

# Materiais de Construção e o Meio Ambiente

Vanderley M. John

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

## Sumário

4.1	Introdução.....	2
4.2	Recursos naturais, o fluxo dos materiais e o ambiente.....	3
4.3	Consumo de energia .....	6
4.4	Mudança climática e materiais de construção.....	8
4.5	Resíduos e a construção.....	10
4.6	Água .....	13
4.7	Riscos associados ao uso de materiais.....	15
4.8	Compostos orgânicos voláteis .....	16
4.9	Contaminação das águas e do solo por lixiviação .....	19
4.10	Outros impactos.....	21
4.11	Avaliação do Ciclo de Vida dos materiais de construção .....	22
4.11.1	Entendendo o conceito da ACV .....	23
4.11.2	As dificuldades práticas e a necessidade de ACV simplificada .....	27
4.11.3	ACV modular – uma proposta de simplificação .....	32
4.12	Selos, certificados ambientais versus declarações ambientais de produto .....	34
4.13	Agradecimentos .....	34
4.14	Referências.....	35

*Versão editada de capítulo a ser publicado no livro:*

*V. M. John **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais** G Isaia, editor. IBRACON 2017.*

## 4.1 Introdução

Em apenas 250 anos, a sociedade industrial dobrou a expectativa de vida do ser humano, multiplicando por seis a população do planeta. Este feito é resultado do desenvolvimento técnico-científico que gerou um complexo industrial, dependente de fluxo constante e crescente de materiais, que vai da extração de recursos naturais não renováveis, sua transformação em materiais que, ao final da via útil, irão se somar aos resíduos gerados em cada etapa do processo. Atualmente este consumo já ultrapassa 10 t/hab.ano. A participação da cadeia produtiva da construção civil neste processo vem crescendo rapidamente, representando, atualmente, mais da metade do total. Diferentemente dos nossos antepassados, boa parte dos materiais que utilizamos são artificiais, oriundos da transformação de matérias-primas naturais. O acúmulo destes materiais artificiais na biosfera – particularmente materiais “pétreos” cimentícios e derivados da fissão nuclear - levou recentemente cientistas a proporem o reconhecimento de que estamos em uma nova era geológica, o **antropoceno** (WATERS et al., 2016).

Os impactos ambientais dessas atividades industriais, imprescindíveis à manutenção da vida da população humana na Terra, são hoje solidamente documentados. A manutenção da produção industrial nos padrões atuais é insustentável no médio e longo prazo, apesar de 45% da humanidade permanecer pobre e pouco participar dos benefícios ou contribuir para os problemas ambientais. Mantidas as tecnologias atuais, as metas de redução da pobreza implicarão em significativo crescimento destes impactos, agravando a crise ambiental. Em consequência, novas soluções de menor impacto ambiental, com desempenho técnico melhor ou igual às existentes, e que sejam economicamente viáveis precisam ser desenvolvidas. As atividades de pesquisa e desenvolvimento destas inovações deverá ser o centro da carreira dos melhores e, possivelmente, mais bem pagos engenheiros e arquitetos das próximas gerações. Os materiais do futuro serão novos produtos ou versões aperfeiçoadas dos que usamos hoje. Mesmo os projetos de engenharia mais simples irão incluir uma avaliação quantitativa do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida e uma demonstração dos esforços de minimização destes impactos.

A recente aprovação da Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC (Lei Nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009) e da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) demonstra que esta discussão amadureceu na sociedade. Elas criam incentivos para que as empresas busquem solucionar os problemas relacionados ao meio ambiente. A capacidade de gerir e reduzir os impactos ambientais dos projetos será cada vez mais parte das atividades diárias de todos os engenheiros e arquitetos e um fator determinante do sucesso profissional. Como os cursos de engenharia e arquitetura ainda não refletem esta tendência, e como a compreensão destes problemas avança rapidamente, a formação continuada será parte do dia a dia dos futuros profissionais.

Este capítulo pretende introduzir à temática do impacto do ciclo de vida dos materiais no meio ambiente, apresentando os conceitos e fatos já estabelecidos, lacunas do conhecimento e as tendências atuais. Ele passa ao largo do tema *green buildings* que tem sido apresentado como a solução para os problemas ambientais da construção, pois não existem evidências e não é razoável esperar que alguns poucos edifícios sofisticados possam alterar o desempenho ambiental daquele que é o maior setor industrial. Também não aborda os impactos na sociedade e na economia, dimensões do desenvolvimento sustentável que relevantes na atividade profissional. Espera-se tornar evidente que nosso futuro depende do esforço de cada um de nós, e em especial dos engenheiros e arquitetos, em cada uma de suas atividades, incluindo o mais simples dos projetos.

Sem esgotar o tema, serão apresentados os conceitos e ferramentas que podem ser utilizados para analisar e mitigar estes impactos. Não é objetivo deste capítulo apresentar em detalhes o impacto ambiental de cada um dos materiais de construção em particular. Discussões sobre materiais específicos são apenas os exemplos com os quais o autor está mais familiarizado. Tampouco serão discutidos os

importantes impactos sociais e econômicos da produção de materiais de construção.

O capítulo inicia discutindo as implicações ambientais do fluxo dos materiais de construção na economia e suas implicações para a principal fonte dos problemas ambientais por eles causados: a escala de produção, que pode ser adequadamente analisada pela ferramenta de fluxo de materiais.

Assim, boa parte do capítulo está dedicada à Avaliação do Ciclo de Vida<sup>1</sup>, metodologia que ainda é pouco conhecida no Brasil, particularmente pelos engenheiros civis, e aos temas lixiviação e teor de compostos voláteis e que permitem medir impactos ambientais na fase de uso. Em ambos os aspectos foram observados avanços desde a edição anterior deste livro.

Não existe material de construção que não cause impacto ambiental. Cabe ao técnico selecionar para cada situação o material que permita cumprir a função requerida com o mínimo impacto ambiental e que, simultaneamente, garanta o desempenho técnico adequado, seja viável economicamente e satisfaça os requisitos estéticos.

## 4.2 Recursos naturais, o fluxo dos materiais e o ambiente

Nenhuma atividade humana é realizada sem o suporte de um ambiente construído com materiais. Em consequência os materiais de construção são ubíquos e, por esta razão, não são percebidos pelo nosso consciente no dia a dia. Mas para engenheiros e arquitetos, os materiais constituem a essência da cadeia de valor.

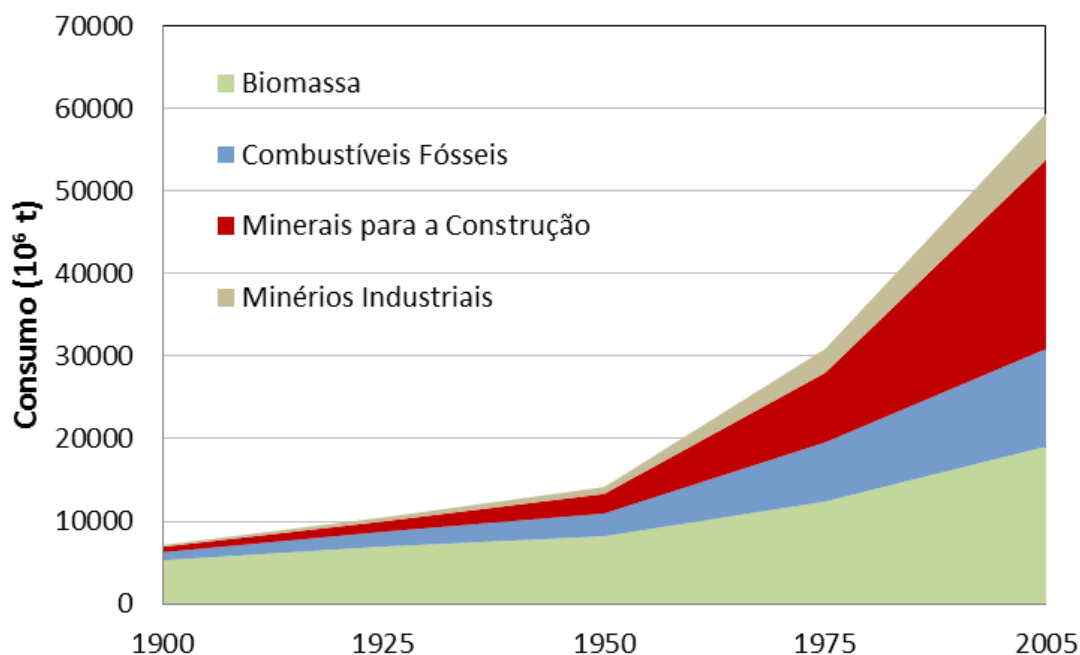
O conforto, a crescente longevidade dos seres humanos e a atividade econômica são sustentados por um fluxo exponencialmente crescente de materiais extraídos da natureza (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004). Estima-se que, no século XX, a população do planeta tenha quadruplicado, enquanto a demanda por recursos naturais cresceu 8 vezes e o PIB, 20 vezes (KRAUSMANN et al., 2009). Estima-se que em 2004 foram extraídos pouco menos de 60Gt de materiais, e atualmente esta extração supere 75Gt/ano, cerca de 10 t/hab.ano (KRAUSMANN et al., 2009). Estes valores incluem os resíduos de mineração e industriais gerados, bem como as eventuais perdas de massa durante processos de calcinação. É certo que todos os materiais comercializados também se tornarão resíduos: uma parte durante o transporte, estoque e a construção e o restante ao final da sua vida útil. Esta crescente demanda tem sido associada às crescentes pressões socioambientais, incluindo o avanço da mineração em áreas de interesse ambiental ou paisagístico, o acúmulo de resíduos, e até a escassez localizada de recursos naturais em concentração ou localização economicamente atrativa. Em consequência, crescem os conflitos, o que vem tornando a produção e emprego de materiais e a gestão de seus resíduos uma atividade cada vez complexa.

O consumo de minerais de construção, rochas naturais, agregados, minérios para produção de cimento e cerâmica tem crescido mais rapidamente que a demanda global de materiais, e atualmente, já representa algo em torno de 40% do total extraído (Figura 1). Mas a indústria da construção como um todo também consome outros materiais, como a biomassa, tanto para combustível como madeira para a construção, os metais – cerca de 56% do aço (ALLWOOD et al., 2011), o metal mais produzido – e os combustíveis. Assim, é razoável estimar que a construção é responsável por mais de 50% dos recursos naturais extraídos no planeta. A quase totalidade dos materiais utilizados é não renovável.

---

<sup>1</sup> De acordo com a Norma ISO 14040: "A Análise de Ciclo de Vida é uma técnica para determinar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto: juntando um inventário de todas as entradas e saídas relevantes do sistema, avaliando os impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas, e interpretando os resultados das fases de inventário e impacto em relação com os objetivos de estudo". Ver mais detalhes sobre este tema no item 4.8 deste capítulo

Figura 1 – Evolução da demanda global por recursos naturais e a distribuição entre diferentes tipos de materiais no século XX



Fonte: KRAUSMANN et al. (2009)

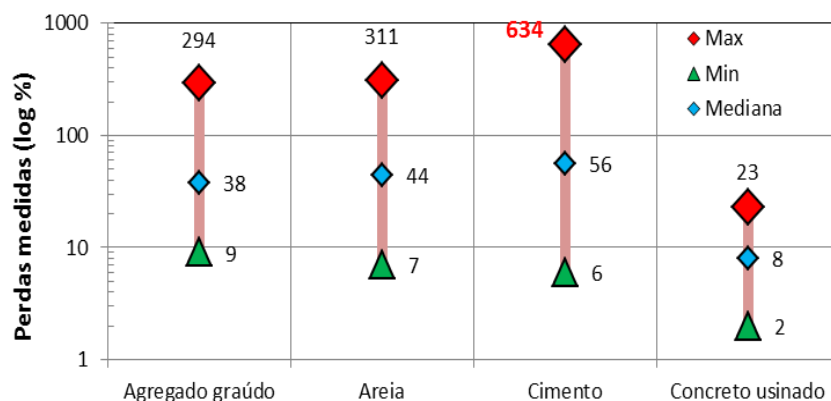
Materiais cimentícios – cimento, agregados e energéticos - são a maior parte da demanda de materiais. Considerando apenas os materiais comercializados, os produtos à base de cimento Portland provavelmente representam 17Gt/ano, enquanto cerâmica e madeira (esta em parte transformada em combustível), 2Gt cada e aço, 1Gt (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). Esse resultado não é surpreendente: edifícios de todos os tipos e sistemas de água e esgoto formando cidades, conectadas por rodovias, aeroportos, pontes e ferrovias e alimentadas por adutoras e barragens, muros que separam vizinhos e países, etc. são feitos de materiais de construção. O surpreendente é que as grandes obras, as únicas para as quais se realizam estudos de impacto ambiental, consomem parcela insignificante dos materiais. Os edifícios, obras via de regra triviais, consomem 85% dos materiais e a pavimentação para ruas e rodovias, 14% (SCHANDL et al., 2016). O crescimento sustentado no uso dos recursos naturais tem levado, a nível internacional, a crescente discussão de políticas públicas que induzam um aumento da produtividade e eficiência do uso destes recursos (OECD, 2008; SCHANDL et al., 2016). Fora da indústria da construção civil, já é possível observar claramente os resultados da adoção de estratégias de desmaterialização<sup>2</sup>. É razoável esperar que, no futuro próximo, o setor venha a ser progressivamente pressionado a aumentar a eficiência do uso de recursos. A tarefa não será fácil, pois existem limites para a redução do tamanho do ambiente construído.

Uma parte significativa do consumo de recursos decorre de perdas ao longo da cadeia de valor, particularmente, durante atividade de construção, seja na forma de resíduos do processo, seja na forma de excesso de materiais incorporado na obra, em peças de dimensão superior ao necessário. As perdas na construção foram, detalhadamente, estimadas para obras de edifícios de múltiplos pavimentos, geridas por construtoras e seus engenheiros e os números revelados mostram a extensão do problema na ocasião (Fonte: a partir de dados de ). As melhores construtoras apresentam, atualmente, perdas significativamente inferiores, pois adotaram medidas de gestão. Mas não existem evidências que estas

<sup>2</sup> A desmaterialização implica na redução da quantidade de materiais e energia utilizada ao longo do ciclo de vida do produto.

medidas se tornaram o padrão do mercado em geral. Mesmo considerando o ganho de mercado de produtos industrializados como concreto e argamassas, o problema continua bastante importante. A redução destas perdas depende, fundamentalmente, de melhorias de gestão e de um maior grau de industrialização (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016; SOUZA et al., 1998), particularmente, dos materiais minerais a serem preparados em obra – cimento e agregados.

Figura 2 – Perdas medidas em canteiros de obras de edifícios brasileiros, na segunda metade dos anos 90, por uma rede de universidades brasileiras.



Fonte: a partir de dados de SOUZA et al. (1998)

A indústria de materiais de construção recicla grande quantidade de resíduos de outras indústrias – escória de alto forno, cinzas volantes e sucata de aço, são exemplos (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). Porém, a taxa de reciclagem dos resíduos da construção é baixa mesmo em países desenvolvidos, sendo ainda desprezível no Brasil. Embora o baixo valor agregado dos materiais de construção e a sua natureza de material composto coloquem uma dificuldade adicional, é necessário reconhecer que sem um aumento substancial na taxa de reciclagem, o setor continuará fortemente dependente dos recursos naturais e, portanto, vulnerável. Pressões sociais e ambientais contra a abertura de mineração, em especial, quando próxima dos grandes centros urbanos, já se tornaram comuns.

É frequente o argumento de que a maior parte dos materiais de construção tem baixo impacto ambiental específico - por tonelada produzida. O problema é a escala: um pequeno impacto ambiental específico (extração de areia, britagem), quando multiplicado por  $10^9$ , resulta em um valor significativo. Desmaterialização estará certamente na agenda tecnológica da construção do futuro, até porque reduz a geração de resíduos e facilita a mecanização o aumento da produtividade, imperativos em uma sociedade que envelhece rapidamente.

Outro argumento é que usamos materiais abundantes. Ocorre que para os materiais de baixo custo, o que importa é a disponibilidade local, com custo e impacto de logística baixo (HABERT et al., 2010). É amplamente reconhecido o fato de que areia adequada para atividades industriais está em falta em vários locais do mundo (BEISER, 2015). A areia, e até a argila plástica adequada para cerâmica, já estão escassos em locais próximos de muitas das grandes metrópoles e, até mesmo, de médias cidades brasileiras. Até a madeira, único material potencialmente renovável, se esgota: as reservas da nossa única conífera nacional, o Pinheiro do Paraná, foram esgotadas em menos de 50 anos. A destruição da Amazônia, parece ter retomado seu ritmo tradicional após um breve período de recuo. Em consequência, aumentam a distância de transporte e os impactos ambientais associados, além do custo, sempre relevante.

A desmaterialização exige diminuir a intensidade<sup>3</sup> de uso de materiais pelas construções, reduzindo as

<sup>3</sup> Intensidade de materiais pode ser medida como a quantidade de materiais por  $m^2$  de área construída, incluídas as perdas, © V.M. JOHN, USP (2017)

pressões no ambiente natural. A redução das perdas de materiais, associadas tanto a questões de qualidade e grau de industrialização, quanto a questões gerenciais da obra são partes da estratégia de desmaterialização. A seleção do material mais adequado para cada solicitação (mecânica, ambiental, necessidade do usuário) é outra ferramenta de desmaterialização. Mas certamente o tema exigirá da engenharia o desenvolvimento de soluções inovadoras de materiais e de projeto.

