

**Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM PILAR COM DIFERENTES TRAÇOS DE CONCRETO**

**EVALUATION OF THE LIFE CYCLE OF A COLUMN WITH DIFFERENT CONCRETE MIXTURES PROPORTIONS**

Lucas Alves Lamberti, Geraldo Cechella Isaia, Cristiane Carine dos Santos e Cristian Jonathan Franco de Lima

**RESUMO**

O concreto é o principal destaque na indústria da construção, em termos de volume e demanda de recursos naturais para sua produção. É preciso buscar sua sustentabilidade, através de pesquisas que auxiliem na atualização da indústria. Esta pesquisa buscou avaliar quantitativamente a sustentabilidade do concreto estrutural através de ensaios laboratoriais e utilizando Análise do Ciclo de Vida modular (ACV-m) por meio do programa computacional *SimaPro*. Avaliou-se a sustentabilidade de um pilar de concreto armado de uma edificação da região de Santa Maria, RS – Brasil, variando-se o tipo de cimento (CPII-Z, CPIV e CPV-ARI) e níveis de resistência característica à compressão ( $f_{ck}$  30 e 50 MPa), desde as fases de produção, de uso, de manutenção e de desconstrução/reciclagem desta unidade funcional estrutural (período compreendido entre *berço* e o *túmulo*). Concluiu-se que o acréscimo da resistência do concreto de 30 para 50 MPa é favorável em todos os fatores estudados. A variação do cimento foi decisiva para  $f_{ck} = 30$  MPa, pois a vida útil de projeto mínima por norma não foi atingida com CPIV e CPV-ARI. O cimento CPII-Z obteve os melhores resultados.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, concreto, análise do ciclo de vida, recursos naturais.

**ABSTRACT**

Concrete is the main highlight in the construction industry in terms of volume and demand of natural resources for its production. It is necessary to seek its sustainability, through research that helps to update the industry. This research aimed to quantitatively evaluate the sustainability of structural concrete through laboratory tests using Modular Life Cycle Analysis (ACV-m) with the *SimaPro* software. The sustainability of a reinforced concrete column of a building in the region of Santa Maria, RS, Brazil, was evaluated by varying the type of cement (CPII-Z, CPIV and CPV-ARI) and compressive strength levels ( $f_{ck}$  30 and 50 MPa), from the stages of production, use, maintenance and deconstruction/ recycling of this structural functional unit (period between cradle and tomb). It was concluded that the increase in concrete strength from 30 to 50 MPa is favorable in all factors studied. The cement variation was decisive for  $f_{ck} = 30$  MPa, since the minimum design life per standard was not reached with CPIV and CPV-ARI. CPII-Z cement obtained the best results.

**Keywords:** Sustainability, concrete, life cycle analysis, natural resources.

## 1 INTRODUÇÃO

Entre os desafios enfrentados pela humanidade, a sustentabilidade do Planeta é a que mais tem causado preocupações, devido a diversos fatores, entre eles por afetar a qualidade de vida e a sobrevivência. No entanto, para a prática da sustentabilidade é necessário que se estabeleça um equilíbrio entre as ações humanas e o meio ambiente, que somente será consolidado no momento em que forem realizados estudos e práticas entre as diversas áreas do conhecimento e setores da economia.

Foi a partir da Revolução Industrial em meados do século XVIII que houve maior intensificação desse processo de desequilíbrio. Sendo que a partir deste momento houve avanços significativos e a construção civil alavancou de maneira bastante intensa, principalmente quando da descoberta do cimento Portland no ano de 1850. Desta forma, aumentaram-se as explorações de recursos naturais, gerando grande quantidade de resíduos e desconsiderando as consequências negativas que tudo isso iria causar futuramente para o meio ambiente.

Ao relacionar a poluição ambiental e a evolução da construção civil, deve-se levar em consideração o grande consumo de concreto, que é uma das bases que sustenta a construção civil, sendo considerado o segundo material industrializado mais consumido no mundo. E um dos principais materiais que pode potencializar o princípio da sustentabilidade, já que pequenas reduções no consumo dos seus constituintes, principalmente do cimento, apontam para ganhos consideráveis em relação ao consumo de energia, melhoria dos ecossistemas e prospecção dos recursos naturais.

Desta forma, a indústria cimenteira é considerada pelo Portal Odm-Fiep (2012) o setor responsável por cerca de 5% das emissões de CO<sub>2</sub> lançadas na atmosfera. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), mais de 50% das emissões de CO<sub>2</sub> lançados pela indústria de cimento é proveniente dos processos de produção, que ocorrem durante a transformação físico-química do calcário em clínquer (principal constituinte do cimento).

