

Avaliação do ciclo de vida do uso de cimento na construção civil residencial brasileira

A construção civil habitacional é um dos maiores consumidores de cimento no Brasil. O cimento demanda grande quantidade de matéria prima e energia, para a sua produção, com emissões nocivas ao meio ambiente. O presente trabalho tem como objetivo quantificar os impactos ambientais relacionados ao uso de cimento na construção habitacional brasileira, por m² de área construída, enfatizando, também, o uso de recursos hídricos ao longo de sua cadeia produtiva. Para esse fim, foram utilizados como referência para os cálculos três projetos habitacionais de padrão popular. Os impactos ambientais do cimento foram estimados com base na avaliação do seu ciclo de vida, pegada hídrica e pegada de escassez hídrica. Os resultados demonstram que os maiores impactos negativos estão relacionados às emissões de gases que provocam mudanças climáticas e ao uso excessivo de recursos hídricos. Por fim, o presente estudo fornece subsídios para melhorias de projetos de arquitetura, processos construtivos e materiais empregados para minimizar os danos ambientais.

Palavras-chave: Construção civil habitacional; Avaliação do ciclo de vida; Pegada hídrica; Pegada de escassez hídrica.

Life cycle assessment of cement use in brazilian residential construction

Housing construction is one of the largest cement consumers in Brazil. Cement requires a large amount of raw material and energy for its production, with emissions harmful to the environment. This work aims to quantify the environmental impacts related to the use of cement in Brazilian housing construction, per square meter of built area, also emphasizing the use of water resources throughout its production chain. For this purpose, three standard housing projects Minha Casa Minha Vida were used as a reference for calculating the quantity of cement, the environmental impacts of cement were determined based on the assessment of its life cycle, water footprint and water scarcity footprint. The results show that the greatest impacts are related to the emissions of gases that cause climate change and the excessive use of water resources. Finally, the present study provides support for improvements in architectural projects, construction processes and materials used, in order to minimize environmental damage.


Keywords: Housing construction; Cement. Life cycle assessment; Water footprint; Water shortage footprint.


Topic: **Construções e Arquitetura Sustentáveis**


Received: **03/11/2021**


Approved: **21/11/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Emmanuel Eduardo Vitorino de Farias 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9681599685223016>
<https://orcid.org/0000-0003-1229-9188>
emmanuel.eduardo@tecnico.ufcg.edu.br

Rui de Oliveira 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0621382505832223>
<https://orcid.org/0000-0002-1972-9809>
ruioliveira@servidor.uepb.edu.br

Mônica Maria Pereira da Silva 
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8972860324282858>
<https://orcid.org/0000-0002-1593-1698>
monicaea@terra.com.br

Giselaine Maria Gomes de Medeiros 
Instituto Federal de Pernambuco, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0114057915171709>
<https://orcid.org/0000-0002-8463-7636>
lainemgm@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0011

Referencing this:

FARIAS, E. E. V.; OLIVEIRA, R.; SILVA, M. M. P.; MEDEIROS, G. M. G..
Avaliação do ciclo de vida do uso de cimento na construção civil
residencial brasileira. **Revista Ibero Americana de Ciências
Ambientais**, v.12, n.11, p.109-125, 2021. DOI:
<http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0011>

INTRODUÇÃO

A construção civil residencial é a atividade que mais consome cimento, tanto no Brasil, quanto no mundo¹ (SNIC, 2011). Depois da água, o concreto é o recurso mais utilizado, sendo o seu consumo per capita anual de aproximadamente três toneladas (GAGG, 2014).

O cimento, além de ser o principal constituinte do concreto, é o componente aglutinante das argamassas, que são amplamente utilizadas em construções residenciais. No Brasil, os fatores associados aos crescimentos populacional e econômico e ao déficit habitacional de 7,7 milhões de moradias (FGV, 2018), contribuirão para que a demanda por cimento continue em ascensão nos próximos anos.

As enormes demandas e a produção do cimento geram preocupações ambientais associadas direta e indiretamente aos processos de fabricação e ao uso do produto, uma vez que sua produção requer quantidades significativas de matérias primas, energia térmica e, conseqüentemente, há emissões de gases associadas ao uso de combustíveis fósseis, além de outros impactos ambientais (FEIZ et al., 2015).

Quanto às emissões associadas à indústria do cimento e ao seu uso, destaca-se a liberação de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂). Esse gás é o principal responsável pelo efeito estufa, contribui para mudanças climáticas e aumento do nível médio dos oceanos. Em nível global, compreendem diminuição da disponibilidade de água no solo e escassez hídrica em regiões que atualmente não enfrentam esses problemas, mudanças extremas do clima, a exemplo de desertificação em umas regiões e tempestades e inundações em outras (BORN et al., 2007).

Além das emissões de CO₂, a fabricação e o uso de cimento geram outros passivos ambientais a serem estudados. Conhecer e quantificar os impactos ambientais relacionados ao uso de cimento na construção civil habitacional brasileira ao longo de sua cadeia produtiva é o primeiro passo para tornar esta atividade mais sustentável. Nesse contexto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta eficaz de análise de uso de recursos naturais e de seus impactos, podendo ser associada a indicadores, como a pegada hídrica (PH) na avaliação de impactos do uso de recursos hídricos.

O presente trabalho tem como objetivo quantificar os impactos ambientais relacionados ao uso de cimento na construção habitacional brasileira, por m² de área construída, enfatizando, também, o uso de recursos hídricos e sua relação com a escassez hídrica ao longo de sua cadeia produtiva.

REVISÃO TEÓRICA

O campo de estudo sobre os impactos ambientais relacionados ao uso de cimento na construção civil habitacional do Brasil é amplo, sendo objeto de avaliação desde a extração da matéria prima, passando pela fabricação, transporte e uso.

Impactos relacionados à produção de cimento Portland

O cimento Portland é obtido pela pulverização do clínquer que é composto essencialmente por

¹ <https://cembureau.eu/news-views/publications/>

silicatos hidratados de cálcio e uma fração de sulfato de cálcio natural (BAUER, 2010). As matérias primas básicas empregadas em seu processo de fabricação são rochas calcárias, areia e argila, ocasionalmente podem ter adição de minério de ferro, bauxita, xisto, dentre outros, conforme a necessidade de adequar sua composição química aos requisitos técnicos exigidos ao produto (MORETTI et al., 2017).

