ISO

14044 e, geralmente, a EN 15804 nos países europeus. Em Portugal, o único banco de DAP disponível é o dapHabitat., disponibilizado pela Plataforma para a Construção Sustentável. Nos últimos anos, tem-se observado uma tendência crescente na publicação de DAP por parte dos fabricantes europeus de produtos de construção, o que é essencial para assegurar disponibilidade e qualidade de dados. Trabalha-se também sobre a disponibilização da informação sobre os produtos de construção em plataformas eletrônicas *machine-readable*. No site <https://pdts.pt/> podem-se consultar Data Templates de produtos da construção nacionais, que no futuro poderão obviar este problema.

## 8. Desafios da ACV: Precisão vs. Impacte no Projeto

A ACV é um processo moroso que exige experiência para realizar suposições informadas. As simplificações são necessárias, mas se mal orientadas comprometem a precisão e mesmo a validade das conclusões.

Já foi realçado que à indefinição inicial nos vários aspetos do edifício está associada grande incerteza no cálculo dos impactos. Por outro lado, com a maior definição, a capacidade de tomar decisões diminui e o seu custo aumenta. O mesmo raciocínio é válido para o estado do conhecimento atual. Apesar de ainda nos faltarem ferramentas e dados com a precisão desejada, não podemos hoje adiar escolhas que vão ter consequências nas próximas décadas.

O uso de dados genéricos ou médios de ACV pode não ser totalmente representativo no contexto português e insular, o que pode afetar a precisão das análises. A falta de dados específicos de ACV sobre materiais e atividades de construção que representam o contexto europeu, nacional e regional é uma limitação. Em dezembro de 2023 apenas existem 42 DAP disponíveis na plataforma nacional [dapabitat.pt](http://dapabitat.pt) e os seus valores não são *machine-readable*, o que implica a leitura por um humano de cada DAP para extrair os valores.

É crucial reconhecer que o objetivo da ACV, especialmente nas fases iniciais de um projeto, não é quantificar de forma precisa os impactes de cada solução. Em vez disso, a ACV visa informar se uma opção de projeto é preferível a outra, proporcionando uma comparação e orientando decisões com base em considerações ambientais objetivas.

## 9. Ferramentas baseadas em BIM

A metodologia BIM (Building Information Modeling) está a ser adotada no projeto, construção e operação dos edifícios. Os modelos BIM têm vantagens sobre o desenho tradicional: reduzem os erros de desenho e compatibilização, permitem compatibilizar as especialidades no espaço e no tempo e permitem a gestão automática das quantidades de materiais e produtos. Esta última capacidade agiliza o processo de ACV.

Existem diversos softwares de ACV baseados em BIM capazes de fornecer resultados rápidos e confiáveis, mas exigem que desde o início do projeto se respeitem regras de modelação e requisitos de informação geométrica e não-geométrica. A Level(s) indica uma lista de ferramentas recomendadas como o plug-in Tally para Autodesk Revit®, desenvolvido pela KT Innovations e Autodesk ou a aplicação OneClick LCA, desenvolvida pela Bionova Ltd, Finlândia.

Para as fases preliminares de um projeto, existem ferramentas úteis no apoio à tomada de decisão, capazes de estimar as quantidades e o PAG com base em parâmetros como o sistema construtivo, a área bruta e de implantação, número de pisos acima e abaixo do terreno e a razão de área envidraçada. O FCBS Carbon (gratuito) e o Carbon Designer 3D são exemplos dessas ferramentas.

## 10. Impacte dos Materiais

Um edifício é constituído por uma grande variedade de materiais e produtos que constituem a estrutura, divisórias, revestimentos, equipamentos, redes e sistemas e mobiliários. O maior impacte ambiental inicial vem dos materiais estruturais - aço, betão - e dos constituintes de paredes interiores e exteriores - blocos cerâmicos e cimentícios e gesso laminado, que têm pegadas unitárias significativas e são usados em grandes quantidades.

O fabrico do cimento, o aço e outros metais e a cerâmica exige grandes quantidades de energia, maioritariamente de origem fóssil, em especial no caso do cimento e dos produtos cerâmicos. Além do gasto de energia, os processos químicos de fabrico do cimento e do aço libertam dióxido de carbono que são parcialmente recuperados pela absorção de CO<sub>2</sub> - a carbonatação do betão - que ocorre muito lentamente.

Podemos compreender os impactos absolutos e relativos dos materiais em <https://www.materialepyramiden.dk> onde para além do impacte de cada material por metro cúbico podemos detalhar a forma como é aplicado: em peças volumosas no caso do betão, em camadas mais ou menos espessas, no caso de paredes, isolamentos e revestimentos.