O incentivo ao uso de biomassa – madeira e outros produtos da fotossíntese – fontes únicas de material renovável – tem sido apontado como uma alternativa. No Brasil, o uso de madeira como material de construção é relativamente pequeno, tendo sido estimado que, em 2011, tenham sido utilizados no mercado interno 5,5 Mm<sup>3</sup> (~4Mt) de madeira nativa e cerca de 50 Mm<sup>3</sup> (~25Mt) de madeira plantada<sup>4</sup>. Deste total, somente uma pequena parte foi utilizada em aplicações estruturais (PUNHAGUI, 2014). O consumo de madeira, certamente, poderia ser ampliado. Por outro lado, é preciso reconhecer que a maior parte da madeira amazônica não pode ser considerada renovável, pois a sua extração não permite que a floresta se recupere. Este problema inclui, até mesmo madeira de florestas manejadas de acordo com as leis brasileiras (NUMAZAWA et al., 2017). Assim, parece mais razoável promover o uso da madeira plantada, que já dispõe de maior estrutura produtiva disseminada no país. Em muitas aplicações, esse tipo de madeira requer proteção com biocidas para garantir vida útil de projeto mínima. Infelizmente, o tratamento transforma os resíduos de madeira em um problema ambiental (CBCS - COMITÊ DE MATERIAIS, 2009).

Soluções de construção mais durável podem também reduzir a demanda de materiais necessária para repor aqueles que encerram sua vida útil. Medidas de projeto capazes de proteger os materiais dos fatores de degradação, maximizando a vida útil em cada projeto, exigem conhecimentos ainda pouco disseminados entre engenheiros e arquitetos. Estas medidas podem se tornar ainda mais atrativas se associadas a tecnologias que permitam a desconstrução e o reaproveitamento dos componentes.

Dada a grande demanda de materiais de construção, a limitação da oferta escalável e a composição química do planeta, na prática, o setor não tem como dispensar os principais materiais que hoje utiliza, exceto se representem perigo à saúde. Neste cenário, o fundamental é selecionar os processos e fabricantes mais ecoeficientes e selecionar, para cada função e projeto, os materiais que apresentem melhores resultados. **As recorrentes comparações dos impactos ambientais de diferentes materiais (madeira x aço x concreto x alvenaria) não passam de estratégias de marketing vazias de conteúdo.** Servem apenas para esconder problemas e esconder as reais oportunidades de melhoria. Seguiremos precisando de todos os materiais, só que produzidos e utilizados de forma mais segura e ecoeficiente.

### 4.3 Consumo de energia

A geração de energia requer vultosos recursos econômicos e causa sempre impactos ambientais relevantes, razões pelas quais todos os países possuem programas de economia de energia, similares ao brasileiro Procel. O setor da construção e seus produtos (edifícios, iluminação pública e materiais) são responsáveis por algo entre 20 e 25% da energia consumida no país, o que representa um grande potencial de mitigação da engenharia civil e seus fornecedores.

O processo de produção de quase todos os materiais inorgânicos, como cerâmica, cimento, aço, gesso, envolve calcinação<sup>5</sup>. Boa parte da madeira, requer secagem. A energia térmica é, na maioria das vezes,

---

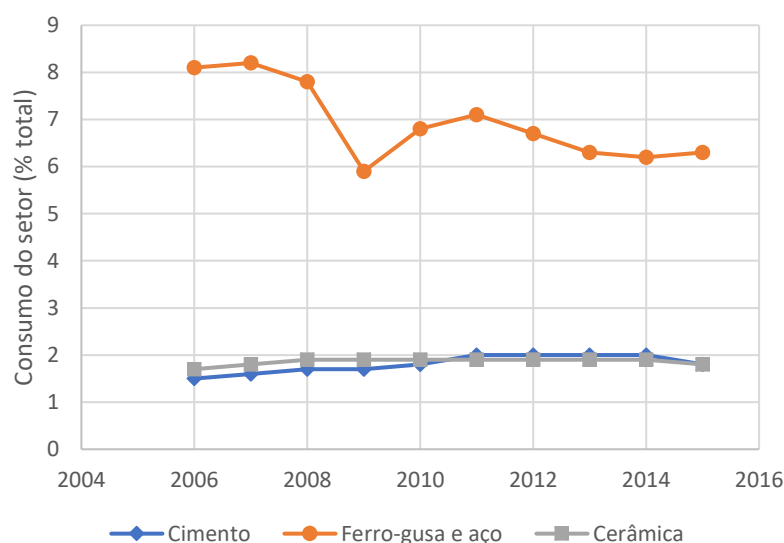
por exemplo.

<sup>4</sup> Além disso, a madeira é importante fonte de energia para algumas das indústrias de materiais e construção.

<sup>5</sup> Calcinação: É o processo de aquecer uma substância a altas temperaturas sem, contudo, atingir seu ponto de fusão, de forma a conseguir sua decomposição química e consequente eliminação dos produtos voláteis. A calcinação também é usada para a eliminação da água de cristalização, operação conhecida como queima e na oxidação de substâncias poluidoras presentes em resíduos, buscando a eliminação de sua toxidez. Cal e gesso são produzidos por calcinação. Na

conseguida pela queima de combustíveis fósseis, como derivados de petróleo – coque de petróleo, gás natural e carvão mineral. Já na cerâmica vermelha, a lenha é a principal fonte de energia. Os combustíveis fósseis e a lenha, que não seja oriunda de plantações, acabam contribuindo para o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A calcinação também gera outros poluentes, como o NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, dioxinas<sup>6</sup>, que são associados a impactos ambientais importantes como chuva ácida, mudanças climáticas, toxicidade etc. De fato, a demanda acumulada de energia é um bom indicador do impacto ambiental global (HUIJBREGTS et al., 2010), pelo menos em situações nas quais as energias renováveis (solar, eólica, hidráulica, biomassa plantada) não são significativas.

Figura 3 – Participação dos principais materiais de construção no consumo de energia. Assumindo que cerca de 1/3 do aço é empregado na construção, os materiais de construção consomem, provavelmente, pouco mais de 6% do consumo de energia.



Fonte: Elaborado a partir de dados da Empresa de Pesquisas Energéticas (2016).

Tem sido usual, particularmente na área de arquitetura, classificar materiais de acordo com a energia incorporada (mas precisamente demanda acumulada de energia) na sua produção. Este foi um dos primeiros critérios de cunho ambiental adotado e muitas listas estão disponíveis, brasileiras ou estrangeiras, a maioria delas desatualizadas. Estas listas ignoram que existem substanciais variações entre fabricantes de um mesmo produto<sup>7</sup>. Estas diferenças são, muitas vezes, maiores que as encontradas entre as medias de produtos diferentes. Estas diferenças existem devido a fatores como detalhes da tecnologia do forno, condições de operação e influência do tipo de combustível. Dados de Peres; Benachour e Santos (2008) mostram que a produção de 1t de gesso consome, no Brasil, algo entre 1,4 e 6,9 GJ/t, em função do forno e do combustível (Tabela 1). Os dados de um estudo sistemático das emissões das fábricas de gesso inglesas, boa parte delas calcinando gesso artificial, revelou emissões variando entre 0,9 e 2GJ/t, uma dispersão elevada, mas bem inferior a nacional. Dados semelhantes estão disponíveis para a produção de cerâmica vermelha (MANFREDINI; SATTler, 2008). Mesmo sem considerar a energia solar capturada na fotossíntese e excluindo o transporte até o consumidor, a produção de 1t de madeira nativa consome entre 0,8 e 3,3 GJ/t, enquanto que a da madeira plantada, entre 0,7 e 15 GJ/t (PUNHAGUI,

*produção do cimento Portland, além da calcinação, interferem outros processos, como a sinterização (Ver capítulo 24 deste livro).*

<sup>6</sup> A dioxina é um solvente orgânico altamente tóxico, carcinogênico e teratogênico. É um dos poluentes orgânicos persistentes sujeitos à Convenção de Estocolmo. É considerada, hoje, a mais violenta substância criada pelo Homem, com seu grau de periculosidade ultrapassando o urânio e o plutônio.

<sup>7</sup> De uma forma geral isto se aplica a todos os impactos ambientais.

2014), sendo o valor máximo resultado de secagem da madeira em processo de baixa eficiência (usando madeira úmida, por exemplo). A demanda acumulada de energia para produzir o clínquer, varia entre 3 e 4GJ/t (média 3,5GJ/t) para empresas brasileiras participantes do *Cement Sustainability Initiative*, do WBCSD, que representavam 74% do mercado em 2014 (WBCSD CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2016). Já nos 28 países da Comunidade Europeia a energia na produção do clínquer variou entre 3 e 5GJ, com média ligeiramente superior à brasileira, 3,75GJ/t. Observa-se que em todos os materiais, a demanda de energia depende muito do fornecedor selecionado.

Tabela 1 – Consumo de Energia típicos na produção de gesso brasileiro em função da tecnologia do forno e dos combustíveis utilizados. Dados em GJ/t (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008)

Tecnologia	Lenha	Óleo
Rotativo		1,4
Marmita	4,6	1,8
Panela	6,9	

Em resumo, a pegada de energia dos materiais é importante indicador, com relevância ambiental e econômica. A variação entre fabricantes de um mesmo material é, via de regra, mais significativa que as diferenças entre famílias de materiais. E, infelizmente, esta diferença é com frequência ignorada por aqueles que buscam promover a sustentabilidade.

#### 4.4 Mudança climática e materiais de construção

O aquecimento do planeta é talvez o mais importante problema da agenda ambiental atual. Simplificadamente, a temperatura do planeta é produto do balanço energético: a energia recebida do sol aquece; aquecida, a terra se resfria emitindo radiação para espaço. A ciência demonstra que o aumento da concentração de alguns gases da atmosfera, principalmente o CO<sub>2</sub>, o metano (CH<sub>4</sub>), o NO<sub>2</sub> e outros, provoca uma diminuição da transparência da atmosfera à radiação de onda longa que a Terra aquecida emite para o espaço. Tudo o mais permanecendo constante, inclusive a chegada de radiação solar<sup>8</sup>, a Terra aquece, como de fato vem aquecendo.

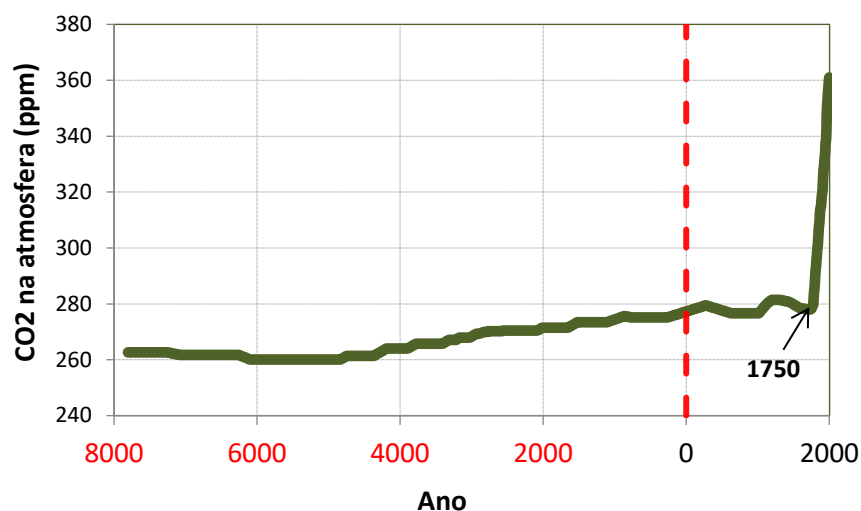
Como pode ser visto na Figura 4, durante os últimos 800 mil anos, a concentração de CO<sub>2</sub> permaneceu oscilando entre pouco menos de 200 ppm e 300 ppm (IPCC, 2008), associados aos períodos de glaciação e aquecimento. É evidente que, desde 1750, quando iniciou a revolução industrial e a humanidade começou a queimar combustíveis fósseis e decompor calcário em larga escala, esse teor vem subindo a uma velocidade muito elevada. Dados do Observatório da Mauna Loa, no Havaí<sup>9</sup>, mostram que em meados de 2015 a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> ultrapassou os 400 ppm, um recorde nos últimos 800 mil anos.

Portanto, não existe dúvida de que o ser humano tem contribuído para esse fenômeno. E a emissão antropogênica dos gases do efeito estufa aumentou em 70% entre 1970 e 2004.

<sup>8</sup> Que na verdade é variável e afetam o clima.

<sup>9</sup> Ponto de medição direta da concentração de CO<sub>2</sub> mais antigo. Uma visita a <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccqg/trends/index.html> mostrará dados atualizados diariamente.

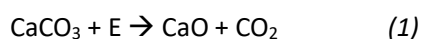


Figura 4 – Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera segundo o IPCC.

Fonte: Adaptado da fig. 2-3, IPCC (2008)

O aquecimento global tem consequências práticas que vão muito além da elevação do nível do oceano pelo degelo dos polos. Eventos climáticos extremos, como ciclones, chuvas torrenciais, enchentes, ondas de calor vão ficar cada vez mais frequentes; secas, inundações passarão a atingir regiões pouco suscetíveis no passado. Algumas regiões ficarão mais secas, em outras choverá mais. Edifícios, cidades e a infraestrutura geral precisará ser adaptada para se tornar resiliente a um clima que muda. Modelos de engenharia, desde dimensionamento de drenagens, de barragens para abastecimento urbano, até cargas de vento precisarão ser repensados.

Os materiais de construção são importantes contribuintes para a mudança climática, tanto pelo uso de combustíveis<sup>10</sup> fósseis ou biomassa não renovável, quanto pela decomposição de calcário. O calcário é importante matéria-prima para a produção de vários materiais de construção, em especial na produção do cimento, da cal hidratada e do aço. Cada tonelada de calcário calcinado libera 440 kg de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, de acordo com a Equação 1:

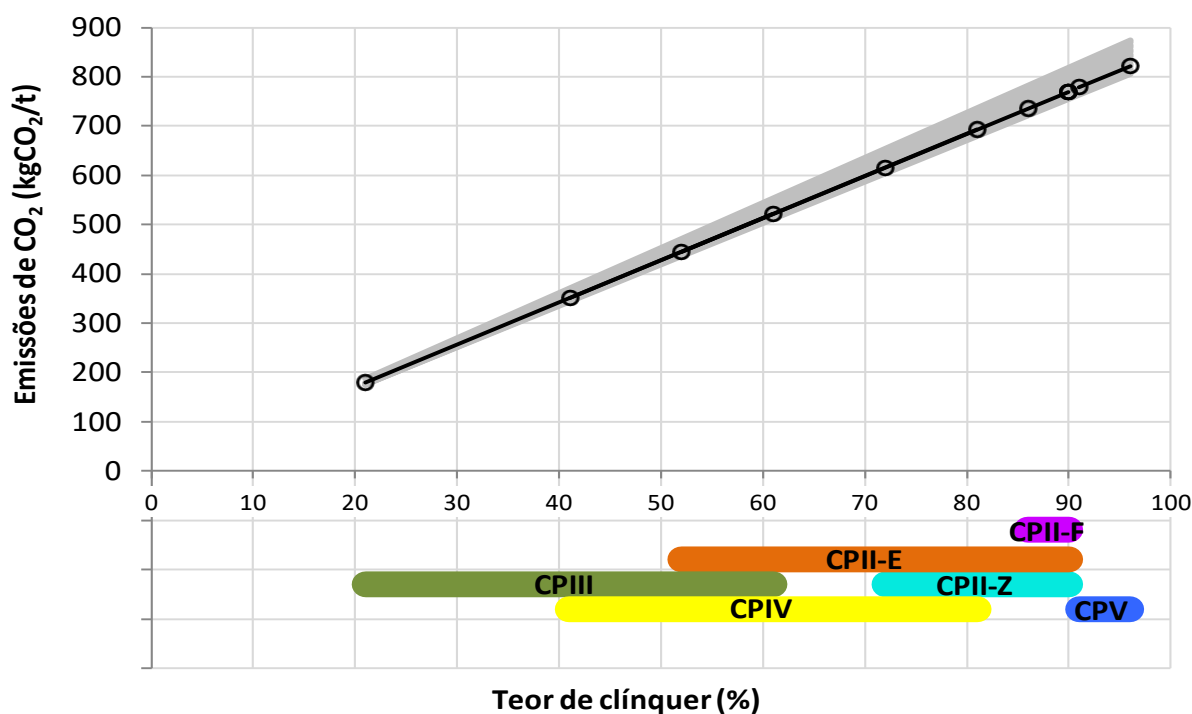


Para a produção de uma tonelada de clínquer é necessário cerca de 1,15t de calcário, que liberam cerca de 510 kg de CO<sub>2</sub>, aproximadamente 60% do total necessário para produzir o clínquer em fábricas modernas. A este total deve ser somado o CO<sub>2</sub> emitido pela queima de combustíveis fósseis, cuja intensidade de carbono (CO<sub>2</sub>/J) é bastante variável. A pegada de CO<sub>2</sub> do cimento tem sido, frequentemente, citada na literatura como sendo 1tCO<sub>2</sub>/t, um valor incorreto e que representa fábricas antigas produzindo cimento puro. A substituição do clínquer por outras matérias-primas (Figura 5), como adições minerais quimicamente reativas, especialmente aquelas resíduos de outras indústrias, permite a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à decomposição do calcário e, no caso das matérias-primas residuais, das oriundas da energia térmica para a produção do clínquer. Segundo o WBCSD (2008), a indústria cimenteira brasileira é consideravelmente melhor que a média mundial. Os participantes brasileiros do programa *Cement Sustainability Initiative* do *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD CSI) têm uma emissão média de CO<sub>2</sub> inferior a 600 kg/t de cimento, contra uma média global dos participantes do programa de 665 kg/t de cimento<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Ver item 4.3 neste capítulo.

<sup>11</sup> Mais detalhes sobre o tema ver capítulo 24 – O Cimento Portland no Brasil, neste livro.

Figura 5 – Efeito da substituição do clínquer por escória, fileres e pozolanas na emissão de CO<sub>2</sub> para a produção de clínquer considerando as diferenças entre empresas. Na parte inferior, é apresentada a faixa de variação do clínquer admitida na normalização brasileira.



Fonte: OLIVEIRA et al. ( 2014)

Além do cimento, materiais como cerâmica, aço e alumínio são responsáveis por importantes emissões de CO<sub>2</sub>. As emissões do aço variam entre 200 e 2200 kg CO<sub>2</sub>/t, dependendo da matéria-prima e fonte energética do processo (SANDBERG et al., 2001). Os valores mais baixos correspondem a aço reciclado, processado com energia renovável. Assim, em materiais como o aço, cimento e alumínio, o uso de matéria-prima reciclada é uma fonte eficaz para a redução do impacto ambiental.