Das emissões antrópicas de CO₂, em escala global, a indústria do cimento é responsável por 5 a 7% (BARCELO et al., 2013). A formação do clínquer é o processo de fabricação que demanda maior quantidade de energia térmica, liberando parte significativa das emissões, pois a temperatura operacional do forno é da ordem de 1.450 °C (TORRALBA et al., 2014). A produção de 1t de cimento consome de 2,93 a 6,28 GJ de energia térmica e 65 a 141 kWh de energia elétrica e 1,5 t de matéria prima (STAFFORD et al., 2016).

No Brasil, as emissões referentes à indústria cimentícia correspondem a 2,6 % do total, índice alcançado devido à modernização da indústria nacional que ocorreu no período de 1990 a 2014, quando as emissões passaram de 700 para 564 kg CO₂/t cimento, correspondendo à redução de 18%².

O processo de fabricação de cimento no Brasil tornou-se menos nocivo ao meio ambiente, devido às seguintes iniciativas: melhorias na eficiência energética; recuperação de calor residual; redução da relação clínquer/cimento e uso de matérias-primas alternativas. Estas adições diminuem o consumo de clínquer, conseqüentemente a queima de combustível e as emissões de CO₂ (ABCP, 2019); substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas de energia (MIKULČIĆ et al., 2016). O emprego de combustíveis alternativos provenientes de resíduos diminui o uso de combustíveis fósseis, sua incineração possibilita uma redução líquida significativa de CO₂; outra vantagem é que não são gerados resíduos sólidos, uma vez que as cinzas são completamente incorporadas ao clínquer (HABERT et al., 2010).

Fatores que influenciam a demanda por cimento

O cimento é um produto industrial indispensável ao desenvolvimento econômico e essencial para a execução de obras de infraestrutura e edificações. Sua demanda aumenta em função da economia e do crescimento populacional.

O produto interno bruto (PIB) é um indicador muito utilizado para mensurar a economia de um país ou região. Há relação entre PIB e a produção de cimento. Na Tabela 1 são apresentados dados referentes à produção de cimento, população e PIB, dos países que fazem parte das 19 maiores economias do mundo mais a União Europeia, denominado de grupo dos 20 ou G20.

Conforme análise dos valores descritos na Tabela 1, os países com maiores PIB, tendem a ter as maiores produções de cimento. Em uma análise mais detalhada, Uwasu et al. (2014) comprovaram que existe uma relação matemática em forma de U invertido, entre a produção de cimento e o PIB. Foi verificado que a produção de cimento segue a curva Kuznets ambiental. Como a demanda está intimamente associada às atividades econômicas, espera-se que a produção de cimento continue crescendo em escala global, juntamente com o crescimento econômico nas próximas décadas.

² <https://www.wbcscement.org/index.html>

Déficit habitacional no Brasil e o consumo de cimento

O déficit habitacional é uma das consequências de políticas públicas habitacionais ineficientes e do crescimento populacional, pois o número de novas moradias não acompanhou o aumento populacional. Para superar este problema serão necessários novos investimentos no setor, consequentemente a demanda por cimento tende a crescer. Segundo levantamento do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), no ano de 2015, o Brasil tinha 68,2 milhões de imóveis habitacionais, 86% desses localizados na zona urbana e 14 % na zona rural; estimando-se que o déficit habitacional seja de 7,7 milhões de moradias (FGV, 2018). Na Tabela 2 estão apresentados os dados detalhados referentes à habitação e seus respectivos déficits por região.

Tabela 1: População, produção de cimento e PIB dos países integrantes do G20, em 2017.

País	População ⁽ⁱ⁾ (habitantes)	Produção de Cimento		PIB	
		Total ⁽ⁱⁱ⁾ (milhões de t)	Per capita (kg.hab ⁻¹)	Total ⁽ⁱⁱⁱ⁾ (Bilhões de Dólares)	Per capita (Dólares.hab ⁻¹)
África do Sul	57.000.451	13,6	238,59	348,87	6.120,51
Alemanha	82.657.002	34,0	411,34	3.693,20	44.681,08
Arábia Saudita	33.099.147	63,0	1.903,37	688,59	20.803,74
Argentina	44.044.811	12,2	276,99	642,70	14.591,86
Austrália	24.601.860	9,8	398,34	1.330,80	54.093,60
Brasil	207.833.831	54,0	259,82	2.053,59	9.880,95
Canadá	36.540.268	12,7	347,56	1.646,87	45.069,93
China	1.386.395.000	2.316,0	1.670,52	12.143,49	8.759,04
Coreia do Sul	51.466.201	62,6	1.216,33	1.530,75	29.742,84
Estados Unidos	325.147.121	88,5	272,18	19.485,39	59.927,93
França	66.865.144	16,9	252,75	2.586,29	38.679,13
Índia	1.338.658.835	280,0	209,16	2.652,55	1.981,50
Indonésia	264.645.886	69,0	260,73	1.015,42	3.836,91
Itália	60.536.709	19,3	318,81	1.946,57	32.155,21
Japão	126.785.797	55,2	435,38	4.859,95	38.331,98
México	124.777.324	46,1	369,46	1.158,07	9.281,10
Reino Unido	66.058.859	9,4	142,30	2.637,87	39.932,06
Rússia	144.496.740	58,0	401,39	1.578,62	10.750,59
Turquia	81.101.892	80,6	993,81	851,55	10.499,75
União Europeia	512.191.098	175,1	341,86	17.344,92	33.864,17
		Média	536,04		

Fonte: ⁽ⁱ⁾ The World Bank Group³; ⁽ⁱⁱ⁾ Cembureau; ⁽ⁱⁱⁱ⁾ The World Bank Group⁴.

Tabela 2: Quantitativo de moradias e déficit habitacional, por regiões brasileiras.

Região	Total de habitações em 2015 ^(iv)		Déficit habitacional em 2017 ^(v)	
	Quantidade	(%)	Total	(%)
Norte	5.094.579	7,5	738949	9,51
Nordeste	17.836.708	26,2	2046678	26,34
Sul	10.417.030	15,3	1052089	13,54
Sudeste	29.473.278	43,3	3260387	41,96
Centro Oeste	5.215.298	7,7	672124	8,65
TOTAL	68.036.893	100,0	7.770.227	100,00

Fonte: ^(iv) IBGE⁵; ^(v) FVG (2018).