Considerando todo este contexto, a presente pesquisa tem como objetivo realizar por meio de estudos e metodologias já desenvolvidas a avaliação da sustentabilidade do concreto estrutural, no que se refere à Análise do Ciclo de Vida (ACV), através do *software SimaPro*.

A presente pesquisa abrange a vida útil completa do concreto estrutural, ou seja, “do berço ao túmulo”, sendo adotado como unidade funcional um pilar de concreto armado de uma edificação fictícia (unidade funcional é definida pela Norma ISO 14040 (2014) como sendo uma unidade de referência).

## 2 SUSTENTABILIDADE

Tem-se acompanhado nas últimas décadas um crescimento das preocupações com as questões ambientais no mundo inteiro, pois nosso planeta dá evidências que não suporta ritmo de consumo de recursos naturais que é seguido. Pois existem em alguns países níveis de poluição que além de causarem alterações nos ecossistemas também geram problemas gravíssimos para a saúde dos habitantes.

Perante os inúmeros desastres ambientais, a humanidade não tem outra alternativa a não ser repensar sua maneira de interagir com o planeta, seja adotando novas práticas e estratégias de produção pelos diversos setores da economia, como também pensando no destino final dos resíduos gerados.

A construção civil é considerada um dos principais setores da economia que está fortemente ligada à questão da sustentabilidade, pois apesar de ser um indicativo de crescimento

econômico e social, também se caracteriza como uma atividade geradora de grandes impactos ambientais.

## 2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS

Os assuntos relacionados aos “impactos ambientais” tem ganhado cada vez mais atenção, em que muitas pessoas passaram a ter consciência do que pode vir a acontecer caso não sejam tomadas providências que mudem as formas de agir, trabalhar, e viver se não preservarem o meio ambiente e reduzirem os impactos ambientais que são constantemente causados.

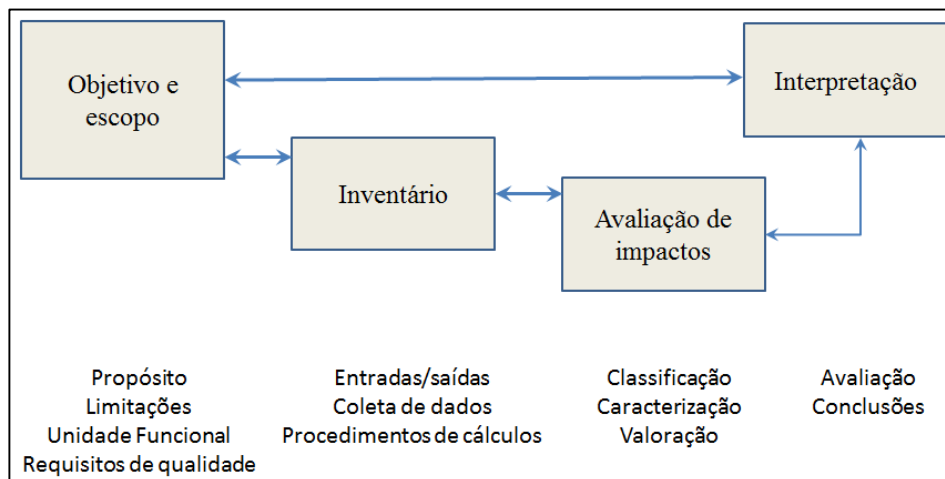
De acordo com estudos de Agopyan e John (2011) pode-se afirmar que não existem produtos isentos de impactos ambientais, sendo que a quantificação varia de acordo com as condições locais do projeto, execução, uso, manutenção e práticas que são adotadas após a vida útil da edificação. Os autores ainda destacam que a quantificação desses impactos pode ser realizada por meio de uma metodologia denominada Avaliação do Ciclo de Vida, que é baseada nos fluxos de entrada (consumo) e saída (emissões) de materiais e energia relacionados a um produto durante o seu ciclo de vida.

## 2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Considerando que a questão ambiental se faz cada vez mais presente, foi necessário desenvolver ferramentas de gestão, para que tanto as instituições de ensino como o governo e empresas pudessem avaliar suas consequências ambientais relacionadas com as decisões defendidas durante os processos ou produtos. Dentre essas ferramentas destaca-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que pode ser utilizada durante o desenvolvimento do produto; definição de projetos estratégicos e políticas públicas; gestão de impactos ambientais, entre outros.