A estimativa das emissões de gases do efeito estufa na produção destes e outros materiais são mais difíceis devido à carência de dados estatísticos confiáveis. A estimativa do impacto ambiental de materiais como aço, alumínio e plásticos é dificultada porque suas indústrias fornecem para outras cadeias produtivas, sendo difícil identificar o impacto da parcela consumida pela construção civil.

## 4.5 Resíduos e a construção

Resíduos, definidos como todos os materiais gerados em um processo e que não são o objetivo econômico do processo, são inerentes a qualquer processo envolvendo materiais. Processos de mineração e metalurgia são processos de concentração de espécies de interesse, gerando resíduos que, muitas vezes, nem entram no mercado, sendo, então, denominados fluxos escondidos. Como, ao final da vida útil, todos os produtos se transformarão em resíduos, a massa de resíduos é sempre maior que a massa de produtos comercializados. Estima-se que a massa de resíduos pode ser até 5 vezes superior à dos produtos comerciais (JOHN, 2000). Alguns resíduos são perigosos e muito estáveis a longo prazo; outros são degradáveis rapidamente, mas em condições anaeróbicas típicas de aterro contribuem para as mudanças climáticas gerando metano, um gás com potencial de aquecimento global 25 vezes superior ao CO<sub>2</sub>. Outros são volumosos e alteram a paisagem e, eventualmente, oferecem risco a biomas, como o caso da barragem de Mariana. A prática de acomodá-los em aterros concentra problemas de contaminação ambiental. Adicionalmente, não é improvável que no futuro, digamos centenas de anos,

estes pontos de concentração de produtos perigosos ainda estarão sob controle humano. Em todos os casos, eles são relevantes do ponto de vista da sociedade e, em consequência, para a engenharia. A prática de ignorá-los não é mais suficiente. Do ponto de vista da eficiência do uso de recursos naturais, interessa reduzir a taxa de geração de resíduos e, sempre que sustentável, utilizá-los como matérias-primas em substituição aos recursos naturais.

A taxa de geração de resíduos de processos extrativos é geralmente muito alta. A extração de madeira nativa da Amazônia brasileira, mesmo quando feita de forma manejada e planejada por engenheiros florestais atinge valores elevados: a extração das toras gera pouco mais de 2 t/t de madeira (NUMAZAWA et al., 2017); as perdas no desdobro são superiores a 50% (PUNHAGUI, 2014), o que resulta numa taxa de geração de resíduos de 4 t/t de madeira comercial. Para madeira não manejada, as taxas de geração de resíduo podem ser substancialmente maiores. Algumas operações de produção de agregado graúdo geram até 50% de finos, que muitas vezes não tem destinação. A geração de finos é também um problema para as operações de reciclagem de resíduos de construção (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014). A simples transformação do aço líquido em barra laminada implica em perdas de 10% (ALLWOOD et al., 2011), que são via de regra reciclados.

A fabricação de materiais de construção, devido a sua escala, tem bom potencial de absorver resíduos de outras indústrias. Atualmente, cerca de 11% da massa do cimento mundial e 16,3% da massa do brasileiro é constituído de escória de alto forno e cinzas volantes (WBCSD CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2016). No Brasil, a sucata é a maior fonte de matéria prima de fios e barras de aço para concreto armado. Boa parte da matéria prima dos geotêxteis é plástico reciclado.

Os resíduos da atividade de construção e demolição correspondem a mais de 500kg/hab.ano. Na Europa, estima-se que os resíduos de construção e demolição sejam 1/3 dos resíduos gerados. A este total devem ser adicionados os resíduos gerados na extração e processamento de materiais, para o qual não existe estimativa. Estes resíduos da construção civil causam importantes problemas ambientais, como o assoreamento de sistemas de drenagem urbana e também importantes problemas sociais, pois a sua deposição irregular na malha urbana impõe a sociedade pesados custos, desviando recursos escassos.

A Resolução nº 307 do CONAMA (2002), posteriormente alterada pela Resolução nº 348 (2004), estabeleceu referências importantes para a gestão desses resíduos e que já começam a gerar demandas para os fabricantes de diferentes materiais. O projeto da construção deve estimar os resíduos a serem gerados e especificar destinações legais para o material gerado. Além disso, o Brasil dispõe de normas que permitem utilizar a fração mineral (excetuado o gesso) dos resíduos de construção e demolição em pavimentos e até fabricação de produtos de concreto. No entanto, o mercado atual de resíduos de construção é ainda pequeno. O setor começa a se organizar e já existe a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (ABRECON), em cujo sítio Internet <sup>12</sup> é possível identificar empresas operando em diferentes partes do país.

Uma deficiência conhecida na Resolução nº 307 do CONAMA é a classificação de todas as madeiras como classe B, de fácil reciclagem. Esta classificação tornou possível o desenvolvimento de um mercado de uso de resíduos de construção, usado como combustível sem maiores preocupações com o impacto ambiental. Ocorre que as madeiras tratadas com CCA (arseniato de cobre cromatado), mesmo na forma de resíduos, liberam espécies tóxicas para a água (MERCER; FROSTICK, 2012): ao serem queimadas liberam arsênico e geram cinzas contaminadas (WASSON et al., 2005).

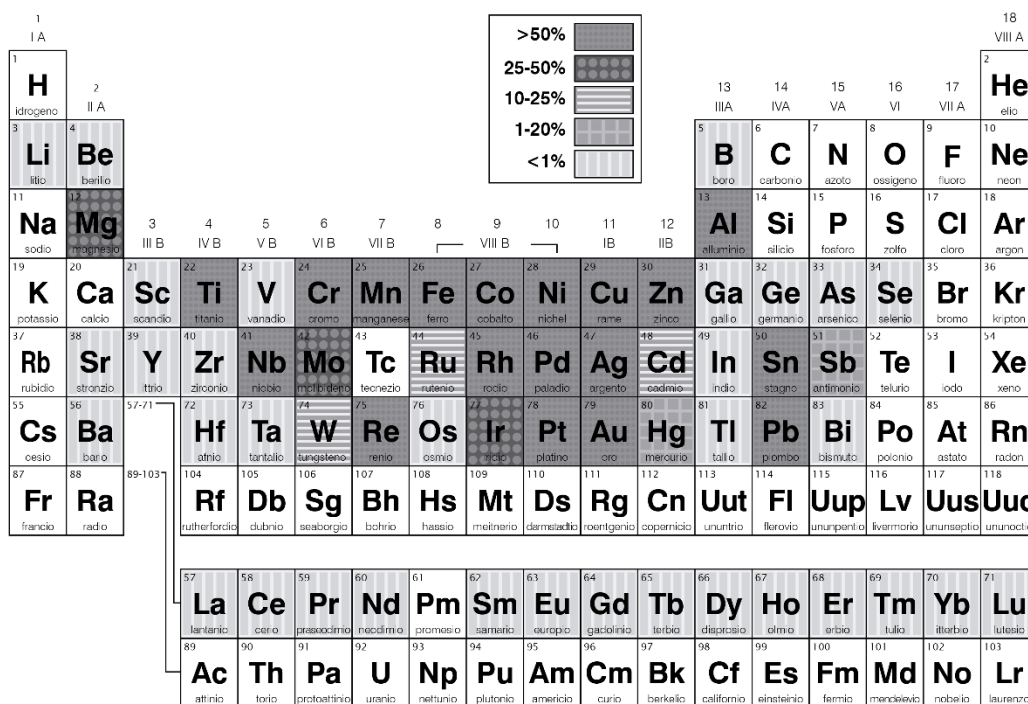
De forma geral, as taxas de reciclagem na economia ainda são baixas, mesmo para metais cuja reciclagem é atividade milenar, economicamente atrativa e tecnicamente bem resolvida (Figura 6). Para a fração

---

<sup>12</sup> [www.abrecon.org.br](http://www.abrecon.org.br)

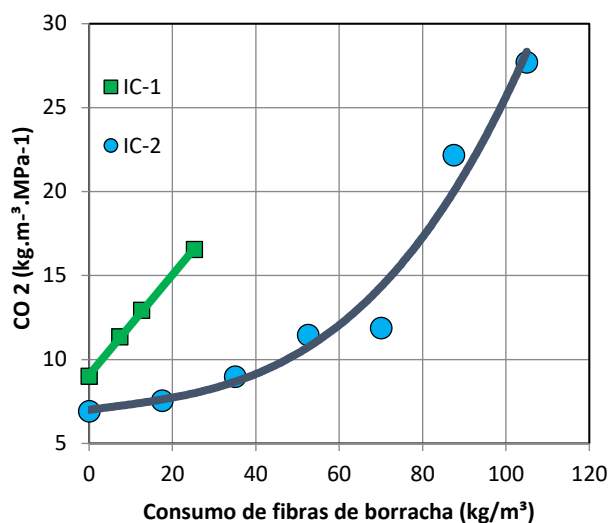
mineral dos resíduos de construção a taxa de reciclagem é muito pequena, pois os materiais possuem baixo valor, são compostos de uma combinação de materiais – cerâmica, pasta cimentícia porosa, rochas naturais e outros contaminantes (ANGULO et al., 2010) - cuja separação é, na melhor das hipóteses difícil. Agravante é que estes resíduos usualmente são dispersos, contaminadas com solo e, muito frequentemente, com outros resíduos, incluindo os urbanos. Exceto em locais onde agregados de construção sejam muito escassos e caros devido a logística, uma taxa de reciclagem elevada exige a criação de incentivos públicos. A Comunidade Europeia estabeleceu, como meta no ano 2020, que 70% seja reciclado, inclusive como material de aterro (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2008). Para tornar a meta realidade, estabeleceu taxas progressivas sobre os resíduos de construção destinados a aterros.

Figura 6 – Taxa de reciclagem dos resíduos de fim da vida útil dos metais.



Fonte: Adaptado de Graedel et al. (2011)

Embora a reciclagem seja uma meta ambiental muito importante para a construção, o simples fato de que um produto utilize resíduos como matéria-prima não é garantia de que ele represente um benefício para a sociedade na forma de um impacto ambiental menor do que o produto feito com matérias-primas virgens (JOHN, 2000). Ao contrário, a reciclagem sem critério oferece significativos riscos técnicos, ambientais e para a saúde. Está demonstrado que agregados reciclados contendo frações porosas como cerâmicas e argamassas, pode implicar em um aumento da quantidade de cimento necessário para produzir concreto (ANGULO et al., 2010), inflacionando custos e elevando a pegada de CO<sub>2</sub> e energia para valores ambientalmente inaceitáveis. O mesmo ocorre quando se coloca borracha de pneu em concretos (DAMINELLI; JOHN, 2011), como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Efeito de fibras de borracha na pegada de CO<sub>2</sub> de concretos

Fonte: Damineli; John (2011)

Tentativas de produzir agregados graúdos reciclados de baixa porosidade e alto desempenho esbarram não apenas em custo, mas em elevadas demanda de energia e geração de CO<sub>2</sub>, esta última ordens de grandeza superior a dos agregados naturais (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014). Um dos problemas é que o aumento da densidade dos agregados passa pela remoção das partes porosas, gerando resíduos finos, que representam problemas ambientais e reduzem o rendimento do processo. Telhas de plásticos reciclados têm apresentado vida útil de poucos anos, impondo custos imprevistos aos consumidores e aumentando o fluxo de resíduos desnecessariamente.

Apesar destas evidências, observa-se, hoje, um grande número de artigos nos quais se afirma promover uma construção sustentável mesclando resíduos em materiais cimentícios e, em menor medida, materiais cerâmicos. A quase totalidade destes trabalhos não leva em consideração critérios ambientais, possíveis impactos na saúde dos trabalhadores e usuários, nem tampouco critérios econômicos. **Produtos contendo materiais reciclados somente trazem benefícios ambientais caso tenham ao longo do seu ciclo de vida menores impactos** além de apresentarem desempenho técnico e durabilidade compatíveis com os dos materiais tradicionais. Também não podem apresentar riscos à saúde e ao meio ambiente (JOHN, 2000).

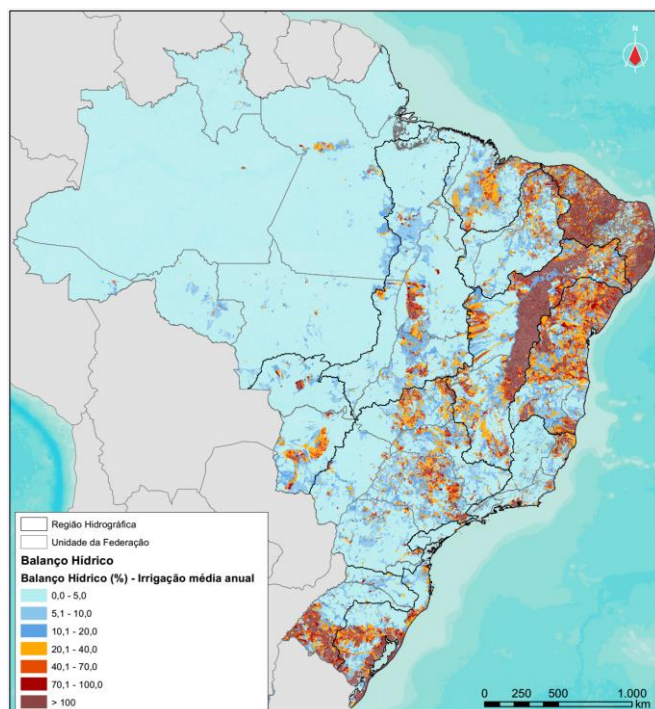
## 4.6 Água

A água cobre uma substancial parcela do planeta. No entanto, estima-se que 97,5% da água existente seja salgada, requerendo grande quantidade de energia para dessalinização, condição para o seu consumo doméstico, na agricultura e na maior parte da indústria. Da parcela de 2,5% de água doce, cerca de 40% encontra-se presa nas geleiras e boa parte da restante é umidade aprisionada no solo. Resulta que menos de 1% da água existente no planeta é doce e facilmente acessível.

Parcela significativa do Brasil enfrenta hoje situação definida como de estresse hídrico, que ocorre quando a quantidade de água retirada é alta em comparação à oferta de água da respectiva bacia hidrográfica. A demanda chega a ser superior à oferta em regiões de agricultura com irrigação (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016). Nas cidades, a situação se agrava porque além do estresse hídrico existe déficit de qualidade, pois os mananciais são contaminados pelo esgoto não tratado (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016) e pela lixiviação de espécies químicas diretamente dos materiais de construção (ver item 4.9).

Crises de abastecimento de água potável têm afetado muitas grandes cidades, a indústria e a agricultura brasileiras nos últimos anos. Como a maior parte da eletricidade brasileira é gerada por hidroelétricas, uma forma de geração de energia renovável, a disputa pelo uso de água com o setor elétrico deve se agravar, particularmente, em um cenário de instabilidade hídrica associada às mudanças climáticas.

*Figura 8 – Balanço hídrico, comparando retirada de água para irrigação em comparação com a oferta anual média, mostrando regiões nas quais a retirada foi superior à oferta. Em regiões metropolitanas, soma-se a esta irrigação o consumo humano (24% do total) e industrial (15%).*



Fonte: Agência Nacional de Águas (2016)

Nos últimos anos, são observados esforços significativos para introduzir a medida do uso e consumo da água na forma de um impacto ambiental. A primeira ferramenta proposta foi a pegada de água (HOEKSTRA; MEKONNEN, 2012). Em 2014, foi publicada a ISO 14046:2014 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014) que introduz de forma mais sistemática a medida de água na avaliação do ciclo de vida (ver item 4.11).

A contribuição dos materiais de construção durante o seu ciclo de vida para a crise hídrica inclui empregos de água na produção, construção, fase de uso (como limpeza) e pós-uso. Nas diferentes etapas de produção, a água pode ser parte da formulação, como em tintas, cerâmicas e materiais cimentícios, mas possui também outras utilizações, como o controle de partículas suspensas no ar, limpeza do ambiente, lavagem de insumos (como agregados para argamassa e concreto) e, no caso de concreto, atividades de cura. Na fase de uso, diferentes materiais e empregos demandam diferentes quantidades de água para limpeza periódica e liberam espécies químicas, perigosas ou não, para o solo e lençol freático. A água utilizada em argamassas e na formulação do concreto, algo que oscila entre 160 a 200 kg/m<sup>3</sup> para concretos convencionais, é significativa. Mas os dados reunidos por MACK-VERGARA; JOHN (2017) mostram que, mesmo assim, são uma parcela menor da água total envolvida na extração de matérias-primas, produção de cimento e agregados e cura e, principalmente, no abatimento de poeira e limpeza de caminhões nas centrais de concreto. O reuso de água de lavagem de caminhões é, hoje, uma prática bastante comum em concreteiras brasileiras (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2016).

O inventário do impacto ambiental associado ao uso de água é ainda controverso, mas inclui registrar

toda a água retirada de seu fluxo normal - seja oriunda de sistema público de abastecimento (captada em corpos d'água ou poços) ou sistema alternativo de abastecimento (uso de poços, aproveitamento de águas pluviais e reuso de águas) - e registrar o que retorna com nível de pureza ou padrão de potabilidade igual ou superior ao retirado e, principalmente, inferior: registrado como consumo degradativo (MACK-VERGARA; JOHN, 2017). Estes autores demonstraram que dados de uso de água associados a processos industriais publicados devem ser analisados com cuidado, pois as diferenças entre as várias metodologias existentes podem implicar em variações na pegada de água por um fator de 3.

Finalmente, o impacto ambiental associado ao uso da água depende da disponibilidade ou do estresse hídrico do local.

#### 4.7 Riscos associados ao uso de materiais

O uso de materiais, particularmente os quimicamente reativos, pode trazer riscos à saúde e à integridade física dos seres humanos. A Organização das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2011), estabeleceu o Sistema Harmonizado de Classificação e Etiquetagem de Produtos Químicos (*Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals - GHS*) do qual o Brasil faz parte. Este sistema padroniza a classificação dos perigos e a documentação de comunicação destes visando orientar o uso seguro. O Tabela 2 apresenta a lista padronizada dos perigos físicos, à saúde e ao meio ambiente.