No Brasil os tipos de domicílios mais comuns são casas, apartamentos e cômodos (edificação com apenas uma dependência), com o predomínio de edificações do tipo casa (Tabela 3). Apesar do número expressivo de imóveis residenciais, o déficit habitacional ainda corresponde a mais de 11% do número de

³ https://data.worldbank.org/indicador/ny.gdp.pcap.cd?most_recent_year_desc=true

⁴ <https://data.worldbank.org/indicador/sp.pop.totl>

⁵ <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/habitacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?=&t=resultados>

residências existentes. O déficit habitacional é um problema histórico no Brasil, com parcela significativa da população sem casa própria. Esta população se vê obrigada a pagar aluguel, comprometendo sua renda com esta despesa (FGV, 2018). As famílias que não podem arcar com este custo, são obrigadas a habitarem imóveis em condições precárias, geralmente em área de risco, afetando a sua saúde e segurança.

Tabela 3: Quantitativo de moradias por tipo e região brasileira, ano 2015.

Tipo de Habitação	Região do País					Total	%
	Norte	Nordeste	Sul	Sudeste	Centro Oeste		
Casa	4.805.357	16.698.193	9.075.745	24.753.256	4.728.877	60.061.428	88,28
Apartamento	253.173	1.110.386	1.329.351	4.660.952	456.971	7.810.833	11,48
Cômodo	36.049	28.129	11.934	59.070	29.450	164.632	0,24

Fonte: IBGE.

Para reduzir o déficit habitacional e criar mecanismos de incentivo à produção e à aquisição de novas unidades habitacionais, no início do ano de 2009, o governo federal lançou o programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). Posteriormente, esta iniciativa se tornou a lei 11.977/2009. Este programa habitacional é o mais efetivo, desde a extinção do Banco Nacional de Habitação em 1986. Atualmente, o quantitativo de imóveis distribuído pelo PMCMV para famílias de baixa renda, foi tão expressivo que alterou positivamente a paisagem das periferias do país (BARAVELLI, 2015).

Em função do PMCMV, o crédito imobiliário passou de, aproximadamente, 2% em relação ao PIB em 2009 para aproximadamente 10% em 2018, o total de imóveis contratados neste período foi de aproximadamente 5 milhões de unidades (FGV, 2018). Quanto ao consumo de cimento, seu principal uso é em obras de edificação e infraestrutura, sendo seus respectivos percentuais de uso apresentados na Tabela 4.

Tabela 1: Utilização de cimento no Brasil e no mundo.

Utilização de cimento em	Brasil ^(vi) (%)	Mundial ^(vii) (%)
Edificações residenciais	56,7	47,0
Edificações não residenciais	16,0	32,0
Infraestrutura	24,9	21,0
Outros	2,4	-

Fontes: SNIC (2011); CEMBUREAU.

A construção para fins habitacionais é o principal consumidor deste produto, tanto no Brasil como no mundo. O tipo de cimento mais fabricado no Brasil é o CP-II, com 63% da produção, enquanto os tipos CP-I, CP-III, CP-IV e CP-V juntos correspondem a 37% (SNIC, 2019).

Relação entre a Avaliação do Ciclo de Vida e a Pegada Hídrica

A ACV é uma técnica utilizada para avaliar os impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva de um produto, processo ou serviço. No caso específico de impactos relacionados à água doce, a norma ABNT (2017) emprega o conceito de Pegada Hídrica (PH), baseado em uma abordagem de ACV. Entretanto, a incompatibilidade dos resultados nos indicadores que associam ACV e PH para caracterizar os impactos, torna difícil a sua aplicação. Para superar essa dificuldade Boulay et al. (2017) propõem Avaliação do Ciclo de

Vida do Uso da Água (ACVUA) (Water Use in Life Cycle Assessment - WULCA), com o indicador Pegada de Escassez Hídrica (PEH), na categoria de impacto esgotamento de recursos.

A ACVUA quantifica o potencial de privação de água, tanto para seres humanos quanto para os ecossistemas, servindo para calcular a pontuação de impacto do consumo de água no ponto médio da ACV ou para calcular uma PEH de acordo com a NBR ISO 14046.

O método é baseado na água disponível restante após o uso, por unidade de superfície em uma determinada bacia hidrográfica em relação à média mundial, depois que as demandas do ecossistema humano e aquático forem atendidas (BOULAY et al., 2017). A necessidade de água do meio ambiente avalia os requisitos mínimos de água como uma fração do fluxo disponível para manter os ecossistemas de água doce em condições equilibradas para manter a vida no corpo hídrico (BOULAY et al., 2017). Nesse caso, é considerado o potencial de privar outro usuário pelo uso da água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1 é apresentado o delineamento da pesquisa. O procedimento metodológico foi realizado em quatro etapas. Na primeira etapa foram escolhidos três projetos habitacionais, que são representativos do padrão construtivo predominante no país. Na segunda etapa, tomando como base os projetos referências, foi calculado o quantitativo total de cimento necessário à execução da obra, sendo determinada a massa de cimento por m² de área construída. Na terceira etapa foi obtida a PH referente ao uso de cimento nos projetos analisados, considerando-se a fabricação de cimento e o seu uso na obra, sendo determinada a PEH. Na quarta etapa foi determinada a ACV referente ao uso de cimento na construção civil habitacional, ponderando-se, dentre outros impactos, o uso de recursos hídricos e a escassez hídrica relacionada.

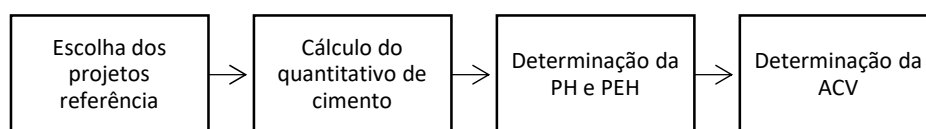


Figura 1: Delineamento da pesquisa.

Escolha dos projetos habitacionais referência

Com a finalidade de representar os imóveis habitacionais predominantes no país, os projetos de arquitetura escolhidos levaram em consideração os padrões de acabamento, materiais de construção e técnicas construtivas, que melhor representam a maioria dos imóveis residenciais no país. Neste contexto, os projetos utilizados pela Caixa Econômica Federal oferecem representatividade, pois são utilizados como referência em estudos para estimar o custo por m² de área construída. Dados que servem de base para avaliação do custo de construção dos imóveis a serem financiados pelo banco no PMCMV, e utilizado para avaliar os custos de imóveis existentes. Estes projetos representam bem a maioria das construções habitacionais no Brasil. A descrição das características construtivas dos imóveis utilizados como referência nesse trabalho é apresentada no Quadro 1 e suas características físicas na Tabela 5.

Nas Figuras 2 a 4, estão apresentadas as plantas baixas dos projetos de arquitetura utilizados como

referências de cálculo de quantitativos neste trabalho, os demais detalhes do projeto de arquitetura estão disponíveis em Caixa Econômica Federal (2018b).