Materiais renováveis, como a madeira e o bambu podem cumprir funções estruturais, de separação e revestimento e capturam carbono da atmosfera e do solo. Este carbono é capturado de forma mais intensa na fase de crescimento e é libertado, ou não, no destino final da peça: incineração ou depósito em aterro, ou reutilização ou reciclagem. O debate sobre o carbono biogénico é aceso e em evolução, mas não há dúvida de que a captura e armazenagem de carbono na madeira, mesmo que por décadas, é mais sustentável que a emissão imediata associada ao cimento e metais.

É também imperativo aumentar a eficiência do uso dos materiais. As lajes são responsáveis por grande parte da massa dos edifícios. Lajes pesadas exigem não só mais material, mas também fundações mais fortes e profundas. Edifícios muito altos exigem também fundações mais fortes, mas também sistemas de ventilação, transporte vertical de pessoas e água, com maior impacte inicial e diferido.

Enquanto para a superestrutura a madeira é cada vez mais viável, as partes enterradas dos edifícios continuam a exigir paredes de betão armado e lajes de soleira, sendo por isso especialmente danosas.

## 11. Design para a Adaptabilidade e Desmontabilidade

Estender o tempo de vida do edifício, materiais e componentes é a forma mais eficiente de baixar o seu impacte, e pode ser conseguida por dois caminhos. Por um lado, pode-se prolongar a vida útil do que já está construído, evitando a nova construção através da

reabilitação e renovação de edifícios existentes para responder às necessidades atuais. Por outro lado, quando é necessário construir, podemos incorporar materiais de edifícios existentes, dando-lhes uma nova vida, e devemos pensar como os novos edifícios e os seus componentes podem também cumprir várias “vidas” para além da imediata.

Sendo difícil projetar e contruir para necessidades das gerações futuras, podemos construir edifícios com capacidade de adaptação através do princípio de *Shearing Layers* do arquiteto Frank Duffy (Cheshire, 2019). Este princípio considera que o edifício é constituído por seis camadas com funções e durações independentes: o Local, a Estrutura, a Pele ou Envelope, os Serviços, o Espaço e as Coisas. Deverá, por exemplo, ser possível mudar o Espaço (alterando divisórias) sem afetar os Sistemas (redes e iluminação) ou a Estrutura; ou melhorar a fachada ou cobertura (Pele) sem alterar a Estrutura e os Sistemas.

A Desmontabilidade suporta-se na separação dos elementos construtivos sem os danificar para reutilização e está também relacionada com o conceito *Shearing Layers*. Implica uma conceção e projeto que preveem sistemas de união reversíveis, e componentes modulares e padronizadas. A construção nacional tende a usar vãos “à medida”, uniões irreversíveis com colas, silicone, cimento-cola e pregagem, ou tetos e paredes em gesso cartonado não desmontável. Em consequência, estes elementos são destruídos na desmontagem e têm como fim de vida o aterro ou incineração. Gradualmente surgem produtos de construção que permitem maior reutilização.

Eventos dos últimos anos como a pandemia COVID-19, a crise de habitação ou as alterações climáticas forçaram a sociedade a dar mais ênfase ao conceito de Adaptabilidade na construção. A metodologia Level(s) indica (User Manual Indicador 2.3) um sistema de classificação para edifícios de serviços com pistas importantes ao nível da flexibilidade espacial associada à superestrutura, pé-direito, métrica da fachada e divisórias, redundância de acessos; facilidade de renovação e alteração das redes (sendo de evitar embê-los no chão e paredes); e expansão do edifício na vertical e horizontal com ou sem reforço estrutural, que pode estar previsto no projeto inicial.

### Referências bibliográficas

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Disponível em [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf).

Carbon Leadership Forum. (2019). Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide. Universidade de Washington. <http://hdl.handle.net/1773/41885>.

Cheshire, D. (2019). Building Revolutions: Applying the Circular Economy to the Built Environment. Routledge.

Heisel, F., Hebel, D. E. (2022). Building Better - Less - Different. Circular Construction and Circular Economy. Birkhäuser, Basel.

Hillebrandt, A. et al. (2019). Manual of Recycling. Buildings as sources of materials. DETAIL.

Sturgis, S. (2023). Whole life assessment for the built environment. 2ª edição. Royal Institution of Chartered Surveyors. Disponível em <https://www.rics.org/profession-standards/rics-standards-and-guidance/sector-standards/construction-standards/whole-life-carbon-assessment>.

TU Delft (2023). Open Course on Circular Economy for a Sustainable Built Environment. Disponível em <https://ocw.tudelft.nl/courses/circular-economy-for-a-sustainable-built-environment/>.