Esta comunicação ocorre através de rotulagem adequada do produto e das **Fichas de Informações de Segurança Produtos Químicos (FISPQ<sup>13</sup>)**. As FISPQ devem conter todas as informações relevantes sobre os riscos que o produto oferece a seres vivos e meio ambiente, procedimentos de manipulação, descarte de resíduos; deve recomendar formas de minimizar os efeitos prejudiciais sobre a saúde e ações em caso de acidentes (BALDI et al., 2012).

Tabela 2 – Lista padronizada de perigos representados por substâncias químicas e misturas

Perigos físicos	Perigos à saúde
1. Explosivos	1. Toxicidade aguda
2. Gases inflamáveis	2. Corrosão da pele
3. Aerossóis inflamáveis	3. Irritação da pele
4. Gases oxidantes	4. Irritação e danos aos olhos
5. Gases sob pressão	5. Sensibilização
6. Líquidos inflamáveis	6. Mutagenicidade em células germinativas
7. Sólidos inflamáveis	7. Carcinogenicidade
8. Substâncias e misturas auto reativas	8. Toxicidade à reprodução
9. Líquidos pirofóricos	9. Toxicidade sistêmica para órgãos-alvo específicos
10. Sólidos pirofóricos	10. Perigoso por aspiração
11. Substâncias e misturas auto aquecíveis	
12. Substâncias e misturas que, em contato com a água, emitem gases inflamáveis	<b>Perigos para o meio ambiente</b>
13. Líquidos oxidantes	1. Perigo para o ambiente aquático (agudo ou crônico)
14. Sólidos oxidantes	2. Perigo para a camada de ozônio
15. Peróxidos orgânicos	
16. Substâncias corrosivas aos metais	

Fonte: United Nations (2011)

O Brasil, ainda, não possui listas de produtos químicos perigosos e a recomendação é utilizar as das agências internacionais como *European Chemicals Agency (ECHA)*<sup>14</sup> e *International Agency for Research on*

<sup>13</sup> Em inglês, *materials safety data sheet (MSDS)*

<sup>14</sup> <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/registered-substances>

*Cancer* (IARC). Existem também listas não oficiais com abordagens mais conservadoras e, algumas vezes, desprovidas de evidências científicas razoáveis, como a ONG norte-americana *Healthy Buildings Network*<sup>15</sup>.

É responsabilidade dos engenheiros solicitar e consultar as FISPQs dos produtos químicos que utilizam, estabelecendo a partir delas a decisão de compra ou não, recomendações de proteção à saúde do trabalhador e práticas de disposição adequada para os resíduos. É desejável que elas também estejam disponíveis no local de uso, pois são úteis em acidentes, posto que contêm a lista de ingredientes e recomendações para agir em emergências. A lista de ingredientes da FISPQ auxilia na avaliação dos riscos associados a presença de compostos perigosos, incluindo orgânicos voláteis (ver item 4.4) e é fundamental para a classificação dos resíduos resultantes. A exigência da ficha não se aplica a todos os materiais, mas envolve todos os produtos que irão sofrer alguma reação ou transformação química na obra, como argamassas, adesivos, tintas, solventes, selantes, etc.

FISPQs lacônicas, contendo recomendações genéricas (por exemplo “destinar os resíduos de acordo com a legislação vigente”), e até mesmo dificuldade de acesso às fichas são indícios de tentativa de encobrir problemas. Infelizmente, mesmo grandes empresas internacionais, com marketing agressivo baseado em sustentabilidade, adotam estas práticas no Brasil. A consulta a fichas de segurança produzidas pelas mesmas empresas na Europa e nos EUA, frequentemente, atende melhor às necessidades.

#### **4.8 Compostos orgânicos voláteis**

Compostos orgânicos voláteis estão presentes na atmosfera e incluem produtos naturais e antropogênicos, que embora presentes em concentrações muito baixas participam das reações fotoquímicas atmosféricas e contribuem para as mudanças climáticas e produzir aerossóis (KOPPMANN, 2007). Perfumes (e todos os odores) são resultados de compostos orgânicos voláteis. No entanto, materiais de construção também podem conter voláteis que serão liberados durante a aplicação do produto e também durante a fase de uso. Em ambientes pouco ventilados, os voláteis podem gerar concentrações muito acima das concentrações das máximas recomendáveis e daquelas medidas no ambiente externo. Estas elevadas concentrações de voláteis têm sido associadas à degradação da qualidade do ambiente interno aos edifícios. O odor das tintas frescas, móveis e revestimentos de construção novos, e até mesmo do crescimento de fungos (bolor) é resultado da volatilização de compostos orgânicos presentes.

A qualidade do ar interno dos edifícios não é uma preocupação recente: as políticas de economia de energia em edifícios levaram, já nos anos 70, a que países mais frios passassem a exigir edifícios com grande isolamento térmico e com envelope de alta estanqueidade. Esta exigência teve implicações no bem-estar e na saúde dos usuários, no que se chamou genericamente de “síndrome do edifício doente”<sup>16</sup>, termo que identifica um conjunto de sintomas não específicos em humanos, incluindo irritação do trato respiratório superior, dor de cabeça, fadiga e irritações na pele, que são associados a um edifício específico tanto devido à ocorrência temporal, quanto por envolver uma parcela dos usuários (REDLICH; SPARER; CULLEN, 1997), além de doenças específicas associadas à qualidade do ar de edifícios, que incluem rinite, conjuntivite, laringite, legionelose e dermatites. Esse diagnóstico levou a uma nova área de interface entre engenharia e saúde: a área de qualidade do ar interno. Para uma visão mais completa sobre a poluição de interiores, consultar a World Health Organization (2010) e as mais de 30 partes da norma ISO 16000 (ISO 16000-1: 2004). Os materiais de construção contribuem para esta poluição interna não apenas emitindo compostos orgânicos voláteis, mas também partículas respiráveis.

<sup>15</sup> <https://healthybuilding.net/>

<sup>16</sup> Em inglês *sick-building syndrome* ou SBS.



Até recentemente, os edifícios brasileiros, com exceção dos grandes e sofisticados edifícios de escritórios, eram pouco afetados por este problema, pois operavam com ampla ventilação natural. No entanto, a recente introdução de máquinas de ar-condicionado *split*, que não são equipadas para troca de ar com o exterior, e a generalização de janelas mais estanques associada à introdução da norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013 certamente está reduzindo as taxas de renovação de ar. Esta baixa taxa de renovação do ar é agravada pela necessidade crescente de manter janelas fechadas, seja para controle de ruído e de insetos (como mosquitos), seja por segurança. A ausência de ventilação mecânica em edifícios residenciais, muitos edifícios públicos e comerciais, e até a ausência no mercado de equipamentos que cumpram esta função, torna a questão da qualidade interna do ar crescentemente importante.

Os compostos orgânicos voláteis são produtos orgânicos que possuem ponto de início de ebulição abaixo de 250°C (a pressão de 101,3kPa) e, portanto, evaporam em quantidades significativas à temperatura ambiente. São uma parte da toxicidade dos produtos de construção, estando presentes em tintas, vernizes, adesivos, revestimentos orgânicos em geral e também em placas de madeira industrializada. A lista de componentes principais presentes na FISQP é auxiliar na identificação de compostos orgânicos voláteis.

O termo VOC<sup>17</sup> inclui uma vasta gama de compostos, que oferecem risco, em grau variado, à saúde de trabalhadores e usuários dos edifícios. Um estudo europeu (CAMPAGNOLO et al., 2017) revelou que os mais comuns em escritórios incluem formaldeído, benzeno, xileno, tolueno, hexano. Os formaldeídos podem ser encontrados em adesivos, carpetes, revestimentos de pisos poliméricos, chapas de madeira, incluindo os pisos de madeira, tintas, entre outros (KIM; KIM, 2005). Em todos os casos, a lista de compostos de interesse é muito variável. A normalização alemã inclui mais de 200 (AGBB, 2015); a regulamentação francesa inclui 165 substâncias em um requisito voluntário e 10 de declaração obrigatória pelos fabricantes de revestimentos de pisos, esquadrias, tintas e vernizes e painéis para parede e teto (ECO INSTITUT, 2015).

Existem vários métodos de medida de emissões de compostos orgânicos voláteis, sendo o mais tradicional o desenvolvido pelo governo da Califórnia (CALIFORNIA DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH, 2010). A Comunidade Europeia, recentemente, aprovou a especificação técnica CEN TS 16516/2013 que estabelece procedimentos para medir a emissão para o ar de substâncias perigosas, baseada na série ISO 16000 (OPPL, 2014). Os métodos experimentais para identificar e quantificar as diferentes substâncias voláteis de interesse consiste em expor amostras do material (por exemplo, piso vinílico) em uma câmara com volume, material e ambiente padronizados, com coleta de gases ao longo do tempo de exposição através de uma resina absorvente padrão, que são analisados por cromatografia de gases e espectrografia de massa. O teor de voláteis é usualmente expresso em  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$  e a taxa de emissão específica por área exposta expressa em  $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ .

Cenários de exposição, envolvendo salas padrão (dimensões, áreas de portas e janelas, e número de renovações do ar por hora) permitem calcular as concentrações ( $C_i$ ) no ambiente interno esperado e estabelecer limites ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) admissíveis para diferentes substâncias, conforme Equação 2.

$$C_i = \frac{E_a \cdot A}{n \cdot V} \quad (2)$$

onde,  $E_a$  é a taxa de emissão específica ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) medida no experimento;  $A$  é a área de exposição do produto ( $\text{m}^2$ );  $n$  é o número de trocas de ar por hora (usualmente  $>0,5/\text{h}$ ) e  $V$  é o volume do ambiente ( $\text{m}^3$ ).

---

<sup>17</sup> A norma brasileira ABNT NBR 16388 resolveu manter a sigla inglesa VOC, de volatile organic compounds.

Dentre as concentrações usuais controladas estão a **concentração total de compostos orgânicos voláteis** (TVOC), soma de todas as substâncias voláteis medidas<sup>18</sup> mesmo que não identificadas e, no caso europeu, a **concentração total de compostos orgânicos semivoláteis** (TSVOC), que envolve substâncias de peso molecular mais elevado que os compostos orgânicos voláteis e que vão evaporar lentamente expondo os usuários por um tempo prolongado. Esses valores de TVOC não se relacionam diretamente com questões de saúde, embora tenham sido relacionados a problemas de desconforto.

O risco a saúde associado aos VOCs tem sido estimado utilizando-se o “*R Value*”, definido como sendo a razão entre a concentração mínima de interesse de interesse (LCI)<sup>19</sup> - concentração máxima para a qual não existe razão para esperar efeitos na saúde mesmo durante exposições prolongadas (AGBB, 2015), calculado conforme a Equação 3:

$$R \text{ value} = \sum \frac{c_i}{LCI_i} \quad (3)$$

em que  $c_i$  é a concentração da substância  $i$  estimada no cenário de análise ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e calculada conforme a eq. 2; e  $LCI_i$  é a concentração limite de interesse da mesma substância ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) estabelecida.

O Tabela 3 apresenta exemplos da taxa de emissão de compostos voláteis para diferentes materiais. Também é possível observar-se que a taxa de emissão diminui rapidamente com o envelhecimento do produto: a emissão de compostos orgânicos voláteis é mais importante durante e logo após as aplicações, inclusive nas atividades de manutenção.

Tabela 3 – Exemplo de taxas de emissão total de compostos orgânicos voláteis (TVOC) de produtos a diferentes idades

Produto	Taxa de emissão [ $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]	Idade
Carpete	83	Novo
	3360	Novo
Piso Vinílico	7034	1-3 anos, em uso
	2192	0,5 anos, em estoque
	1629	1 ano, em estoque
Piso “linóleo”	220	Novo
	22	Novo
Pinho não tratado	216	Novo
Adesivo de madeira – base água	271000	Úmido
Selante de silicone	13000	0-10 horas após aplicação
	<2000	10-100 horas após aplicação
Tinta látex acrílica	430	-
Tinta Látex	249	Média de 7 dias
Stain de madeira	10000	0-10 horas após aplicação
	<100	1-100 h após aplicação
Cera para piso	80000	0-10 horas após aplicação
	<5000	10-100 h após aplicação
Placa de gesso acartonado	26	
Madeira aglomerada	2000	Nova
	200	2 anos

Fonte: elaborado a partir de Hansson (2003)

<sup>18</sup> Na normalização europeia, limita TVOC somente das substâncias com concentração estimada maior que 5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

<sup>19</sup> Em inglês Concentrações Limites de Interesse (LCI) são usualmente derivados da máxima concentração das substâncias estabelecidas para ambientes laborais (AGBB, 2015).

Estudo realizado por Uemoto e Agopyan (2006) em tintas imobiliárias brasileiras detectou presença de compostos orgânicos voláteis em tintas à base de água, tendo sido encontradas substâncias como solventes clorados, compostos aromáticos, formaldeído, etc. No entanto, as tintas à base de água apresentaram emissões de voláteis totais inferiores a  $20\text{g/dm}^3$ , limite máximo especificado pela Comunidade Europeia para esses produtos somente a partir do ano 2010 (Tabela 4). A limitação da emissão de voláteis totais é uma simplificação, pois diferentes voláteis possuem diferentes toxicidades. A ABNT NBR 16388:2015 padroniza a medida do teor de compostos orgânicos voláteis em tintas e vernizes a base de água e solventes, com valores expressos em g/L.

Tabela 4 – Limites de emissão de compostos orgânicos voláteis (VOC, g/l) para diferentes tintas estabelecidos pela Comunidade Europeia a partir de 2010. Determinação de acordo com a ISO 11890 (2013)

Tinta	Base	
	Água	Solvente
Interior, fosca	30	30
Interior, brilhante	100	100
Paredes externas minerais	40	430
Pinturas para superfícies metálicas interna-externa	130	300
Vernizes e <i>stains</i> para madeira (interno-externo)	130	400
<i>Primers</i>	30	130
Pinturas com acabamentos decorativos	200	200

Fonte: Elaborado a partir de European Parliament and of The Council (2004)

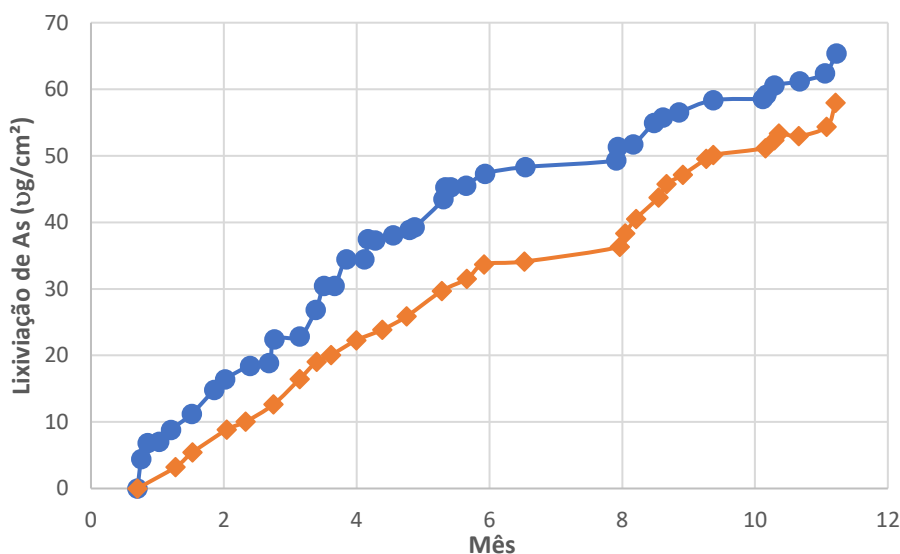
Na prática vários outros parâmetros ambientais influenciam a emissão e concentração de voláteis no ambiente. Exemplos incluem a temperatura (KIM e KIM, 2005), a taxa de eliminação do poluente (reação, adsorção, filtração pelos materiais em contato, ventilação) e a concentração externa (HANSSON, 2003).

## 4.9 Contaminação das águas e do solo por lixiviação

A água, em contato com os materiais, pode lixiviar compostos tóxicos neles contidos, transportando-os para o solo, o lençol freático e, possivelmente, para a cadeia alimentar. O estudo de lixiviação de espécies químicas, muito provavelmente se iniciou pela análise do risco de contaminação do lençol freático em aterros de resíduos industriais e, posteriormente, foi ampliado para análise dos riscos ambientais associados ao uso de resíduos como matérias-primas.

Existe uma grande variedade de testes para análise dos riscos associados a lixiviação e os resultados não são diretamente comparáveis. Por um lado, existem os testes desenvolvidos exclusivamente para resíduos, e que focam no risco de contaminação oferecido pelos aterros e que incluem os presentes na normalização brasileira de resíduos (ABNT NBR 10006:2004). Sabe-se, atualmente, que a lixiviação de espécies perigosas não é exclusividade de materiais produzidos com resíduos (VAN DER SLOOT; COMANS; HJELMAR, 1996) e evidências do potencial contaminante de materiais usuais estão fartamente disponíveis na literatura. Materiais que contenham biocidas potenciais também são problemas. Existe abundante literatura demonstrando que madeiras tratadas com biocidas de madeira de uso bastante popular como CCA (arseniato de cobre cromatado) e creosoto, inclusive após a sua deposição (BECKER et al., 2001; MERCER; FROSTICK, 2012; TOWNSEND et al., 2004), liberam, por lixiviação, as espécies químicas perigosas utilizadas no tratamento realizado para protegê-la da biodeterioração. Dependendo da quantidade de madeira tratada utilizada em uma região, o impacto ambiental pode ser significativo. (KHAN et al., 2006) estimam que das 28000t de arsênico usados na proteção de madeira na Flórida, no ano 2000, mais de 15000t serão lixiviados durante a vida útil estimada de 40 anos. Materiais cimentícios e porosos cerâmicos podem lixiviar espécies químicas perigosas nele presentes (JACOB; CHERIAF; ROCHA, 2010; TOGERÖ, 2004). Togerö (2004) demonstrou que o chumbo e o biocida carbendazina são lixiviados pela chuva e que aditivos orgânicos muito utilizados na produção concreto podem ser rapidamente lixiviados.