Quadro 1: Características construtivas dos projetos referências usadas na pesquisa.

Projetos de referência	Sigla SINAPI	Descrição
Projeto 1	R1-2B-43C.2017	Edificação residencial unifamiliar (casa) térrea com sala, 2 quartos, banheiro, cozinha e tanque externo sem cobertura. Planta acessível para PCR (Pessoa em Cadeira de Rodas)
Projeto 2	R4-2B-44BE.2017	Edificação residencial multifamiliar (bloco) de 4 pavimentos-tipo sem elevador. Cada pavimento com 4 apartamentos, totalizando 16 unidades habitacionais, cada uma composta por sala, 2 quartos, banheiro, cozinha e área de serviço. Inclui abrigo de medidores de gás e 1 vaga de garagem descoberta por unidade (piso externo). Todas as unidades possuem plantas acessíveis para PCR (Pessoa em Cadeira de Rodas)
Projeto 3	R16-3N-78C.2017	Descrição: edificação residencial multifamiliar (bloco) de 18 pavimentos (16 pavimentos-tipo, 1 piloti térreo e um subsolo de garagem). Com 2 elevadores, 128 vagas de garagem e depósito de lixo no subsolo; hall de entrada, salão de festas, 2 lavabos, copa, banheiro de serviço e depósito nos pilotis; guarita e abrigo de medidores de gás. Cada pavimento-tipo com 4 apartamentos, totalizando 64 unidades habitacionais, cada uma composta por sala, varanda, 1 suíte, 2 quartos, circulação, 3 banheiros, cozinha e área de serviço.

Fonte: Caixa Econômica Federal (2018b).

Tabela 5: Características físicas dos projetos referências usadas na pesquisa.

Características Físicas	Projeto1	Projeto2	Projeto3
Quantidade de pavimento tipo	1	4	16
Quantidade total de pavimentos	1	4	18
Quantidade de apartamentos por pavimento	1	4	4
Quantidade total de apartamentos	1	16	64
Área do apartamento tipo	43,61	44,49	78,95
Área total dos apartamentos	-	714,14	5.052,91
Áreas comuns (garagens, pilotis, escadas)	-	974,83	4.879,52
Área de circulação e hall	-	81,27	679,60
Área total	43,61	1.770,24	10.612,03

Fonte: Caixa Econômica Federal (2018b).

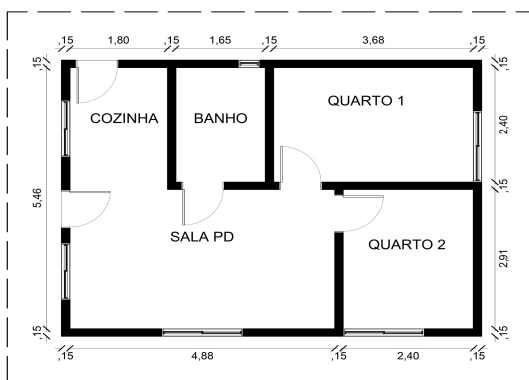


Figura 2: Planta baixa do projeto de referência 1. Fonte: Caixa Econômica Federal (2018b)

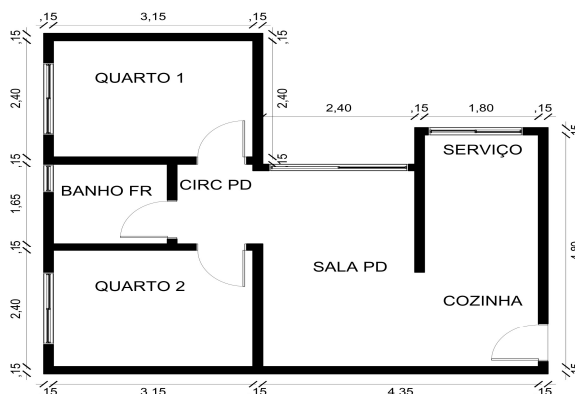


Figura 3: Planta baixa do apartamento tipo, do projeto de referência 2. Fonte: Caixa Econômica Federal (2018b).

Levantamento do quantitativo de cimento

O levantamento do quantitativo de cimento seguiu a metodologia do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) (GUIMARAES, 2018a). O SINAPI é administrado pela Caixa Econômica Federal que publica periodicamente relatórios com a ficha técnica de caracterização para diferentes projetos padrões com diferentes características físicas (área, tipo de acabamento e quantidade de pavimentos) e informações sobre os serviços orçados e não orçados, com evolução dos custos da construção civil por m² de construção para as 27 capitais brasileiras. Além disto, o SINAPI (CAIXA, 2018b) ainda publica os preços dos insumos e serviços com suas respectivas composições de custos, sendo esses dados utilizados na elaboração de orçamentos de obras públicas.



Figura 4: Planta baixa do apartamento tipo do projeto de referência 3. **Fonte:** Caixa Econômica Federal (2018b).

A Lei nº 11.514, de 13 de agosto de 2007, em seu artigo Art. 115 estabelece que

Art. 115. Os custos unitários de materiais e serviços de obras executadas com recursos dos orçamentos da União não poderão ser superiores à mediana daqueles constantes do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI, mantido pela Caixa Econômica Federal, que deverá disponibilizar tais informações na internet.

Todas as obras financiadas com recursos da União têm seus orçamentos elaborados com base no sistema SINAPI e nas suas composições de custos, o que atribui representatividade aos dados disponibilizados pela CAIXA e aos projetos utilizados como referência. Cada serviço tem seu Custo Unitário Básico (CUB) determinado a partir de composições de custos SINAPI. A composição de custos consiste no conjunto de insumos e seus respectivos coeficientes de produtividade e custos unitários necessários para executar uma unidade de serviço.

O levantamento do consumo de cimento empregou etapas em comum com a metodologia de elaboração de orçamento de obras, tomando como base as composições de custos unitários do SINAPI (CAIXA, 2018b), conforme descrito na sequência e na Figura 5: avaliar o projeto de arquitetura e projetos complementares; levantar os serviços necessários para a execução da obra, com base nos projetos; calcular o quantitativo de serviços para a execução da obra, com os dados levantados nos projetos. Por exemplo, o cálculo da área de revestimento cerâmico para revestir o piso, cuja unidade é em m²; com base na composição unitária SINAPI do serviço e de seus coeficientes de produtividade, as quantidades de cimento necessárias para executar o serviço, serão determinadas, pelo produto entre o quantitativo do serviço e os

respectivos coeficientes de produtividade da composição de custos.