As etapas e metodologias da Avaliação do Ciclo de Vida de um produto ou serviço são definidas pela norma NBR ISO 14040: 2014 como: definição de objetivo e escopo, quantificação dos dados (inventário) de todas as entradas (materiais, energia e recursos) e saídas (produtos, subprodutos, emissões, etc.), identificação dos impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida e da interpretação dos resultados do estudo, como representado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas da metodologia Análise do Ciclo de Vida



Fonte: autores.

### 2.2.1 Objetivo e Escopo

Esta fase é a primeira que deve ser definida e analisada. O escopo, a fronteira do sistema e o nível de detalhes, bem como o objeto, são responsáveis pela profundidade e abrangência de uma ACV, que podem variar de maneira bastante significativa.

De acordo com Seo e Kulay (2006) na definição do objetivo é estabelecido o motivo para direcionar o estudo, sua abrangência e o público-alvo. E na definição do escopo são considerados os parâmetros como unidade funcional, fluxo de produto, definição de fronteiras, critérios para a utilização de cargas ambientais, assim como as categorias de impacto.

Segundo a NBR ISO 14040:2014 a definição do objetivo ou do escopo pode ser bastante complexa, pois o escopo deve ser bem definido para garantir que a profundidade, extensão e o detalhamento do estudo sejam suficientes para alcançar o objetivo proposto. No entanto, o estudo da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica interativa, pois pode ser que seja necessário alterar o escopo do estudo ao passar da análise, em função de uma série de fatores.

### 2.2.2 Inventário

Nesta fase de Análise do Inventário, a NBR ISO 14040:2014 define como a coleta de dados e estabelecimento de procedimentos de cálculo, de forma a agrupar esses dados em categorias ambientais normalmente utilizáveis e comparáveis. De certa forma deve haver um equilíbrio, ou seja, tudo o que entra deve ser igual ao que sai do sistema, em relação à energia ou massa, desde a extração das matérias-primas até o descarte final dos produtos.

A coleta de dados para a formulação do inventário pode ser um processo que demande grande quantidade de recursos, além da possível indisponibilidade de dados. Essa coleta pode ser feita tanto através de medidas de campo, quanto por meio de buscas bibliográficas como dados dos fornecedores.

### 2.2.3 Avaliação de Impactos

Conforme a NBR ISO 14040: 2014, nesta fase têm-se como objetivo a avaliação de impacto do ciclo de vida baseando-se nos resultados do inventário, para poder avaliar a significância dos impactos ambientais potenciais. E para isso, devem ser associados os dados do inventário com as categorias de impacto relevantes ao estudo e seus respectivos indicadores.

Devido ao grande número de informações que é necessário para o estudo da ACV, este processo pode ser considerado extremamente complexo, no entanto, os programas possuem bibliotecas de produtos e/ou processos. Atualmente, o *Ecoinvent* é o principal banco de dados, constituído de uma biblioteca de inventários com valores de cargas ambientais (entradas e saídas de materiais, substâncias e energia), associadas ao ciclo de vida de um grande número de produtos, processos, sistemas de energia, de transporte, de disposição de resíduos, entre outros.

#### **2.2.4 Interpretação de resultados e tomada de decisão**

Esta etapa caracteriza-se como uma das etapas mais sensíveis, pois as hipóteses definidas durante as fases anteriores, assim como ajustes, podem alterar o resultado final do estudo.

A interpretação dos resultados da ACV é norteada pela NBR ISO 14040:2014 e pela NBR ISO 14044:2014 – Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações.

De acordo com Seo e Kulay (2006) esta etapa consiste na identificação e análise dos resultados das fases de inventário ou avaliação de impacto do estudo da ACV. Sendo que a maneira de interpretar os resultados pode tomar a forma de conclusões e recomendações aos profissionais que se utilizam a ACV como instrumento de auxílio ao processo de tomada de decisão.

#### **2.2.5 Análise do Ciclo de Vida Modular**

De acordo com Giannetti et al. (2014) a maior limitação da realização da Análise do Ciclo de Vida é a sua abrangência, pois a proposta da ACV é realizar a análise de todos os fluxos de materiais e energia que fazem parte do ciclo de vida de um produto.