Figura 9 – Quantidade acumulada de lixiviação de arsênico (As) de madeira (Jack pine) tratada com 1% CCA exposta durante um ano às a intempéries em Ontário Canadá.



Fonte: Taylor; Cooper (2005)

Os mecanismos de liberação de substâncias para o ambiente são muito complexos e incluem difusão, dissolução contínua e lavagem das superfícies dos produtos. As condições ambientais são muito importantes, inclusive o pH da água, que dependendo da taxa de renovação pode ser alterado pelo processo de lixiviação. Diferentes espécies químicas vão responder de forma diferente a variações do pH e diferentes materiais resistem a pH diferentes (SLOOT et al., 2011; SLOOT; HEASMAN; QUEVAUVILLER, 1997).

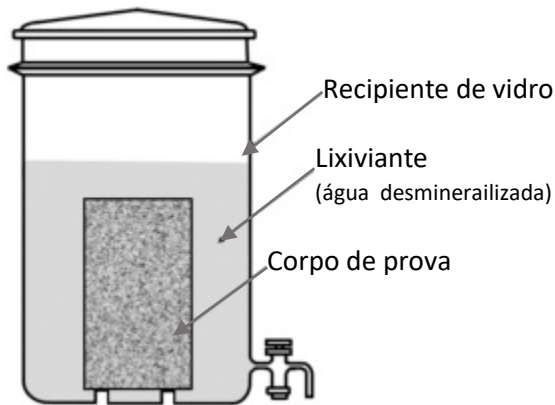
A Holanda foi pioneira no diagnóstico do potencial dos materiais de construção para contaminar a água, o solo e a cadeia alimentar. O *Building Materials Decree* (EIKELBOOM; RUWIEL; GOUMANS, 2001), de 1995, estabeleceu uma metodologia para avaliar e controlar este risco. Esta metodologia é universal, aplicável tanto a materiais que contêm resíduos como aqueles produzidos com matérias-primas virgens, sólidos ou a granel. Uma metodologia experimental simples permite medir as taxas de lixiviação efetivas e a disponibilidade total de espécies químicas perigosas - como os metais pesados As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, e os ânions, como Br, Cl, F, SO<sub>4</sub>, cianetos. Os resultados experimentais alimentam um modelo simples que permite estimar a imissão<sup>20</sup> de cada uma das espécies químicas ao longo da fase de uso dos produtos. O grau de exposição do produto (imerso, exposto a chuva frequente, exposto ao lençol freático) é também modelado e define o grau de exposição. Os limites de imissão foram estabelecidos de maneira a impedir que a lixiviação em 100 anos provoque uma alteração inaceitável na composição de uma camada de solo padrão de 1 m de espessura.

Após mais de 20 anos de trabalho, a Comunidade Europeia está chegando a uma norma padrão CEN/TS 16637 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2014) aplicável a todos os materiais de construção, com a novidade de permitir a combinação de ensaios de lixiviação com os de ecotoxicidade – que buscam medir o impacto do lixiviado em espécies vivas (GARTISER et al., 2017). A abordagem Europeia é simples: (a) ensaio do tanque 10, denominado ensaio dinâmico de lixiviação superficial, em que uma amostra de produto monolítico (paralelepípedo com aresta >40mm e área superficial superior a 100cm<sup>2</sup>) é exposta a uma quantidade pré-determinada de água deionizada que é recolhida e repostada aos 0,08, 1, 2,25, 8, 14, 15, 28, 36 dias determinada e caracterizada (PAULUS; SCHICK; POIRIER, 2016); (b)

<sup>20</sup> Imissão é a concentração da emissão que atinge um organismo ou objeto. Emissão é a liberação pela fonte produtora.

teste de coluna, mais precisamente denominado ensaio de percolação contra a gravidade (HJELMAR et al., 2012), aplicável a material granular (95% abaixo da peneira 4mm) que é colocado em colunas de 5 a 10 cm de diâmetro com altura de 30 cm, e água deionizada é bombeada contra a gravidade a velocidade muito baixa, sendo recolhidas 7 amostras correspondentes à relação líquido/sólido (L/S) entre 0,1 e 10l/kg. Existe também uma variedade do teste do tanque voltado para amostras compactadas permeáveis.

Figura 10 – Ensaio de lixiviação superficial dinâmica de um produto monolítico



Fonte: Paulus; Schick; Poirier (2016)

A principal vantagem desses métodos é que eles se aplicam a qualquer produto. Eles também geram parâmetros experimentais que podem ser aplicados a modelos matemáticos para prever o comportamento no longo prazo. Esses modelos podem levar em conta a geometria do produto que será colocado em uso (por exemplo, espessura da camada), diferenças de temperatura entre o ensaio e o ambiente de uso e também a fração de tempo durante a qual se espera que o material permaneça molhado.

No Brasil, a questão da contaminação ambiental por lixiviação de espécies químicas perigosas ainda está confinada a discussão dos aterros e a classificação legal de resíduos.

#### 4.10 Outros impactos

A produção e o transporte dos materiais de construção são responsáveis por parte importante da poluição emitida pela indústria, dada a variedade de produtos empregados na construção. Mesmo jazidas de extração de argilas e rochas, centrais de produção de asfalto usinado e centrais de concreto são fontes de poluentes, seja de compostos orgânicos, seja de partículas inorgânicas respiráveis.

A alta informalidade em muitos setores fabricantes de materiais se constitui em um agravante: sonegação de impostos, corrupção de agentes públicos, e consequente redução da capacidade de investimento do estado, se aliam a práticas de desrespeito à legislação trabalhista e ambiental, além da fabricação de produtos de baixa qualidade. A seleção de fornecedores socialmente responsáveis é a base do uso sustentável de materiais de construção. O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS)<sup>21</sup> desenvolveu um guia rápido para detectar a informalidade na cadeia de materiais.

<sup>21</sup> O CBCS tem como missão promover a melhoria da qualidade de vida da população brasileira e a preservação de seu patrimônio natural, pelo desenvolvimento e implementação de conceitos e práticas mais sustentáveis e que contemplem as dimensões social, econômico e ambiental da cadeia produtiva da indústria da construção civil.

Um caso particular de destaque no país é a extração da madeira nativa, realizada predominantemente de maneira ilegal, provocando desmatamento da Amazônia, corrupção de agentes públicos e sonegação de impostos (CBCS - COMITÊ DE MATERIAIS, 2009).

## 4.11 Avaliação do Ciclo de Vida dos materiais de construção

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) ou *Life Cycle Assessment* (LCA) é a melhor metodologia para avaliar quantitativamente o impacto ambiental de um produto ao longo do seu ciclo de vida. O ciclo de vida de qualquer produto se inicia com a extração ou reciclagem de matérias-primas, passa por etapas de transporte, fabricação, construção ou montagem, uso – com as atividades de limpeza, manutenção incluindo até mesmo o fim da sua vida útil com destinação para aterro ou reciclagem. Em consequência, a ACV requer não apenas um conhecimento detalhado do passado, dos fluxos associados a todas as etapas de produção – o que pode ser medido quantitativamente – mas exige “conhecer” também o futuro do produto, os fluxos associados ao seu uso e pós-uso. Os fluxos futuros não podem ser medidos, mas apenas estimados usando modelos e ou dados secundários oriundos da experiência prévia. Os valores dos fluxos estimados usando dados secundários (de outros processos considerados similares) ou a partir de modelos têm uma incerteza significativamente mais alta que os que foram medidos.

A ACV foi uma revolução conceitual dos métodos anteriores de avaliação ambiental, pois estabeleceu: (a) a necessidade de medir os impactos do produto ao longo do ciclo de vida do produto, do berço ao túmulo e não em uma fase (por exemplo, produção); (b) que a avaliação de um impacto apenas não é suficiente, pois todo produto tem múltiplos impactos ambientais; (c) somente podem ser comparados produtos com funções equivalentes - comparações de impacto específico por massa ou volume levam a conclusões erradas; (d) a vida útil do produto nas condições esperadas de uso, e que varia significativamente caso a caso, precisa ser considerada; (e) a avaliação é **quantitativa**, estimando-se os impactos ambientais a partir de fluxos de massa e energia. A ACV torna obsoleta as antigas listas de materiais indesejáveis *versus* desejáveis, que ainda proliferam.

Muitas publicações na área de avaliação do ciclo de vida buscam comparar de soluções baseadas em materiais concorrentes como, por exemplo, casas de madeira *versus* casa de concreto. Deixam implícito que uma solução é universalmente melhor e que deveria substituir a outra. No entanto, dada a elevada demanda de materiais de construção (ver item 4.2), muito dificilmente poderemos dispensar qualquer dos nossos principais materiais. Não existe madeira suficiente para substituir o concreto armado na construção de edifícios. Tampouco a substituição da madeira por concreto armado seria desejável e possível. Mais ainda, é certo que a mesma comparação realizada considerando dados reais de um projeto, em local definido, considerando os impactos ambientais reais dos produtores locais leve a conclusão oposta. Portanto, estas comparações não têm, portanto, significado prático. São ferramentas de *marketing* travestidas de estudos ambientais e devem ser simplesmente ignoradas.

Mas a ACV tem aplicações importantes: (a) identificar os principais impactos ambientais nas diferentes etapas do ciclo de vida, facilitando a mitigação e a inovação; (b) comunicar de forma padronizada aos clientes os impactos ambientais dos produtos ou serviços (c) identificar qual dos produtos<sup>22</sup> alternativos e fornecedores disponíveis em uma situação prática tem menor impacto ambiental; (d) identificar qual dos fornecedores de um determinado produto apresenta menor impacto ambiental ou maior ecoeficiência. Implícita no item (d) está a possibilidade de um fabricante comparar o impacto ambiental dos concorrentes e tomar medidas para tornar seu processo produtivo mais eficiente.

---

<sup>22</sup> É essencial que os produtos cumpram uma mesma função, com um mesmo nível de desempenho e que a comparação seja realizada considerando a vida útil de cada produto nas condições de uso e a vida útil de projeto do edifício.

### 4.11.1 Entendendo o conceito da ACV

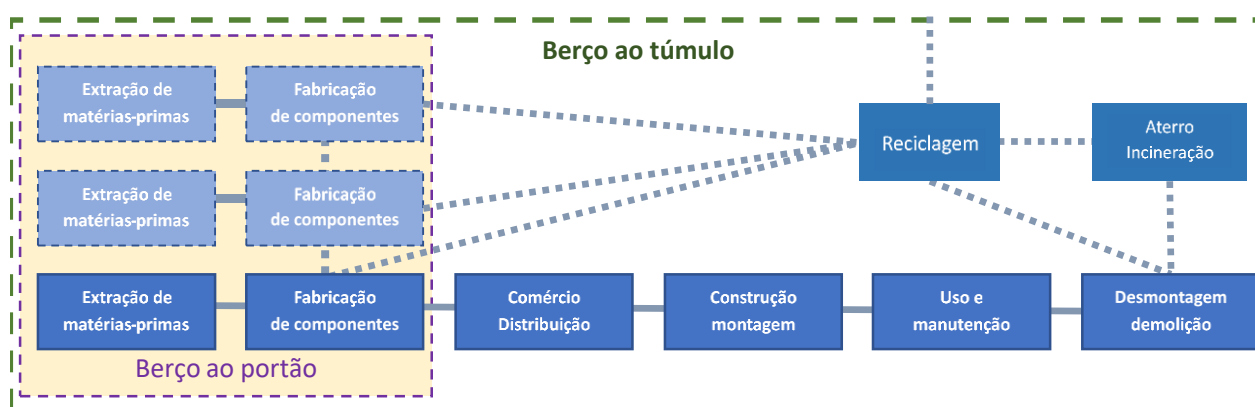
O conceito fundamental da avaliação do ciclo de vida é que a quantificação de **todos fluxos** de entrada e saída de matéria e energia associados a **todo o ciclo de vida de um produto** (Figura 11) do berço ao “túmulo” – torna possível calcular quantitativamente os impactos, positivos e negativos, que este produto exerce sobre o ambiente.

#### 4.11.1.1 Inventário do ciclo de vida (ICV)

A base da avaliação do ciclo de vida é o **inventário do ciclo de vida**, que exige **medir** (ou quantificar) os fluxos de matéria e energia associadas a cada etapa do ciclo de vida do produto, de forma **estatisticamente representativa**. Quanto mais precisas forem as medidas, mais eficaz será a ACV. O inventário inclui **fluxos diretos**<sup>23</sup>, gerados nas dependências ou por equipamentos da empresa e também os **fluxos indiretos**, aqueles gerados pelos fornecedores e clientes. A cadeia de fornecedores e clientes pode se estender de forma quase infinita. Os fluxos indiretos incluem o “passado”, na forma das atividades de fornecedores (e de fornecedores de fornecedores...), inclusive de insumos energéticos, pois estes impactam muito o ambiente. Também estão incluídos nos fluxos indiretos o “futuro”: as fases de uso, manutenção e pós-uso, realizadas pelos clientes do fabricante. Estas atividades são incertas, não podem ser previstas com mesma precisão que as do passado. No entanto, os fluxos associados à fase de uso são muitas vezes os mais importantes do ponto de vista ambiental. No caso de produtos padronizados já presentes no mercado há tempo suficiente, a previsão de futuro pode ser feita estudando-se uma amostra estatística dos produtos em uso. Mesmo assim, prever o futuro é tarefa ingrata: uma mudança do clima pode aumentar a taxa de degradação e reduzir a vida útil do produto, por exemplo. No entanto, no caso de produtos inovadores somente pode se estimar o comportamento futuro. No caso de construções, em que cada obra é um protótipo único e a vida útil de projeto ultrapassa 100 anos, o desafio de prever o futuro é tarefa complexa.

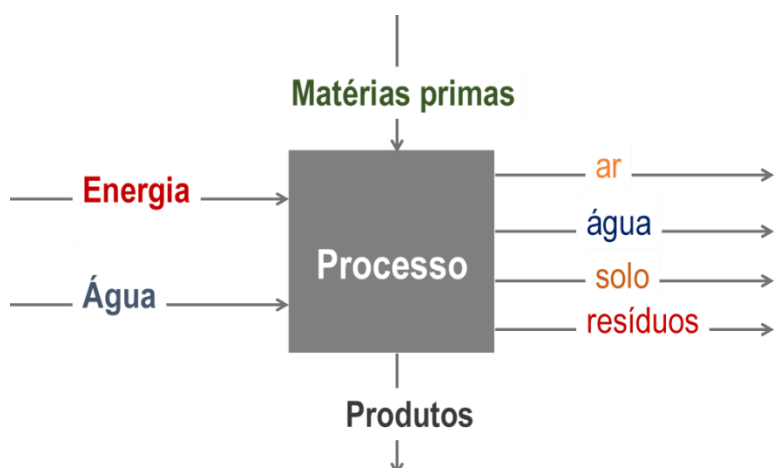
O inventário é, portanto, uma contabilidade ambiental, que resulta numa base-de-dados com quantidades dos materiais e energia utilizados na cadeia de produção (fluxo de entrada) ou emitida para o ar, água, solo e resíduos (fluxos de saída).

Figura 11 – Ciclo de vida de um produto. Cada linha implica em atividade de transporte. O inventário pode estabelecer fronteiras, como por exemplo, do berço ao portão, usualmente oferecida pelos fabricantes de materiais.



<sup>23</sup> Os fluxos diretos são também chamadas “foreground systems”; os indiretos, “background systems”. Para detalhes ver EUROPEAN COMMISSION (2011, p. 98)

Figura 12 – Para cada etapa do processo deve ser realizado um inventário dos fluxos de entrada e saída de massa e energia, associado a cada unidade do produto.



Uma dificuldade frequente nos inventários é a geração de mais um produto comercial em um mesmo processo produtivo. O craqueamento de petróleo é um exemplo clássico deste problema. Mas os resíduos presentes em todos os processos produtivos e que entram no mercado como matérias-primas (cinzas volantes, resíduos da produção de energia térmica, por exemplo) também se enquadram nesta categoria. O mesmo se aplica aos inevitáveis resíduos de fim de vida útil dos produtos. Nesses casos, se torna necessário decidir qual a fração dos fluxos e dos impactos a ser **alocado** a cada produto. Existem vários critérios de alocação, inclusive ponderação pela massa dos produtos, pelo preço de venda, uma combinação destes fatores e até mesmo alocar apenas ao produto considerado principal (EKVALL; FINNVEDEN, 2001). Nenhum critério de alocação é universalmente superior. No caso de resíduos de processo ou pós-uso, a regra recomendável é alocar todos os impactos no produto que o gerou e **sem o qual não haveria** geração de resíduos. Neste caso, esta regra é superior a todas as outras, por ser simples e inequívoca e incentivar a reciclagem, preservando os recursos naturais. No entanto, ela vem sendo questionada por setores industriais cujos resíduos se converteram em importantes ferramentas de mitigação para outras cadeias industriais.

#### 4.11.1.2 Estimativa dos impactos ambientais

De posse dos dados do inventário são calculados os **impactos ambientais**, combinando-se fluxos com o uso de modelos matemáticos. Estes modelos ponderam a contribuição de cada fluxo para cada uma das categorias de impacto ambiental consideradas na ACV.

O número de categorias de impacto ambiental disponível é bastante grande e não existe um conceito universalmente aceito. A Tabela 5 apresenta as adotadas pela Comunidade Europeia e que servem de referência para o nascente Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida<sup>24</sup>. Também apresenta a lista de categorias de impacto adotadas pela construção europeia (EN 15804:2012). Além da redução do número de categorias de impacto ambiental, o que simplifica a avaliação (ver item 4.11.2), são introduzidos indicadores relativos ao consumo de recursos naturais (minerais, água e energia), um dos grandes desafios do setor da construção.

<sup>24</sup> <http://acv.ibict.br/pbacv/>



Tabela 5 – Lista de categorias de impactos ambientais estabelecidas pela Plataforma Europeia de Avaliação do Ciclo de Vida (EPLCA) adotada pelo PBACV e pela norma EN15804:2012 para produtos da construção.