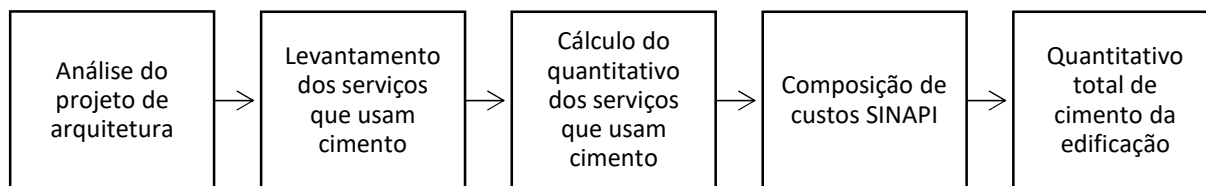


Figura 5: Fluxograma das etapas para obtenção dos quantitativos totais de cimento do projeto.

O tipo de cimento Portland considerado neste trabalho é o CP II-32, pois sua produção nacional corresponde a 63% do total, sendo o tipo mais usado no país (SNIC, 2019), seu uso é destinado a aplicações gerais, principalmente edificações.

Neste trabalho foi levantado o quantitativo de cimento por edificação, pois, os projetos referência 2 e 3 são imóveis com vários pavimentos, com mais de uma unidade habitacional (UH) por andar, assim áreas de uso comum como halls, garagens, reservatórios, pilotis, dentre outras, foram consideradas no levantamento e seus quantitativos foram divididos pelo número de apartamentos, sendo os insumos referentes às áreas comuns considerados proporcionalmente em cada UH. Para tornar os resultados mais abrangentes o consumo de cimento de cada UH foi dividido pela sua área, obtendo-se, assim o consumo de cimento por m² de área construída.

Levantamento e aplicação das pegadas hídrica e de escassez hídrica

Para determinar a PH referente ao uso de cimento por m² de área construída, foram consideradas a PH da fabricação do produto e a do uso de água no preparo de concretos e argamassas. Já a PEH foi calculada em função da PH e do coeficiente CF, cujos valores para diferentes cenários de avaliação e países estão disponíveis em Wulca (2019); no caso do Brasil, para uso não agrícola, seu valor é de 1,88 (WULCA, 2019), sendo este adotado no presente estudo.

No caso da fabricação de cimento Portland as PH azul e cinza e a PEH por m² de área construída foram obtidas tomando como base o trabalho de Gerbens-Leenes et al. (2018), cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: PH azul e cinza da fabricação de cimento.

PH		Cimento Portland	
		Comum (L.kg ⁻¹)	Composto (L.kg ⁻¹)
PH Azul	Energia	1,49	2,67
	Fabricação	0,68	3,22
	Total	2,17	5,89
PH Cinza		210	210

Fonte: Adaptado de Gerbens-leenes et al. (2018).

A PH azul referente ao preparo de concretos e argamassas foi obtida através do produto entre o quantitativo de cimento necessário para execução do serviço e o respectivo fator água/ cimento da Tabela 7.

Tabela 7: Fatores água/cimento para o preparo de concretos e argamassas adotados na pesquisa.

Argamassas			Concretos	
Constituintes	Traço	Fator água/cimento ^(VII)	Resistência à compressão (MPa)	Fator água/cimento
Cimento: areia	1:3	0,47	≥ C40 ^(IX)	0,45
Cimento: areia	1:4	0,66	≥ C30 ^(IX)	0,55
Cimento: areia	1:5	0,64	≥ C25 ^(IX)	0,60
Cimento: areia	1:6	0,87	≥ C20 ^(IX)	0,65
Cimento: cal: areia	1:2:8 a 1:3:12	0,88	<C20 ^(IX)	0,70

Fonte: Adaptado de Fiorito (2010), ABNT (2015), Bauer (2010).

O cálculo da PEH é feito através do produto entre o uso de água no inventário e um Fator de Caracterização (CF) da seguinte maneira:

$$PEH = \text{Uso de Água} \times CF \quad \text{Eq.1}$$

$$ADR = \frac{\text{Disponibilidade} - UHA - NEA}{\text{Área da Bacia}} \quad \text{Eq. 2}$$

$$CF = \frac{ADR_{\text{Mundo}}}{ADR}; \text{ para a Demanda} < \text{Disponibilidade} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: PEH pegada de escassez hídrica (m³ H2O eq.); ADR água doce disponível restante na bacia hidrográfica por unidade de área da bacia; ADRMundo água doce disponível restante no mundo por unidade de área das bacias hidrográficas do mundo; Disponibilidade é volume de água disponível na bacia hidrográfica (m³ ou m³/s de H2O); UHA uso de água pelos seres humanos que não retorna para a bacia (m³ ou m³/s de H2O); NEA necessidade de água do meio ambiente (m³ ou m³/s de H2O); CF é o fator de caracterização.

O termo uso de água é o consumo de recursos hídricos direto ou indireto incorporado ao produto, serviço ou processo que não retorna à bacia hidrográfica, obtido no inventário de ACV. Observa-se que esta definição é a mesma proposta por Hoekstra e Hung (2002), levando em consideração que o inventário de ACV pode ser utilizado para a obtenção da PH, conforme a seguinte relação:

$$PEH = PH.CF \quad \text{Eq. 4}$$

Se a demanda ≥ disponibilidade CF=100, Se ADR>10.ADRMundo então, CF=0,01.

Os valores de CF ficam no intervalo de 0,1 a 100. Valores de CF <1 ocorrem em regiões com menos problemas de escassez que a média mundial, valor igual a 1 correspondente a uma região com a mesma quantidade de água restante por área dentro de um determinado período de tempo que a média mundial, valores maiores que 1, por exemplo 10, ocorrem em regiões onde há 10 vezes menos água restante por área dentro de um determinado período de tempo que a média mundial ou que leva 10 vezes mais tempo na superfície para gerar uma quantidade de água não utilizada nesta região do que a média mundial (BOULAY et al., 2017).

Levantamento e aplicação da avaliação do ciclo de vida

A ACV será empregada para determinar os impactos ambientais negativos referentes ao uso de cimento na construção civil habitacional, sendo avaliados os impactos atmosféricos, esgotamento de recursos e ecotoxicidade.

Os impactos atmosféricos estão relacionados às atividades antrópicas, geralmente associadas a emissões de gases, que ocasionam mudanças climáticas. Os impactos de esgotamento de recursos estão ligados ao uso de recursos não biológicos, tais como: combustíveis fósseis, minerais, metais, água, dentre

outros, sendo uma medida da escassez de uma substância. A avaliação da ecotoxicidade se baseia em concentrações máximas toleráveis em água para os ecossistemas e em humanos, pois a ocorrência de algumas substâncias como metais pesados, pode resultar em impactos sobre o ecossistema⁶.