Desta forma, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014) propõe uma Plataforma Global Simplificada de Avaliação do Ciclo de Vida, que tem como objetivo alcançar os mesmos resultados de uma ACV tradicional, porém com redução de custo e tempo. Assim surgiu o projeto ACV Modular (ACV-m), estando em sincronia com o método de ACV tradicional e sendo considerado piloto para o estabelecimento de uma plataforma nacional de ACV simplificada. Mas deve-se ter muito cuidado, pois a simplificação de maneira incorreta pode afetar a acurácia e confiabilidade dos resultados da ACV, por isso, é preciso identificar as áreas dentro da ACV que podem ser omitidas ou simplificadas sem comprometer os resultados finais de maneira significativa.

Os meios para simplificar a ACV, segundo Giannetti et al. (2014), incluem: omitir estágios do ciclo de vida; dar ênfase a alguns meios de impactos ambientais; limitar o inventário; omitir alguma avaliação de impacto; utilizar estudos anteriores, principalmente os dados.

#### **2.2.6 ACV aplicada ao concreto estrutural**

Percebe-se um aumento crescente na utilização e interesse pela realização da ACV em diversas áreas, pois hoje existem inúmeros estudos que comprovam a sua eficiência, tanto em relação ao melhoramento das propriedades dos produtos como na redução dos impactos ambientais.

O concreto, um dos principais materiais utilizados pela construção civil, gera grandes impactos ambientais devido a grande quantidade de emissões de gases causadores do efeito estufa, principalmente causados pela produção de cimento que é um dos seus principais

constituintes. No entanto, estudos apontam que a forma mais eficiente de mitigar as emissões é através da redução do consumo de clínquer. O uso de adições minerais, tanto naturais como subprodutos de outros processos, pode contribuir na redução de CO<sub>2</sub> gerado na fabricação do cimento (LIMA, 2010; AGOPYAN E JOHN, 2011; GUERREIRO, 2014).

Para realizar a ACV de uma estrutura de concreto armado é necessário primeiramente conhecer seu ciclo de vida. Para isso, deve-se realizar um levantamento dos fluxos que envolvem cada uma das etapas da produção, inclusive a obtenção da matéria-prima, transporte, produção, resíduos pós-uso, entre outros.

### **3 METODOLOGIA**

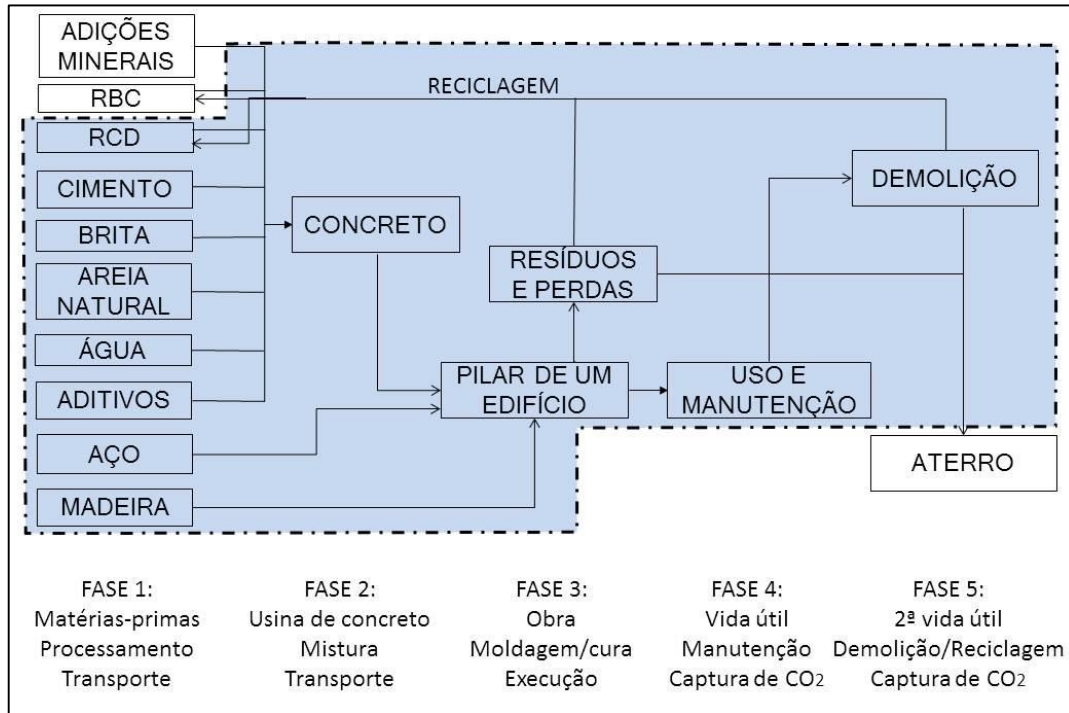
Como a presente pesquisa está inserida em um projeto que envolve quatro dissertações, que, em conjunto, englobam o ciclo de vida completo da unidade funcional em estudo (pilar de concreto), a metodologia básica deste trabalho constituiu-se na abordagem das fases de uso/manutenção e descarte (do portão ao túmulo), entretanto valeu-se também dos resultados da fase berço-portão, por meio da dissertação desenvolvida por Silva (2014).