Categoria de impacto	EPLCA	EN
Mudanças climáticas	X	X
Destruição da Camada Estratosférica de Ozônio	X	X
Toxicidade humana (câncer e não câncer)	X	
Partículas inorgânicas, partículas respiráveis	X	
Radiações ionizantes	X	
Formação fotoquímica de ozônio	X	X
Acidificação	X	X
Eutrofização terrestre e aquática	X	X
Ecotoxicidade (água doce)	X	X
Uso da terra	X	
Uso de recursos naturais (minerais, energia, água)	X	X
Resíduos		X
Outros fluxos de saída		X

Fonte: Hiederer; Joint Research Centre (2011)

Para vários dos impactos ambientais não existe consenso internacional sobre os modelos de cálculo mais adequados. É provável que, em muitos casos, os modelos deverão ser adaptados a realidades regionais. Mas para a categoria de impacto “mudanças climáticas” existe um modelo consolidado, estabelecido pelo IPCC (SOLOMON et al., 2007) (Tabela 6).

Tabela 6 – Potencial de aquecimento global de diferentes gases em comparação ao gás de referência CO<sub>2</sub> de alguns gases que contribuem para a mudança climática segundo o IPCC. Os valores usuais são os de 100 anos.

Nome	Fórmula	Horizonte de tempo (anos)		
		20	100	500
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1	1	1
Metano	CH <sub>4</sub>	72	25	7,6
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	289	298	153
CFC-13	CClF <sub>3</sub>	10.800	14.400	16.400
Hexafluoreto de enxofre	SF <sub>6</sub>	16.300	22.800	32.600
PFC-14	CF <sub>4</sub>	5.210	7.390	11.200

Fonte: Solomon et al., (2007, Sec. 2.10.2)

A contribuição de um produto para a mudança do clima é, usualmente, calculada em termos do potencial de aquecimento global total do produto ( $GWP_t$  ou *Global Warming Potential, total*), expresso kg de CO<sub>2</sub> em equivalente (kg CO<sub>2eq</sub>) pela Equação 3:

$$GWP_t = \sum_1^n m_i \cdot GWP_i \quad (3)$$

em que  $m_i$  é a massa de cada gás para a produção da unidade de produto, obtida no inventário do ciclo de vida e  $GWP_i$  é o potencial obtido na Tabela 6, usualmente, para o horizonte de tempo de 100 anos.

A forma de representação de um resultado típico de uma ACV pode ser vista na Tabela 7. Os dados são de **declaração ambiental de produto**, em que o fabricante de uma argamassa isolante portuguesa comunica aos clientes os impactos ambientais do produto, do berço à porta da fábrica (SAINT-GOBAIN WEBER PORTUGAL, S.A.; ECOCHOICE S.A., 2015), segundo os padrões da ISO 14025:2006 ou EN 15804:2012. Declarações ambientais de produto começam a surgir para produtos brasileiros, antes mesmo que existam dados de inventário nacionais e uma metodologia padrão.

Tabela 7 – Resultado de uma ACV de uma argamassa isolante portuguesa divulgados como uma Declaração Ambiental de Produto. Dados relativos a 1kg de argamassa, inventário do berço ao portão. P.C.I. – poder calorífico inferior.

Categoria de impacto	Valor	Unidade
<i>Parâmetros que descrevem os potenciais impactos ambientais</i>		
Aquecimento global	3,9e-01	kg CO <sub>2</sub> eq
Depleção da camada de ozônio	3,54e-08	kg CFC 11 eq
Acidificação	1,27E-03	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrofização	6,39e-04	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq
Oxidação fotoquímica	7,13e-05	kg Sb eq
Depleção de recursos abióticos (fósseis)	4,9e00	MJ, P.C.I.
<i>Parâmetros que descrevem a utilização de recursos</i>		
Resíduos perigosos eliminados	3,44e-06	kg
Resíduos não perigosos eliminados	2,54e-02	kg
Resíduos radiativos eliminados	1,33e-05	kg
<i>Outras saídas</i>		
Componentes para reutilização	Não aplicável	kg
Materiais para reciclagem	5,14e-3	kg
Resíduos radiativos eliminados	1,33e-5	kg
Materiais para recuperação de energia		kg
Energia exportada	Não aplicável	MJ
<i>Parâmetros que descrevem a utilização de recursos</i>		
Utilização de energia primária renovável total (TRR)	6,11e-01	MJ (P.C.I.)
Excluindo a utilizada como matéria-prima (EPR)	3,91e-01	MJ (P.C.I.)
Utilizados como matérias-primas (RR)	2,21e-01	MJ (P.C.I.)
Utilização de energia primária não renovável total (TRNR)	4,97e00	MJ (P.C.I.)
Excluindo a utilizada como matéria-prima (EPNR)	3,95e00	MJ (P.C.I.)
Utilizada como matéria-prima (RNR)	1,02e00	MJ (P.C.I.)
Utilização de material secundário (MS)		kg
Utilização de combustíveis secundários renováveis (CSR)	Não aplicável	MJ (P.C.I.)
Utilização de combustíveis secundários não renováveis (CSNR)		MJ (P.C.I.)
Água doce = utilização do valor líquido de água doce	9,25e-5	m <sup>3</sup>

Fonte: Saint-Gobain Weber Portugal, S.A.; Ecochoice S.A. (2015)

#### 4.11.1.3 O uso dos resultados de ACV na prática

Quando o resultado de ACV pode ser usado para **comparar de produtos** equivalentes, ou comparar fabricantes alternativos para um dado produto, é improvável que uma das alternativas tenha melhor desempenho em todas as categorias de impacto ambiental. Por exemplo, um produto pode ter impacto menor na categoria de aquecimento global, mas um impacto maior em depleção da camada estratosférica de ozônio e acidificação.

Nestes casos, a tomada de decisão exige a normalização dos impactos e a seguir a ponderação dos mesmos de acordo com a importância relativa de cada um deles atribuída pela agenda ambiental do país (BENGTSSON; HOWARD; KNEPPERS, 2010), da região ou até mesmo da empresa. Assim, a escolha vai depender da agenda do tomador de decisão.

O custo de uma solução é muito importante e, frequentemente, elimina alternativas. Assim, é recomendável ponderar a decisão considerando impacto ambiental e custo. Várias estratégias podem ser utilizadas. O estabelecimento um sobre-preço (prêmio) para o produto de menor impacto é uma delas. Uma metodologia mais sofisticada envolvendo a ponderação de impactos ambientais normalizados com o custo global (inicial e em uso) pode ser encontrada em Lippiatt (2007).

O leitor não pode esquecer que comparações genéricas entre dois produtos (o que é melhor, aço ou

concreto?) carecem de sentido prático, posto que a demanda por materiais de construção é tão grande que dificilmente poderemos dispensar qualquer dos materiais que hoje utilizamos (ver item 4.2). Até porque, em muitas situações práticas, determinado material pode não estar disponível ou tem custo inviável. Mais do que isto, como impacto ambiental de um mesmo produto varia entre fabricantes (ver Figura 13), os impactos ambientais utilizados no estudo certamente serão diferentes se considerarmos apenas as empresas que ofertam o produto para um projeto. A comparação normalmente envolve um projeto de solução. Ocorre que diferenças entre projetos, mesmo pequenas, podem alterar significativamente as demandas relativas de material ou implicar em alterações significativas na vida útil do material. Assim, os resultados de uma ACV somente são válidos para o problema proposto e não podem ser generalizados.

A eficácia da ACV como ferramenta de minimização de impactos ambientais depende da disponibilidade de dados confiáveis que representem o impacto das empresas que estão ofertando as soluções concorrentes para o projeto. A tendência internacional é exigir que cada fabricante emita, como parte da documentação técnica, uma **declaração ambiental do produto (DAP)**<sup>25</sup>, registrando publicamente os impactos ambientais associados ao seu produto, usualmente do berço ao túmulo<sup>26</sup>.

Generalizando-se o uso das DAPs, projetistas e construtores poderão selecionar produtos considerando o impacto ambiental. Para que seja viável manejar e decidir com esta grande quantidade de dados, serão necessárias novas ferramentas de projeto. As ferramentas BIM poderão integrar a ACV ao processo de projeto, automatizando a avaliação e tornando imediato ao projetista analisar o impacto ambiental de suas decisões. A soma dos impactos indiretos associados aos insumos utilizados fornecidos pelas DAPs é uma parcela relativamente fácil. Mas caberá à construtora realizar o inventário de suas atividades de construção e junto com os projetistas estimar os impactos ambientais durante a fase de uso – manutenção, água, energia, esgoto – e pós-uso. Portanto, engenheiros e arquitetos precisarão dominar as ferramentas de ACV.

A ACV é uma ferramenta de concepção simples e elegante, que tem o potencial de descrever de forma **quantitativa e completa** os efeitos de um produto no ambiente. No entanto, a tradução deste conceito em solução, para embasar a decisão do dia a dia da indústria, enfrenta barreiras práticas, como será discutido a seguir.

#### 4.11.2 As dificuldades práticas e a necessidade de ACV simplificada

A origem de boa parte dos problemas na aplicação prática da ACV é a dificuldade de realizar um inventário completo coletando dados primários. Tal quantificação exige **medir**, por um período de tempo representativo, tipicamente de 1 ano, todos os fluxos em cada etapa<sup>27</sup> do ciclo de vida. A obtenção desses dados primários, incluindo toda a sorte de poluentes do ar, da água e do solo, todos os resíduos gerados, as diferentes matérias-primas e suas distâncias e modais de transporte, as quantidades de água e de energia de cada fonte (e todos os fluxos a ela associados) requer recursos humanos, laboratoriais e financeiros nada desprezíveis e, na maior parte das vezes, indisponíveis.

A quantidade de dados exigida para uma ACV completa é elevada: um simples conjunto de dados para descrever o processo de extração e moagem de calcário, gerando uma areia calcária moída, envolve 248 fluxos de saída (emissões para ar, água e resíduos) e 44 entradas de matéria e energia (INDUSTRIAL MINERALS ASSOCIATION EUROPE, 2012). Este é um produto extremamente simples, em que os únicos

---

<sup>25</sup> Em inglês, *Environmental Product Declaration (EPD)*

<sup>26</sup> A Comunidade Europeia vem permitindo declarações ambientais de produtos **média** de um país, o que é uma contradição com o objetivo de subsidiar a escolha do menor impacto ambiental, que necessariamente passa por buscar o melhor fabricante. O LEED incentiva e fornece pontos caso a cadeia produtiva disponha de EPD médio!

<sup>27</sup> Na ACV não são considerados impactos associados a acidentes

recursos significativos que vem de fornecedores são insumos energéticos e os equipamentos. Em produtos mais complexos, por exemplo tintas, que envolvem a montagem de componentes produzidos por cadeias industriais que podem se estender por países e continentes, a quantidade de fluxos a serem medidos se multiplicam pela quantidade de etapas e empresas integrantes da cadeia de suprimentos. Como, até hoje, apenas poucas empresas já realizaram inventários do ciclo de vida completos com dados primários, e um número menor ainda dispõe destes dados atualizados, o interessado em realizar a ACV precisaria realizar inventários em seus fornecedores. Estes precisariam concordar em compartilhar detalhes dos insumos utilizados, das suas plantas industriais e garantir acesso a estas. Mais do que isto, precisariam negociar com seus fornecedores para que estes se engajassem no processo. Assim, a quantificação por dados primários de todos dos fluxos inerentes ao conceito de ACV é, no atual momento, inviável. Uma ACV completa, com dados primários, somente será possível quando o uso da ACV for universalizado. No entanto, os impactos ambientais da fase de uso do seu produto, que ocorrem no futuro, e envolvem interrelações com produtos diversos, diferentes ambientes, taxas de degradação e usuários desconhecidos, continuarão sendo estimados.

Por esta razão, a viabilização da aplicação prática da ACV no dia a dia da indústria, exige simplificações.

#### 4.11.2.1 Estabelecimento de fronteiras e exclusões

Uma destas simplificações é o **estabelecimento de fronteiras** para o sistema de inventário. Boa parte dos inventários disponíveis tem como fronteira a porta da fábrica (*cradle to gate*). Neste caso, os impactos da fase de comercialização, transporte e uso do produto, sobre as quais o fabricante tem pouco ou nenhum controle são deixados a cargo dos consumidores. Embora necessário<sup>28</sup>, o estabelecimento de fronteiras também pode ser usado para “esconder” aspectos ambientais importantes.

A segunda simplificação consiste em **excluir do inventário aspectos considerados não relevantes do ciclo de vida**, como atividades de apoio (estoque, por exemplo), processos e insumos específicos. Por exemplo, a contribuição de um fornecedor de um simples e único parafuso utilizado em uma montagem de uma estrutura tem pouca contribuição na massa e, possivelmente, no impacto desta estrutura. Em tese, o efeito da eliminação deste insumo do inventário tem um efeito numericamente pequeno no resultado final. Embora, na maioria dos casos, sejam uma imposição prática, estas omissões provocam uma redução no valor nominal dos impactos ambientais de até 50% (LENZEN, 2001). Existem **regras de corte** (*cut-off rules*), baseados na massa do produto, em porcentagem de impacto desprezado e até em custo. Os cortes realizados devem ser explicitados no relatório do inventário. Infelizmente, a informação dos cortes usualmente é perdida quando se combinam vários inventários em um produto. Estes cortes também podem ser e, muitas vezes o são, utilizados para esconder aspectos ambientais relevantes. Manuais recomendam que conste do inventário uma estimativa numérica da fração dos impactos ambientais excluídos (INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM -ILCD, 2010), tarefa impossível de ser realizada com precisão razoável.

#### 4.11.2.2 Uso de dados secundários ou de bases de dados

Uma terceira simplificação, universalmente adotada, é a **substituição de dados primários** (medidos nas fábricas e canteiros de obra) por dados “secundários”<sup>29</sup> disponíveis em bases de dados especializadas ou na literatura. A dispendiosa atividade de coletar informações e medir variáveis dos processos por longo período é substituída por simples busca eletrônica de dados. Um problema enfrentado é a dificuldade de seleção do dado secundário que descreva com precisão o processo em análise. Na realidade, como se desconhece aquilo que não se mede, usualmente existe incerteza sobre detalhes do processo industrial

---

<sup>28</sup> Uma alternativa que dispensa fronteiras é utilizar as matrizes de trocas (*input-output*) entre setores econômicos (HENDRICKSON et al., 1998). No entanto, em países como o Brasil onde parte da economia é informal, elas são problemáticas.

<sup>29</sup> Em inglês, *proxy data* ou *secondary data*.

em análise. Agrava o fato de que usualmente o expert em ACV não é especialista na indústria em estudo. Adicionalmente, as bases de dados, na melhor das hipóteses, apresentam uma descrição genérica do processo inventariado, via-de-regra gerada por um não especialista. Muitas vezes, por segredo industrial, a descrição é vaga ou inexistente. Assim, na prática, a seleção dos dados secundários é realizada por critérios precários, muitas vezes pouco objetivos e quase nunca adequadamente registrados, o que tem implicações óbvias. É certo que o custo e a complexidade do inventário são reduzidos com o uso de dados secundários, mas a capacidade da ACV em descrever precisamente o impacto ambiental e, portanto, a sua utilidade é também reduzida. O manual da Plataforma Europeia de Avaliação do Ciclo de Vida é claro: *“o uso de dados secundários inconsistentes pode tornar os estudos de ICV/ACV não confiáveis e distorcidos e frequentemente levam a formulação de conclusões e recomendações erradas.”* (EUROPEAN COMMISSION, 2011). No entanto, esta segue sendo a regra na ACV dos dias de hoje.

É usual privilegiar a realização de uma ACV mais “completa”<sup>30</sup> e não mais precisa. E o uso de dados secundários, ao baixar o custo, facilita a realização de ACV completa. Certamente, o uso de secundários é inevitável quando os fornecedores de insumos (e os fornecedores dos fornecedores...) não disponibilizam dados primários de ICV de seus produtos. Também é inevitável quando se analisa uma nova tecnologia, da qual ainda não existe processo industrial em operação. O uso de dados secundários médios é também natural quando o insumo médio do país é adquirido, como no caso energia elétrica obtida diretamente no sistema elétrico integrado (EUROPEAN COMMISSION, 2011).

Mas na busca da ACV completa a baixo custo, o uso de dados secundários tem substituído até mesmo as medidas dos fluxos diretos, ou seja, aqueles que ocorrem nas dependências da empresa que realiza o inventário. Neste caso, as empresas declaram algo sobre o qual não tem controle. E já se registram casos nos quais ao renovar uma DAP empresas se deparam com aumentos significativos do impacto ambiental, embora tenham reduzido os impactos diretos (nas suas próprias fabricas) e selecionado fornecedores mais eficientes. Esta alteração é frequentemente uma miragem produzida por alterações na base de dados genérica, sem qualquer relação com as atividades da empresa.

Existe hoje bases de dados comerciais internacionais e bases de dados que presumivelmente representam países ou regiões (como a ILCD Europeia). Contrariando as práticas aceitáveis de estatística, as bases nacionais, que se considera representativa do país, via de regra não são construídas por amostras estatisticamente representativas dos produtos, com indicadores de tendência central e dispersão. O inventário do calcário europeu declara ter inventariado oito operações industriais, amostra que dificilmente poderia representar todo o calcário moído na Comunidade Europeia.

Assim, não existem informações objetivas estatisticamente válidas sobre as diferenças esperadas entre os fabricantes do mesmo produto. Frequentemente estas diferenças são negligenciadas, mas outras vezes são arbitradas. No já citado inventário europeu do calcário moído, o desvio padrão de todos os fluxos é constante, arbitrado em 1% dos valores. Encontra-se na literatura discussões sobre qual a melhor distribuição de frequência para estimar a incerteza, como se esta pudesse ser independente da distribuição da variável na população considerada (MULLER et al., 2017).