A ACV relativa aos impactos do uso de cimento Portland na construção civil será feita em função da ACV do cimento tomando como base o trabalho de Stafford et al. (2016), sendo seus valores mostrados na Tabela 8. Já a avaliação de escassez hídrica foi obtida no cálculo da PEH, cuja metodologia de cálculo já foi descrita neste trabalho.

A ACV estuda e quantifica as emissões ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou sistemas e seus impactos físico-químicos, biológicos e sociais. Isso gera uma grande variedade de dados, expresso com sua respectiva unidade. Compostos químicos diferentes podem gerar qualitativamente o mesmo tipo de impacto, entretanto concentrações iguais de espécies químicas diferentes geram quantitativamente danos ambientais distintos, por exemplo, 1 kg de CH₄ pode gerar impacto equivalente a 25 kg de CO₂ (STAFFORD et al., 2016).

Tabela 8: Valores dos impactos da ACV por tonelada de cimento Portland produzida.

Impactos	Categoria de impacto	Unidade	Brasil
Atmosféricos	Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	2,16E+03
	Destruição da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	2,54E-04
	Formação de oxidantes fotoquímicos	kg COVNM eq	1,18E+01
	Formação de material particulado	kg MP ₁₀ eq	3,32E+01
Esgotamento de recursos	Acidificação do solo	kg SO ₂ eq	7,86E+00
	Eutrofização de água doce	kg P eq	1,38E-01
	Eutrofização marinha	kg N eq	4,16E-01
	Depleção de metal	kg Fe eq	5,27E+01
Toxicidade	Depleção de fósseis	kg Petr eq	7,36E+02
	Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	2,69E+02
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	1,86E-01
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DB eq	3,62E+00
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	3,94E+00

Fonte: Adaptado de Stafford et al. (2016).

Para contornar esta dificuldade e padronizar os dados de emissão da ACV, os impactos são categorizados e suas unidades padronizadas; para o caso específico de emissão de produtos químicos, sua unidade é expressa como massa equivalente de uma substância padrão para representar uma categoria de impacto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Consumo de cimento nos projetos habitacionais de referência

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados referentes ao levantamento de quantitativos de cimento por edificação, por UH e área construída, dos projetos referência. Analisando os dados da Tabela 9, constata-se que o consumo de cimento médio por m² da UH é de 153,31 (kg.m⁻².un⁻¹). Pode-se observar que quanto maior o número de pavimentos, maior é o consumo de cimento por m² de área construída. O acréscimo do número de pavimentos demanda o aumento das seções transversais das peças estruturais de

⁶ https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/openLCA_LCIA_METHODS-v.1.5.6.pdf

concreto armado, pois, além das cargas do peso próprio, e cargas acidentais, a altura da edificação implica no acréscimo da ação da força dos ventos atuando na estrutura.

Tabela 9: Consumo de cimento nos projetos referência.

Consumo de cimento	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
Edificação (kg)	5.356,77	94.786,33	1.028.215,48
UH (kg.un ⁻¹)	5.356,77	5.924,15	16.065,87
Por área da UH (kg.m ⁻² .un ⁻¹)	122,83	133,16	203,49

Outro fator importante é que o aumento da quantidade de pavimentos e de UH por imóvel, demanda o incremento de áreas comuns, sobretudo para garagens, inclusive pode haver vários pavimentos apenas para esta finalidade. Essa constatação pode ser observada no Projeto 3 que possui 18 pavimentos, sendo dois dedicados a garagem, devido a isto o consumo de cimento neste, foi 66% maior que no Projeto 1, a diferença entre o Projeto 2 para o Projeto 1 foi de apenas 8,4%.

Pegada hídrica do cimento em projetos habitacionais no Brasil

Para a obtenção da PH referente do uso de cimento na construção civil habitacional, foi considerada a PH da fabricação do cimento e a PH referente à preparação de concretos e argamassas.

As pegadas hídricas azul e cinza da fabricação do cimento foram determinadas com base nos dados da Tabela 6 e os quantitativos de consumo de cimento da Tabela 9. A PH azul referente ao uso de água para preparação de concreto e argamassas foi obtida a partir dos fatores água/cimento da Tabela 7 e o consumo de cimento da Tabela 9. Na Tabela 10 estão apresentados os resultados das pegadas hídricas azul e cinza relativos ao uso de cimento na construção civil, por m² de área construída e seus percentuais.

Tabela 10: PH azul e cinza referentes ao uso de cimento em projetos habitacionais.

Tipo de PH	Etapa	Projeto 1		Projeto 2		Projeto 3	
		L.m ⁻²	%	L.m ⁻²	%	L.m ⁻²	%
Azul	Fabricação	723,49	2,72	784,29	2,72	1198,58	2,72
Azul	Execução - concreto	40,07	0,15	62,76	0,22	84,63	0,19
Azul	Execução - argamassa	43,31	0,16	45,01	0,16	50,12	0,11
Azul	Total = Fabricação + Execução	806,87	3,03	892,06	3,09	1333,33	3,03
Cinza	Fabricação do cimento	25795,03	96,97	27962,92	96,91	42733,78	96,97
Total	PH _{Azul} + PH _{Cinza}	26601,9	100	28854,98	100	44067,11	100

Analisando a relação entre as pegadas hídricas azuis referentes à preparação de concreto e argamassas, constata-se que à medida que majora o número de pavimentos, o percentual da PH azul associada ao preparo de concreto tende a aumentar em relação à da argamassa, devido ao incremento das seções transversais das peças estruturais e ao aumento das áreas comuns da edificação. Devido a isto, o Projeto 3 apresenta o maior percentual de PH azul para o preparo de concreto. Verifica-se, ainda, que a PH azul para fabricação do cimento é muito superior em relação à PH para preparação de concretos e argamassas.

Observa-se que a PH cinza nos três projetos é muito maior em relação à PH azul da fabricação de cimento, assim averigua-se que o volume de água necessário para diluir o efluente gerado na fabricação do cimento usado nos projetos é superior a mais de 35 vezes o volume de água consumido na fabricação do cimento. Tal fato evidencia que o efluente gerado ao longo da cadeia produtiva possui alto poder de poluição. Verificou-se que os Projetos 1 e 2 possuem pegadas hídricas próximas, entretanto, o Projeto 3 apresenta uma PH 66% superior em relação ao Projeto 1.