Na ausência de dados sobre variabilidade, de medidas primárias das variáveis, somada à aritmética da ponderação dos fluxos secundários, produz dados que sugerem aos olhos de um leigo uma grande precisão. Por exemplo, a concentração média de SiO<sub>2</sub> na areia calcária foi estimada no ICV como igual a 0,000833g<sup>31</sup> de areia por kg de calcário moído (INDUSTRIAL MINERALS ASSOCIATION EUROPE, 2012). Na verdade, é sabido que o quartzo é um contaminante comum com teores superiores a 1% em

---

<sup>30</sup> *Completeness em inglês.*

<sup>31</sup> *Cerca de 1/135.000 mol de sílica (60,8g/mol) por kg de calcário.*

quase todos os calcários comerciais.

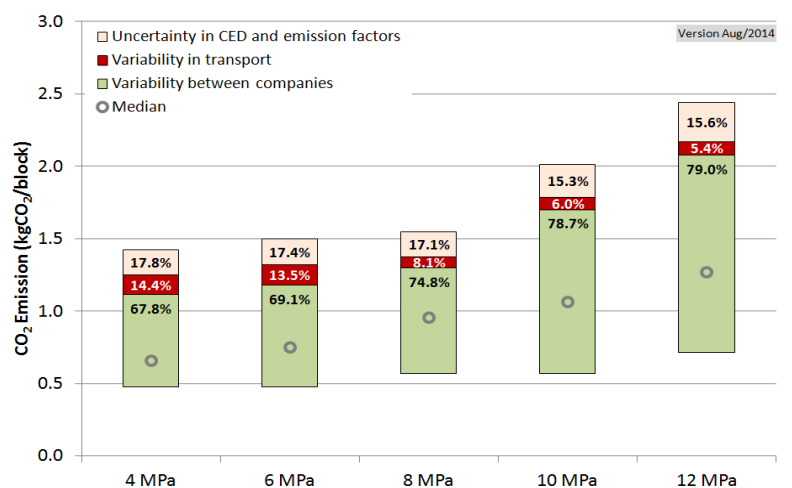
Subjacente ao uso de dados secundários está a hipótese, geralmente aceita, mas nunca provada, de que uma mesma “rota tecnológica” resultaria em impactos ambientais similares, eventualmente demandando ajustes devido a mudanças na matriz energética e outros detalhes. O maior argumento em favor desta hipótese era, até a recentemente, a inexistência de prova em contrário, uma vez que praticamente não existiam setores que tivessem realizado inventário de dados primários<sup>32</sup> em uma amostra suficientemente grande para evidenciar a dispersão. Uma das poucas exceções é o inventário de CO<sub>2</sub> e demanda acumulada de energia realizado em 33 fabricantes de blocos de concreto brasileiros (OLIVEIRA; PACCA; JOHN, 2016), representando quase 50% da produção nacional. A amostra, não representativa, mostrou uma variação de 300% entre o melhor e o pior fabricante inventariado. Apesar de incluir a incerteza nos impactos associados à produção de cimento cerca de 75% da variabilidade foi decorrente de diferenças na formulação e da massa dos blocos e 5 a 15% devida a variação nas distâncias de transporte. Já o inventário canadense de blocos de concreto (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2005) mostra uma dispersão de pouco mais de 7% na pegada de CO<sub>2</sub>. Esta dispersão é originária de uma hipótese sobre diferentes distâncias de transporte. A quantidade de cimento utilizada para fazer um bloco de concreto em todo o Canadá é assumida como constante, independente da fábrica e resistência do produto!

Dispersão elevada também foi observada para concretos de qualquer resistência mecânica de 29 países (DAMINELLI et al., 2010). No caso do concreto o citado estudo conduzido pela Athena também assume que no Canadá o consumo de cimento para as diferentes classes de resistência é constante! Já a declaração ambiental de produto do cimento tipo CEM II Europeu, na qual o teor de clínquer varia entre 50 e 94% e envolve fábricas de 24 países, apresenta apenas um valor para a pegada de CO<sub>2</sub>, sem apresentar qualquer incerteza ou dispersão. Os autores da EPD decidiram ignorar não apenas a variabilidade relacionada a diferentes teores de clínquer, que podem resultar em diferenças de 45% nos principais impactos ambientais, mas também a dispersão de eficiência entre fábricas, que dados primários mostram variar entre aproximadamente 3 e 4,9GJ/t de clínquer (WBCSD CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2016), em uma diferença de 63%. O mais impressionante é que esta base é citada como sendo uma das fontes de dados, o que confirma que a variabilidade não foi considerada relevante pelos autores e revisores. Em resumo, mesmo diante de sólidas evidências de que a pegada ambiental de um produto varia muito, até mesmo associações de fabricantes passam a acreditar que ela é única e constante.

Existem sólidas evidências de que a hipótese de que rotas tecnológicas geram impactos ambientais equivalentes é errada. Decisões tomadas a partir de dados secundários genéricos não são as mais adequadas para minimizar os impactos ambientais. Esta prática precisa ser urgentemente substituída por um sistema viável de ser estruturado usando dados primários.

---

<sup>32</sup> O leitor deve atentar que existem conjunto de inventários de produtos que podem representar parte importante de mercado, mas fortemente ancorados em dados secundários de fontes similares, o que leva a uma convergência de resultados.

Figura 13 – Dispersão da pegada de CO<sub>2</sub> de blocos de concreto de diferentes resistências e a contribuição de cada fator

fonte: Oliveira; Pacca; John (2016).

#### 4.11.2.3 Exemplo de uso inadequado da ACV como ferramenta de marketing

O primeiro estudo de ACV de materiais de construção realizado no Brasil com forte divulgação foi a comparação de telhados com telhas cerâmicas e telhas de concreto. Financiado pela associação de fabricantes de cerâmica, o estudo foi realizado por uma das empresas multinacionais de maior reputação na área de ACV (QUANTIS CANADA, 2011). Do ponto de vista técnico o estudo foi validado por experts brasileiros na área de cerâmica e uma técnica em ACV de empresa multinacional concorrente. A parte pelo evidente conflito de interesses, a análise do texto produzido revela que o estudo seguiu os mais rigorosos padrões técnicos internacionais vigentes na área de ACV.

A descrição do inventário inicia com a encorajadora declaração “...todo esforço nesta investigação foi direcionado a implementar a informação mais confiável e representativa da realidade possível.” (QUANTIS CANADA, 2011, p. 20) e termina declarando que a maioria dos dados veio da base de dados suíça da Ecoinvent, uma das mais populares! A adaptação de dados à realidade brasileira se limitou a (a) ajuste da matriz energética; (b) correção do transporte usando dados da América do Norte, que por alguma razão foi considerada parecida com a realidade brasileira; (c) adaptação das distâncias para transporte, areia e conteúdo de cimento. O fator de emissão adotado para o cimento foi de 0,838 t CO<sub>2</sub>-eq/t, enquanto no Brasil o WBCSD Cement Sustainability Initiative (2016), mostra dados primários com valor médio em torno de 0,6 t CO<sub>2</sub>/t, com ampla variação.

Dentre as fontes de incerteza apresentadas no estudo não se inclui as que são determinantes: a variação no teor de cimento entre fabricantes de telhas de concreto, e de eficiência energética de fornos de cerâmica. Assim a análise da incerteza se limita a itens menores, como uso de argilite na cerâmica, influência do uso de areia artificial no concreto, embalagem na cerâmica. Estes dados foram utilizados para realizar 750 simulações de Monte Carlo, uma simples geração de números aleatórios em torno de um valor médio.

Os valores de impacto ambiental publicados sugerem ao leigo uma grande precisão de medida, pois vão ao centésimo do quilograma: o impacto em mudanças climáticas de 1m<sup>2</sup> de telhas de concreto é de 9,88 kg CO<sub>2</sub> eq enquanto as cerâmicas 4,72 kg CO<sub>2</sub> eq.! Diferenças de eficiência entre fabricantes destes produtos foram consideradas irrelevantes, posto que os autores autorizam o uso para a “comparação dos perfis ambientais dos ciclos de vida das telhas de cerâmica e de concreto produzidas no Brasil” e consideram os dados aptos a divulgação pública.

As debilidades desse estudo não são resultado de má-fé da associação de ceramistas ou incompetência ou “criatividade” da empresa que o realizou. **Infelizmente o estudo reflete os padrões vigentes internacionalmente** para trabalhos de ACV.

#### 4.11.2.4 Estimativa da vida útil e a ACV

Uma obra é projetada para determinada vida útil, normalmente limitada pela vida útil das partes que não podem ser substituídas. Muitos componentes utilizados têm vidas úteis inferiores a da construção, exigindo a sua substituição periódica. A cada substituição serão gerados resíduos e novos impactos ambientais na fabricação, transporte e montagem do substituto. A vida útil de cada componente faz parte da ACV.

A vida útil é afetada pelo clima e microclima, pela presença variável de poluentes, mediado pelo grau de exposição que o projeto impõe (SATO; JOHN, 2006). Simples decisões de projeto podem aumentar significativamente a vida útil sem incrementar os impactos ambientais do produto (JOHN, 1987). Existe também uma grande dispersão na vida útil esperada, e está precisa ser tratada por critérios estatísticos.

A estimativa quantitativa da vida útil dos componentes, considerando a aplicação específica e usando abordagem probabilística é uma das condições para a realização da análise do ciclo de vida de uma construção. Esta necessidade acrescenta complexidade a uma atividade que já não é simples, valorizando a atividade de engenheiros e arquitetos.

### 4.11.3 ACV modular – uma proposta de simplificação

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) desenvolveu um sistema simplificado de ACV, compatível com as normas ISO e que pode ser progressivamente ampliado para formar um ACV completa. A metodologia foi pensada para ter **custo e tempo de execução reduzidos**, ser passível de realização por equipe da empresa adequadamente treinada, sem exigir equipamentos caros e complexos. Desta maneira, a ACV-m se torna **acessível a pequenas e médias empresas** e pode ser atualizada sempre que necessário.

Para facilitar o seu uso, os resultados são apresentados de **forma simples e compreensível** para técnicos e consumidores, na forma de **pegadas ambientais**. O módulo básico obrigatório consiste em 5 pegadas:

- a) Pegada de CO<sub>2</sub>: emissões de CO<sub>2</sub>, como representante do potencial de aquecimento global;
- b) Pegada de Energia: demanda cumulativa de energia, renovável e não renovável;
- c) Pegada de água: uso de água;
- d) Pegada de resíduos;
- e) Pegada de recursos naturais.

Os dados requeridos para estimar estas pegadas do módulo básico são simples e podem ser integrados no sistema de gestão das empresas, viabilizando o acompanhamento destes indicadores no dia a dia por seus técnicos e gestores, tornando a mitigação dos principais impactos ambientais possível. Além do módulo básico, obrigatório, as cadeias produtivas ampliar o escopo de forma a incluir outros impactos que consideram relevantes. Empresas poderão a realizar ACV completa, se desejarem.

A metodologia busca privilegiar o uso de dados primários e deixar evidente a incerteza associada ao uso de dados secundários. Ela prevê (a) o uso exclusivo de dados primários para os **fluxos diretos** da empresa; (b) o **uso de dados secundários limitados aos fluxos indiretos** e somente quando os fornecedores não disponibilizem dados primários; (c) que **todos os inventários devem informar a incerteza**, seja associada ao uso de dados secundários genéricos, seja devido a outras fontes.

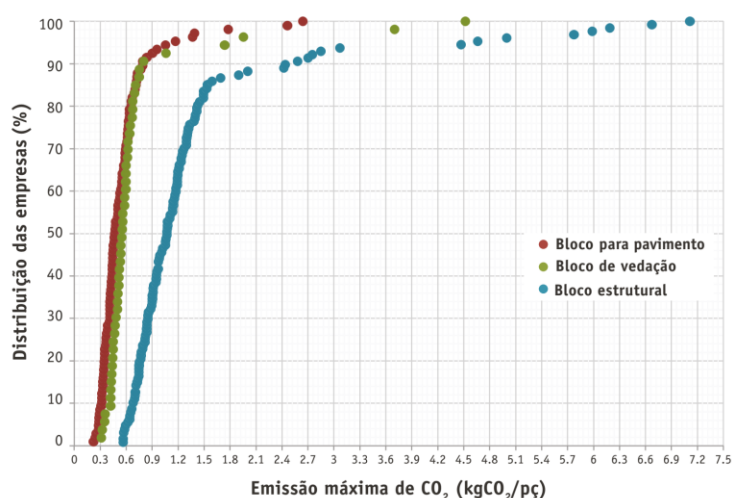
A base de dados de valores genéricos a ser construída e que deverá ser usada como fonte secundária,



deverá apresentar somente a faixa de variação esperada para os produtos do mercado brasileiro. Assim, quando se realiza um inventário que inclui insumo de fornecedor que não possui declaração ambiental do produto, é necessário considerar explicitamente a incerteza, pois existe a probabilidade do fornecedor ser o melhor ou pior fabricante do mercado. Isto sempre ocorre na etapa inicial do projeto, quando se especifica material em termos genéricos (concreto armado ou aço, por exemplo), sem especificar fornecedor e detalhes (como tipo do cimento – sem estabelecer o exato teor da adição pois isto varia de fornecedor - quantidade do cimento – que depende do fornecedor - no caso de concreto). Assim, neste caso, as pegadas ambientais serão apresentadas como faixas de incerteza (min.-máx.), refletindo o grau de desconhecimento.

O estudo piloto da metodologia foi realizado na cadeia produtiva de componentes de concreto, sob a liderança da Bloco Brasil, Associação Brasileira de Cimento Portland e CBCS e execução e apoio da Universidade de São Paulo (CBCS, 2014). O estudo demonstrou que inventário do ciclo de vida pode ser realizado por profissionais de pequenas e médias empresas, desde que devidamente treinados. Revelou também que as indústrias inventariadas necessitam estruturar e implantar indicadores para água, resíduos e matérias-primas totais de forma a viabilizar um inventário completo. A distribuição de valores das pegadas de CO<sub>2</sub> e energia para diferentes produtos demonstram significativas diferenças entre fabricantes de um mesmo produto. Na amostra cerca de 80% das empresas fabricam blocos com pegada de CO<sub>2</sub> variando 100%. As demais 20% tem performance muito pior, se afastam em até 300% da empresa mais eficiente. Como cada um dos 33 fabricantes envolvidos conhece o seu desempenho em comparação com os competidores, ele identifica o potencial de mitigação em seu processo.

Figura 14 – Distribuição de frequência das emissões máximas de CO<sub>2</sub> por bloco de 19 x 19 x 39 cm..



Fonte: CBCS (2014, p. 88).

A necessidade de simplificar a ACV para escalar seu uso na indústria cresce internacionalmente. O *World Business Council for Sustainable Development*, entidade que reúne uma parcela das maiores empresas do mundo, lançou a iniciativa *Mainstreaming Life-Cycle Analysis for Buildings and Materials*, que é apoiada por grupos como Akzo-Nobel, Lafarge-Holcim e Saint Gobain. O primeiro relatório público do projeto (WBCSD, 2016) concluiu (a) pela necessidade de regras comuns a todos os materiais, que seja robusta e amplamente aceita, em contraposição à miríade de métodos de avaliação ambiental de edifícios e diferenças em regras de categoria de produto; (b) que os resultados das ACVs devem ser publicados em uma linguagem simples de usar e entender; (c) que é necessária a padronização dos fluxos a serem inventariados pela cadeia da construção, o que implica em **redução do número de categorias** de impactos e indicadores. Existe, portanto, uma convergência de interesses entre o WBCSD e a proposta brasileira.

Recentemente a proposta do CBCS recebeu apoio das entidades que coordenam o PBACV da área de materiais de construção (DECONCIC FIESP e ABRAMT) e deverá passar por uma fase de detalhamento técnico, com ampla discussão com a sociedade, seguida de implantação.

## 4.12 Selos, certificados ambientais *versus* declarações ambientais de produto

Observa-se um crescente número de selos ambientais (ou *eco-labels*) para materiais e componentes de construção. Isto evidencia o interesse por informações simples sobre impactos ambientais (HORNE, 2009), como já discutido no item 4.11. Este universo de selos e certificados ambientais é muito diverso. Comum a todos os selos é o fato que estes são ferramentas de comunicação, que visam diferenciar usando o argumento de menor impacto ambiental.

Alguns poucos selos são baseados em avaliações técnicas rigorosas, com critérios conhecidos e discutidos publicamente, avaliações sistemáticas do processo produtivo e acompanhamento do produto no mercado. Este é o caso do FSC (*Forest Stewardship Council*), que identifica madeira explorada de forma a proteger a floresta e os interesses da sociedade. Outros selos são parte de políticas públicas, como os selos de eficiência energética, incluindo o brasileiro PROCEL EDIFICA. Porém, qualquer pessoa ou entidade pode criar um selo, com o critério que julgar conveniente. Em um estudo sistemático realizado pela *Duke University* revelou que 75% dos selos não são baseados em estudos que permitam estimar o benefício ambiental que afirmam gerar (GOLDEN et al., 2010). Uma parcela destes nem mesmo torna público seus critérios e métodos de avaliação: somente a fé dos consumidores justifica a sua existência. Mesmo modelos baseados nas normas ISO podem ser pouco rigorosos.

Até mesmo selos operados seriamente podem servir para *green-washing*. Este é o caso dos selos que tratam de aspectos ambientais específicos, exemplo teor de compostos voláteis, conteúdo de reciclado, etc. mas que nada informam sobre os outros impactos ambientais (RAJAGOPALAN; BILEC; LANDIS, 2011). Poucos destes selos – de materiais aos selos de *green building* – são baseados em ACV (HAAPIO; VIITANIEMI, 2008; WALLHAGEN; GLAUMANN, 2011) e, portanto, não se observa correlação entre a classificação ambiental desses selos e o impacto ambiental dos produtos.

A proliferação de selos de diferentes critérios e formas de comunicação dos resultados aumenta a complexidade e gera confusão (RAJAGOPALAN; BILEC; LANDIS, 2011b). Em uma tentativa de esclarecer sua equipe, a ONU elaborou de um manual específico sobre selos (UNOPS, 2009).

Certamente, a alternativa à profusão de selos é a **declaração ambiental de produto** – DAP (ver exemplo na Tabela 7). Por ser baseada em metodologia universal da ACV, obrigatoriamente inclui múltiplos aspectos ambientais. O formato da DAP é padronizado, facilitando o uso e permitindo comparações mais objetivas. Sendo baseada na ACV, os impactos ambientais são quantitativos, enquanto a maioria dos selos é qualitativo – “passa-não-passa”. Isto torna possível estimar impacto ambiental da construção como um todo. Por estas razões é que as DAPs, emitidas por fabricantes, vêm ganhando espaço no mercado mundial. A simplificação da ACV facilitará o uso generalizado das DAPs. Neste cenário, selos com metodologias proprietárias, terão um caráter complementar.

## 4.13 Agradecimentos

Muitos colegas colaboraram na produção deste texto. Agradeço a todos e destaco alguns. O Geraldo Isaia, pela com sua infinita paciência e incentivo. A Ines Battagin e o Arnaldo Battagin pela leitura atenta e pela correção de dados relativos ao cimento brasileiro. A incansável Gisele Sanches Silva colaborou fazendo perguntas precisas e uma detalhada revisão de estilo e gramática.

Parte dos resultados aqui relatados foram produzidos com a participação do autor, tendo sido apoiados

por vários projetos do CNPq, Capes, Finep e FAPESP.

#### 4.14 Referências

AGBB (ED.). **Health-related Evaluation Procedure for Volatile Organic Compounds Emissions (VVOC, VOC and SVOC) from Building Products** AgBB Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten, , fev. 2015. Disponível em:

<[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/dokumente/agbb\\_evaluation\\_schem\\_e\\_2015.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/dokumente/agbb_evaluation_schem_e_2015.pdf)>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2016**: Conjuntura dos Recursos Hídricos. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016. Disponível em:

<<http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf>>.

ALLWOOD, J. M. et al. **Going on a metal diet: using less liquid metal to deliver the same services in order to save energy and carbon**. Cambridge: WellMet2050, 2011.

ANGULO, S. C. et al. On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 43, n. 4, p. 519–528, 2010.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE. **Cement and Structural Concrete: Life Cycle Inventory Update #2**. Ottawa: CEMENT ASSOCIATION OF CANADA, 2005. Disponível em:

<[https://calculatelca.com/wp-content/themes/athenasoftware/images/LCA%20Reports/Cement\\_And\\_Structural\\_Concrete.pdf](https://calculatelca.com/wp-content/themes/athenasoftware/images/LCA%20Reports/Cement_And_Structural_Concrete.pdf)>.

BALDI, A. et al. **A FISPQ e a Responsabilidade Social das Empresas (FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS)**. São Paulo: Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, maio 2012.

BECKER, L. et al. Leaching behaviour of wood treated with creosote. **Chemosphere**, v. 42, n. 3, p. 301–308, fev. 2001.

BEISER, V. **The Deadly Global War for Sand**. Disponível em: <<http://www.wired.com/2015/03/illegal-sand-mining/>>. Acesso em: 6 ago. 2016.

BENGTSSON, J.; HOWARD, N.; KNEPPERS, B. **Weighting of Environmental Impacts in Australia**. Sidney: Building Product Innovation Council, nov. 2010.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH. **STANDARD METHOD FOR THE TESTING AND EVALUATION OF VOLATILE ORGANIC CHEMICAL EMISSIONS FROM INDOOR SOURCES USING ENVIRONMENTAL CHAMBER** Environmental Health Laboratory Branch , California Department of Public Health, , fev. 2010.

Disponível em: <[http://www.cdph.ca.gov/programs/IAQ/Documents/cdph-iaq\\_standardmethod\\_v1\\_1\\_2010%20new1110.pdf](http://www.cdph.ca.gov/programs/IAQ/Documents/cdph-iaq_standardmethod_v1_1_2010%20new1110.pdf)>

CAMPAGNOLO, D. et al. VOCs and aldehydes source identification in European office buildings - The OFFICAIR study. **Building and Environment**, v. 115, p. 18–24, abr. 2017.

CBCS. **Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto Relatório Final**. São Paulo: Associação Bloco Brasil, 2014. Disponível em:

<[http://www.blocobrasil.com.br/images/Projetos/CBCS\\_Ciclo\\_Vida/ACV-Modular\\_Blocos-Concreto-v2.pdf](http://www.blocobrasil.com.br/images/Projetos/CBCS_Ciclo_Vida/ACV-Modular_Blocos-Concreto-v2.pdf)>.

CBCS - COMITE DE MATERIAIS. **Uso Sustentável da Madeira na Construção Civil**. São Paulo: CBCS, Agosto 2009. Disponível em:

<[http://www.cbcs.org.br/\\_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS\\_CTMateriais\\_Posicionamento\\_U](http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CTMateriais_Posicionamento_U)

so%20madeira.pdf>.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, set. 2010.

DAMINELI, B. L.; JOHN, V. M. **Avaliando a eco-eficiência do uso de resíduos de forma simplificada**. . In: II SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2011

ECO INSTITUT. **French VOC Label: Émissions dans l'air intérieur\***. Disponível em: <<http://www.eco-institut.de/en/certifications-services/international-labelling/french-voc-label/>>. Acesso em: 8 abr. 2017.

EIKELBOOM, R. T.; RUWIEL, E.; GOUMANS, J. J. J. M. The building materials decree: an example of a Dutch regulation based on the potential impact of materials on the environment. **Waste Management**, v. 21, n. 3, p. 295–302, jun. 2001.

EKVALL, T.; FINNVEDEN, G. Allocation in ISO 14041--a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 3, p. 197–208, jun. 2001.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2016.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf)>.

EUROPEAN COMMISSION. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook: framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators**. Luxembourg: Publications Office, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN/TS 16637-1 Construction Products - Assessment of Release of Dangerous Substances - Part 1: Guidance for the Determination of Leaching Tests and Additional Testing Steps**, 2014.

EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. **on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain paints and varnishes and vehicle refinishing products and amending Directive 1999/13/EC**, 21 abr. 2004. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32004L0042&from=EN>>

GARTISER, S. et al. Results from a round robin test for the ecotoxicological evaluation of construction products using two leaching tests and an aquatic test battery. **Chemosphere**, v. 175, p. 138–146, maio 2017.

GOLDEN, J. S. et al. **An Overview of Ecolabels and Sustainability Certifications in the Global Marketplace**. Durham,: Corporate Sustainability Initiative Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions Duke University, out. 2010. Disponível em: <<http://center.sustainability.duke.edu/sites/default/files/documents/ecolabelsreport.pdf>>.

GRAEDEL, T. E. et al. What Do We Know About Metal Recycling Rates? **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 3, p. 355–366, 1 jun. 2011.

HAAPIO, A.; VIITANIEMI, P. A critical review of building environmental assessment tools. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 28, n. 7, p. 469–482, out. 2008.

HABERT, G. et al. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 6, p. 364–376, abr. 2010.

HANSSON, P. **The Sink-Effect in Indoor Materials: Mathematical Modelling and Experimental Studies**. Stockholm: KTH, 2003.

HENDRICKSON, C. et al. Economic Input-Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment. **Env. Sci. & Tech. Policy Analysis**, v. 32, n. 7, p. 184 A-191 A, 1 abr. 1998.

HIEDERER, R.; JOINT RESEARCH CENTRE. **International reference life cycle data system (ILCD) handbook: general guide for life cycle assessment: provisions and action steps**. Luxembourg: European Commission Publications Office, 2011.

HJELMAR, O. et al. **Robustness validation of two harmonized European leaching tests for assessment of the leaching of construction products, including waste-based construction materials**. WASCON 2012 Proceedings. **Anais...** In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE MANAGEMENT OF WASTE AND RECYCLED MATERIALS IN CONSTRUCTION. Gothenburg, Sweden, : ISCOWA and SGI, 30 jun. 2012

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M. The water footprint of humanity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 9, p. 3232–3237, 28 fev. 2012.

HORNE, R. E. Limits to labels: The role of eco-labels in the assessment of product sustainability and routes to sustainable consumption. **International Journal of Consumer Studies**, v. 33, n. 2, p. 175–182, 1 mar. 2009.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 6, p. 2189–2196, 15 mar. 2010.

INDUSTRIAL MINERALS ASSOCIATION EUROPE. **Process Data set: Calcium carbonate > 63 microns; Production; at plant**: European reference Life Cycle Database. [s.l.] European Comission Joint Research Center, 14 set. 2012. Disponível em: <<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6006d87e-ccee-42b1-b203-f67c7c0bad97&version=03.00.000>>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14046:2014 - Environmental management - - Water footprint -- Principles, requirements and guidelines**, 2014. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/43263.html>>. Acesso em: 16 abr. 2017

INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM (ILCD). **Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps**. 1st. ed. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2010.

IPCC. **Climate change 2007: Synthesis report**: Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008.

ISO 16000-1. **Indoor air -- Part 1: General aspects of sampling strategy**, 2004.

JACOB, J. S.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. Análise da lixiviação dos metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados. In: **Sustentabilidade do Ambiente Construído. O que você tem com isso**. Habitar. Porto Alegre: ANTAC, 2010. p. 299–311.

JOHN, V. M. **Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e edificações - Emprego do índice de degradação**,. Porto Alegre: Escola de Engenharia, UFRGS, 1987.

JOHN, V. M. **RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo: University of São Paulo, 2000.

KHAN, B. I. et al. Release of Arsenic to the Environment from CCA-Treated Wood. 1. Leaching and Speciation during Service. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 3, p. 988–993, fev. 2006.

KIM, S.; KIM, H.-J. Comparison of formaldehyde emission from building finishing materials at various temperatures in under heating system; ONDOL. **Indoor Air**, v. 15, n. 5, p. 317–325, out. 2005.

KOPPMANN, R. (ED.). **Volatile organic compounds in the atmosphere**. 1st ed ed. Oxford ; Ames, Iowa:

© V.M. JOHN, USP (2017)

Blackwell Pub, 2007.

KRAUSMANN, F. et al. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. **Ecological Economics**, v. 68, n. 10, p. 2696–2705, 15 ago. 2009.

LENZEN, M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories. **Journal of Industrial Ecology**, v. 4, n. 4, p. 127–148, 2001.

LIPPIATT, B. C. **BEES 4.0: Building for Environmental and Economic Sustainability. Technical Manual and User Guide**. Gaithersbury: NIST, 1 ago. 2007. Disponível em: <[http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub\\_id=860108](http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=860108)>. Acesso em: 19 abr. 2011.

MACK-VERGARA, Y. L.; JOHN, V. M. Life cycle water inventory in concrete production—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 227–250, jul. 2017.

MANFREDINI, C.; SATTLER, M. A. Estimativa da energia incorporada a materiais de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 1, p. 23–37, 18 abr. 2008.

MERCER, T. G.; FROSTICK, L. E. Leaching characteristics of CCA-treated wood waste: A UK study. **Science of The Total Environment**, v. 427–428, p. 165–174, jun. 2012.

MULLER, S. et al. Effects of Distribution Choice on the Modeling of Life Cycle Inventory Uncertainty: An Assessment on the Ecoinvent v2.2 Database: Probability Density Functions Choice and Modeling of LCI Uncertainty. **Journal of Industrial Ecology**, abr. 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Materials count the case for material flows analysis**. Washington D.C.: National Academies Press, 2004.

NUMAZAWA, C. T. D. et al. Logging residues and CO<sub>2</sub> of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280–285, jul. 2017.

OECD. **Measuring material flows and resource productivity - Synthesis report**. [s.l.] Organization foreconomic co-operation and development, 2008.

OLIVEIRA, L. S.; PACCA, S. A.; JOHN, V. M. Variability in the life cycle of concrete block CO<sub>2</sub> emissions and cumulative energy demand in the Brazilian Market. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 588–594, jul. 2016.

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al. Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 167–181, dez. 2014.

OPPL, R. New European VOC emissions testing method CEN TS 16516 and CE marking of construction products. **Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft**, v. 74, n. 3, p. 62–68, März 2014.

PAULUS, H.; SCHICK, J.; POIRIER, J.-E. Assessment of dynamic surface leaching of monolithic surface road materials. **Journal of Environmental Management**, v. 176, p. 79–85, jul. 2016.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. DOS. **Produção e sua utilização na construção civil**. Recife: Sebrae, 2008. v. 66

PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera**. PhD Thesis (to be published)—Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya y Universidade de São Paulo, 2014.

QUANTIS CANADA. **Análise Comparativa do Ciclo de Vida das Telhas Cerâmicas versus Telhas de Concreto**. Montreal: ANICER, Agosto 2011. Disponível em: <<http://anicer.com.br/acv/ACV%20Telhas%20Cer%C3%A2micas.pdf>>.

QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Energy and CO<sub>2</sub> from high performance recycled aggregate production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 90, p. 21–33, set. 2014.

RAJAGOPALAN, N.; BILEC, M.; LANDIS, A. **Using an LCA approach to evaluate green labels**. Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. **Anais...** In: PROCEEDINGS OF THE 2011 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE SYSTEMS AND TECHNOLOGY. maio 2011

REDLICH, C. A.; SPARER, J.; CULLEN, M. R. Sick-building syndrome. **The Lancet**, v. 349, n. 9057, p. 1013–1016, 5 abr. 1997.

SAINT-GOBAIN WEBER PORTUGAL, S.A.; ECOCHOICE S.A. **Declaração Ambiental de Produto: weber.therm kal**. Aveiro: Centro Habitat - Plataforma para Construção Sustentável, jul. 2015. Disponível em: <[http://daphabitat.pt/?page\\_id=1527](http://daphabitat.pt/?page_id=1527)>.

SATO, N. M. N.; JOHN, V. M. Durabilidade de componentes da construção. In: **Construção e Meio Ambiente**. Porto Alegre: ANTAC, 2006. v. 7p. 21–57.

SCHANDL, H. et al. **Global Material Flows and Resource Productivity. An Assessment Study**: UNEP International Resource Panel. Paris: United Nations Environment Programme, 2016. Disponível em: <[http://www.scpclearinghouse.org/sites/default/files/16-00169\\_lw\\_globalmaterialflowsunereport\\_final\\_160701.pdf](http://www.scpclearinghouse.org/sites/default/files/16-00169_lw_globalmaterialflowsunereport_final_160701.pdf)>.

SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. **Eco-efficient cements: Potential, economically viable, solutions for a low-CO<sub>2</sub>, cement-based materials industry**. Paris: UN Environment, 2016.

SLOOT, H. V. D. et al. **Harmonisation of leaching test methods in support of EU regulations controlling the beneficial use of industrial slag in construction**. . In: 2<sup>ND</sup> INTERNATIONAL SLAG VALORISATION SYMPOSIUM. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 20/04 2011Disponível em: <[http://www.slag-valorisation-symposium.eu/2011/images/papers/s3\\_2\\_vandersloot.pdf](http://www.slag-valorisation-symposium.eu/2011/images/papers/s3_2_vandersloot.pdf)>

SLOOT, H. A. VAN DER; HEASMAN, L.; QUEVAUVILLER, P. **Harmonization of leaching/extraction tests**. Amsterdam; New York: Elsevier, 1997. v. 70

SOLOMON, S. et al. (EDS.). Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing. In: **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. v. 1.

SOUZA, U. E. L. et al. Perdas de Materiais nos Canteiros de Obras: A Quebra do Mito. **Qualidade**, n. 13, p. 10–15, 1998.

TAYLOR, J. L.; COOPER, P. A. Effect of climatic variables on chromated copper arsenate (CCA) leaching during above-ground exposure. **Holzforschung**, v. 59, n. 4, 1 jan. 2005.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **DIRECTIVE 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives**, 19 nov. 2008. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>>

TOGERÖ, Å. **Leaching of Hazardous Substances from Concrete Constituents and Painted Wood Panels**. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2004.

TOWNSEND, T. et al. Heavy metals in recovered fines from construction and demolition debris recycling facilities in Florida. **Science of The Total Environment**, v. 332, n. 1–3, p. 1–11, 1 out. 2004.

UEMOTO, K. L.; AGOPYAN, V. **Compostos orgânicos voláteis de tintas imobiliárias**. . In: ENTAC 2006. Florianópolis: ANTAC, 2006

UNITED NATIONS (ED.). **Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals: (GHS)**. 4th rev. ed ed. New York: United Nations, 2011.

UNOPS. **A GUIDE TO ENVIRONMENTAL LABELS - for Procurement Practitioners of the United Nations System**. Nova Iorque: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.ungm.org/Publications/sp/Env\\_Labels\\_Guide.pdf](http://www.ungm.org/Publications/sp/Env_Labels_Guide.pdf)>.

VAN DER SLOOT, H. A.; COMANS, R. N. J.; HJELMAR, O. Similarities in the leaching behaviour of trace contaminants from waste, stabilized waste, construction materials and soils. **Science of The Total Environment**, v. 178, n. 1–3, p. 111–126, 19 jan. 1996.

VIEIRA, L. DE B. P.; FIGUEIREDO, A. D. DE. Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. **Waste Management**, v. 56, p. 337–351, out. 2016.

WALLHAGEN, M.; GLAUMANN, M. Design consequences of differences in building assessment tools: a case study. **Building Research & Information**, v. 39, n. 1, p. 16, 2011.

WASSON, S. J. et al. Emissions of chromium, copper, arsenic, and PCDDs/Fs from open burning of CCA-treated wood. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 22, p. 8865–8876, 2005.

WATERS, C. N. et al. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. **Science**, v. 351, n. 6269, p. aad2622-aad2622, 8 jan. 2016.

WBCSD. **The Business Case for the Use of Life Cycle Metrics in Construction & Real Estate**. Geneva: WBCSD, 2016. Disponível em: <<http://www.wbcd.org/contentwbc/download/1930/24581>>.

WBCSD CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **Getting the Numbers Right Project Emissions Report 2014** WBCSD, , 2016. Disponível em: <<http://www.gnr-project.org/>>

WORLD HEALTH ORGANIZATION (ED.). **Who guidelines for indoor air quality: selected pollutants**. Copenhagen: WHO, 2010.