Tal fato evidencia que quando se aumenta o número de pavimentos, maior é a PH por m² de área construída. Este resultado já era esperado, uma vez que o Projeto 3 foi o que demandou maior quantidade de cimento e no cálculo da PH total, constatou-se que a parcela da PH referente à preparação de concreto e argamassas tem pouco peso no cálculo da PH total. Para diminuir os impactos negativos relacionados ao uso de recursos hídricos é primordial a diminuição da PH cinza.

Avaliação do Ciclo de Vida

A avaliação do ciclo de vida referente ao uso de cimento por m² de construção habitacional foi feita com base nos impactos e categorias de impactos da ACV da fabricação de cimento, cujos valores estão apresentados na Tabela 8, e nos quantitativos de consumo de cimento da Tabela 9. Com o intuito de avaliar também os impactos relacionados ao uso de recursos hídricos, foi estimada a PEH, na categoria de impactos de esgotamento de recursos, sendo essa estimativa baseada nos dados de PH total da Tabela 10 e do fator de caracterização CF. Os valores de cada categoria de impacto estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Impactos da ACV referentes ao uso de cimento por m² de área da UH construída.

Impactos	Categoria de Impactos	Unidade	Brasil		
			Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
Atmosféricos	Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	265,32	287,62	439,55
	Destruição da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	3,12E-05	3,38E-05	5,17E-05
	Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC eq	1,45	1,57	2,40
	Formação de material particulado	kg MP ₁₀ eq	4,08	4,42	6,76
Esgotamento de recursos	Acidificação do solo	kg SO ₂ eq	0,97	1,05	1,60
	Eutrofização de água doce	kg P eq	1,70E-02	1,84E-02	2,81E-02
	Eutrofização marinha	kg N eq	5,11E-02	5,54E-02	8,47E-02
	Depleção de metal	kg Fe eq	6,47	7,02	10,72
	Depleção de fósseis	kg Petr eq	90,41	98,00	149,77
	Pegada de escassez hídrica	Kg H ₂ O eq	50.012	54.247	82.846
Toxicidade	Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	33,04	35,82	54,74
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	2,28E-02	2,48E-02	3,78E-02
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DB eq	4,45E-01	4,82E-01	7,37E-01
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	4,84E-01	5,25E-01	8,02E-01

Os resultados expõem que, de modo geral, o Projeto 3 é o que apresenta os maiores valores de todas as categorias de impactos. Isso ocorre porque este projeto possui o maior consumo de cimento por m² de área construída. Os edifícios com muitos pavimentos tendem a causar maiores danos ambientais do que construções menores.

Destaca-se que construções com poucos andares, demandam mais espaço para abrigar a mesma quantidade de usuários. Como a obtenção e utilização dessas áreas causa impactos ambientais, então para se ter uma conclusão definitiva devem ser feitos, posteriormente, mais estudos comparativos.

A construção civil residencial no país é o maior consumidor de cimento, devendo seu uso ser

minimizado, controlando desperdícios, desenvolvendo projetos arquitetônicos com menor relação entre o perímetro das paredes e a área construída, reduzindo-se a quantidade de paredes, substituindo-se, sempre que possível, as alvenarias convencionais por painéis e divisórias feitas com materiais com menor impacto ao meio ambiente.

Na categoria de impactos atmosféricos, as emissões de CO₂ foram as mais expressivas de todas as categorias. Os impactos atmosféricos são provenientes dos fornos utilizados, principalmente para produção do clínquer, da extração da matéria prima e do transporte.

Segundo Stafford et al. (2016) as emissões de CO₂ no país tendem a ser mais altas devido ao meio de transporte rodoviário, predominante no país. Em relação ao transporte por ferrovias, os veículos que trafegam em rodovias possuem baixa eficiência energética, consumindo mais combustíveis fósseis, conseqüentemente emitem maior quantidade de gases responsáveis pelas mudanças climáticas. Para minimizar estes impactos uma solução é a redução da relação clínquer/cimento com a adição de matérias primas alternativas, através de adições de subprodutos de outras indústrias.

Na indústria brasileira são, comumente, adicionadas escórias de alto forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e filer calcário. Tais iniciativas contribuem para melhorar a sustentabilidade da indústria cimentícia. Ressalta-se ainda, que a substituição de parte do modal de transporte rodoviário por ferrovias, reduziria significativamente as emissões relacionadas ao transporte de todas as indústrias.

Com relação ao CFC-11, os resultados demonstram que cada m² de área construída, emite dezenas de microgramas deste gás. Apesar de parecer um valor pequeno, a sua vida útil média na atmosfera é de 52 anos. Neste período, o gás permanece degradando a camada de ozônio, tal fato potencializa seu dano ambiental (CHIPPERFIELD, 2015), como esta categoria de impacto é medida em termos de massa equivalente de CFC-11, pode haver emissões de outros gases com o mesmo dano ambiental, mas com vida útil maior que o CFC-11, agravando ainda mais o problema.

O MP₁₀ é responsável por mudanças climáticas juntamente com o CO₂. A quantidade de MP₁₀ liberada por m² de área construída não é muito significativa em relação ao CO₂. A emissão do MP₁₀ ocorre nos processos de formação do clínquer e do uso de combustíveis fósseis.

A formação de oxidante fotoquímico e os impactos de esgotamento de recursos nas categorias de acidificação do solo, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, depleção de metal, depleção de fósseis, estão relacionados à produção de combustíveis fósseis e/ou seu uso, sendo as etapas de formação do clínquer e o transporte os principais responsáveis por estas emissões. A depleção de combustíveis fósseis é relacionada ao uso desses combustíveis no forno, mas o transporte rodoviário também contribui para aumentar as emissões (STAFFORD et al., 2016).

A PEH foi a categoria de impacto que apresentou o maior valor em relação às outras categorias de impactos analisadas, demonstrando que o uso de cimento na construção civil habitacional requer grandes quantidades de água, o que aumenta o potencial de privação deste recurso, sobretudo em regiões onde a oferta hídrica é menor que a demanda. No cálculo da PEH a PH cinza teve impacto significativo no seu valor, devido a enorme diferença entre as PH cinza e azul, entretanto conforme preconiza a norma (NBR ISO 14046,

2017) esta categoria de impacto não leva em consideração aspectos relacionados à qualidade da água. A PH cinza foi analisada como uso de recursos hídricos necessários para diluir o efluente, não levando em consideração a qualidade da água. Para reduzir a PH e a PEH, a indústria cimentícia, teria que investir em tecnologias voltadas ao tratamento e à reutilização dos efluentes gerados na cadeia produtiva, como forma de mitigar os impactos adversos relacionados ao uso de recursos hídricos.

Os impactos negativos referentes à toxicidade são baseados na massa equivalente de 1,4 clorobenzeno, sendo as emissões mais significativas dessa categoria provenientes do forno (CHEN et al., 2010). De um modo geral, observa-se que a fabricação do clínquer e o transporte são os principais responsáveis pelos danos ambientais, logo, reduzir o consumo do clínquer e tornar o transporte mais eficiente em termos de emissões deve ser uma prioridade para redução de seus impactos ambientais.

CONCLUSÃO

Analisando as emissões da fabricação de cimento foi verificado que a maior parte delas está relacionada à produção de clínquer, pois esta etapa de fabricação demanda grandes quantidades de energia térmica e, conseqüentemente, combustíveis fósseis, além disto, o transporte rodoviário contribui para o incremento das emissões. Dentre as emissões para a atmosfera, o CO₂ foi o gás mais emitido, devido ao uso de cimento por m² de área construída.

De acordo com a avaliação de usos de recursos hídricos, a PH cinza da fabricação de cimento é o principal contribuinte para a PEH. Como a PH cinza está relacionada à emissão de efluentes, a grande diferença entre as pegadas hídricas azul e cinza da fabricação de cimento, o efluente gerado tem grande potencial poluidor, pois cada litro de água utilizada para fabricação do cimento por m² de residência, necessitará de mais de 30 L de água para sua diluição, de modo, a atender os padrões ambientais. Para reduzir estes impactos a indústria cimentícia deverá investir no tratamento de efluente e seu reuso, reduzindo assim, a PH cinza.

No comparativo entre a PH azul da fabricação de cimento e a PH da preparação de concreto e argamassas na obra, foi verificado que em cada m² de área construída, 89% da PH azul são para a fabricação de cimento. Diante disso, para tornar a construção civil habitacional mais sustentável em termos de uso de recursos hídricos, é recomendável empregar água de reuso nas etapas de fabricação de cimento, sobretudo se o parque industrial está localizado na região semiárida.

O estudo demonstrou que a ACV permitiu identificar os impactos ambientais negativos que estão relacionados ao uso de cimento por m² de construção habitacional e as suas respectivas causas, analisando inclusive o uso de recursos hídricos. Além disso, foi verificado que a ACV é uma ferramenta que ajuda na tomada de decisão com foco na sustentabilidade ambiental, auxiliando o gestor desde a concepção de projetos de arquitetura, até nos processos de fabricação e transporte do cimento.

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira do Cimento Portland. O esforço

da indústria brasileira do cimento para reduzir as emissões

de CO₂. **Saneamento Ambiental**: Cimento menos cinza, mais verde. São Paulo, n.192, p.4-10, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655/2015**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14046/2017**: Gestão ambiental - Pegada hídrica - Princípios, requisitos e diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BARAVELLI, J. E.. Subsídio e déficit habitacional no programa MCMV. **Revista de Ciências Humanas**, v.49, n.1, p.199-201, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5007/2178-4582>

BARCELO, L.; KLINE J.; WALENTA, G.; GARTNER, E.. Cement and carbon emissions. **Materials and Structures**, v.47, n.6, p.1055-1065, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>

BAUER, L. A. F.. **Materiais de construção 1**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BORN, R. H.; PICCHIONI, S.; PIVA, L.. **Mudanças climáticas e o Brasil**: Contribuições e diretrizes para incorporar questões de mudanças de clima em políticas públicas. Brasília: Vitae Civilis, 2007.

BOULAY, A.. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.23, n.2, p.368-378, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>.

BRASIL. **Lei nº 11.514**, de 13 de agosto de 2007. Dispõe sobre as diretrizes para a elaboração e execução da Lei Orçamentária de 2008 e dá outras providências. Brasília: DOU, 2007.

BUENO, C.; HAUSCHILD M. Z.; ROSSIGNOLO, J. A.; OMETTO, A. R.; MENDES, N. C.. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p.2208-2220, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.006>

GUIMARAES, P. D.. **SINAPI**: Metodologias e Conceitos. Brasília: CAIXA, 2018a

CAIXA. Caixa Econômica Federal. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**: SINAPI. Brasília, 2018b.

CHEN, C. HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; JULLIEN, A.. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v.18, n.5, p.478-485, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.014>

CHIPPERFIELD, M. P.. Global Atmosphere – The Antarctic Ozone Hole. **Environmental Science And Technology**, p.1-33, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/9781782622178-00001>

FEIZ, R.; AMMENBERG, J.; BAAS, L.; EKLUND, M.;

HELGSTRAND, A.; MARSHALL, R.. Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v.98, p.272-281, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.083>

FGV. Fundação Getúlio Vargas. **Análise das Necessidades habitacionais e suas tendências para os próximos dez anos**. Rio de Janeiro: ABRAIN, 2018.

FIORITO, A. J. S. I.. **Manual de Argamassas e Revestimentos**: Estudos e procedimentos de execução. 2 ed. São Paulo: Pini, 2010.

GAGG, C. R.. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. **Engineering Failure Analysis**, v.40, p.114-140, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>

HABERT, G.; BILLARD, C.; ROSSI, P.; CHEN, C.; ROUSSEL, N.. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. **Cement and Concrete Research**, v.40, n.5, p.820-826, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.031>

HOEKSTRA, A.Y.; HUNG, P. Q.. **Virtual water trade**: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. 11 ed. Holanda: Ihe Delft, 2002.

LEENES, P.W.; HOEKSTRA, A.Y.; BOSMAN, R.. The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. **Water Resources and Industry**, v. 19, p.1-12, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2017.11.002>

MIKULČIĆ, H.. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of Cleaner Production**, v.136, p.119-132, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.145>

MORETTI, L.; CARO, S.. Critical analysis of the Life Cycle Assessment of the Italian cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v.152, p.198-210, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.136>

OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, v.14, n.4, p.167-181, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212014000400012>

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **ROADMAP Tecnológico do Cimento**: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: 2019.

STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D.. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v.137, p.1293-1299, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.050>

TORGAL, F.; CABEZA, L. F.; LABRINCHA, J.; MAGALHAES, A.. **Eco-efficient Construction and Building Materials**: Life Cycle Assessment (LCA). Oxford: Woodhead Publishing, 2014.

UWASU, M.; HARA, K.; YABAR, H.. World cement production and environmental implications. **Environmental**

Development, v.10, p.36-47, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2014.02.005>

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.