De acordo com a norma NBR ISO 14040:2014 a metodologia seguiu as quatro etapas de uma ACV: objetivo e escopo; análise do inventário; avaliação dos impactos e interpretação dos resultados.

#### **3.1 OBJETIVO E ESCOPO**

O objetivo desta pesquisa foi avaliar fatores ambientais de alternativas de pilar de concreto armado fictício disposto em uma região próxima à Universidade Federal de Santa Maria - RS. O pilar de concreto armado situa-se em posição central do primeiro andar de uma edificação composta por oito pavimentos, o primeiro deles composto de pilotis. A Figura 2 ilustra o escopo dessa pesquisa.

Figura 2 – Sistema de produto e fronteiras do sistema



Fonte: autores.

As variáveis de estudo foram pré-estabelecidas, com a utilização de três tipos de cimento: CP II-Z 32 (composto), CP IV 32 (pozolânico) e CP V-ARI (alta resistência inicial); e duas resistências características:  $f_{ck}$  30 e 50 MPa. Portanto, foram seis as possibilidades de execução do pilar de concreto, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Siglas adotadas para os traços estudados

Cimento	Resistência Característica	Sigla
CP II-Z	30	II30
CP II-Z	50	II50
CP IV	30	IV30
CP IV	50	IV50
CP V-	30	V30
CP V-	50	V50

Fonte: autores.

### 3.1.1 Unidade funcional

A unidade funcional de estudo, portanto, foi definida como sendo um pilar de concreto armado.

### 3.1.2 Materiais

Para calcular o volume de materiais do concreto, foi realizado um estudo de dosagem com agregados da região. Foram empregados materiais tais como: agregado miúdo com granulometria entre 4,75 e 0,15mm e agregado graúdo com granulometria entre as peneiras 19 e 4,75 mm, lavados, peneirados e estocados em local apropriado, água e aditivos químicos

redutores de água. Como aglomerantes hidráulicos utilizaram-se os cimentos CPII-Z-32 – Itambé, Brasil (referente à norma NBR 11578:1997), CPIV - Cimpor, Brasil (referente à norma NBR 5736:1999) e CPV-ARI - Itambé, Brasil (conforme norma NBR 5733:1991). Todos estes materiais passaram por ensaios de caracterizações químicas e físicas.

### 3.1.3 Concreto

O estudo do concreto foi realizado em conjunto com os dados descritos na dissertação de Silva (2014), pertinentes ao período do berço ao portão por se tratar do mesmo projeto guarda-chuva. A dosagem foi elaborada segundo o método proposto por Helene e Terzian (1992).

As relações a/c adotadas para os traços iniciais devem apresentar resultados compreendidos dentro da faixa de resistência desejada, assim como a trabalhabilidade especificada, adotando consistência pelo abatimento do tronco de cone em  $100 \pm 20$  mm. O teor água/materiais (H) foi determinado por tentativa para cada aglomerante e considerando o uso de aditivos. O valor de H foi adotado constante em 8,22 para as três relações a/c. O desvio padrão inicial de dosagem foi  $sd = 4,0$  MPa conforme a NBR 12655:2006, definindo as resistências respectivas de  $fc_{28} = 36,6$  MPa e  $fc_{28} = 56,6$  MPa aos 28 dias, para as resistências características de 30 e 50 MPa, respectivamente.

A moldagem de corpos de prova (CPs) seguiu-se conforme a NBR 5738:2003 e ensaiados de acordo com a NBR 5739:2007. Foram moldados seis CPs cilíndricos 10x20 cm nas relações água/cimento de 0,35; 0,475 e 0,65; para traçar a curva de Abrams de cada cimento. A relação água/cimento de 0,30 foi incluída para o concreto com CPIV, devido ao seu menor desempenho mecânico em relação aos demais.

Foram obtidos os resultados aos 28 dias, traço e abatimento para a construção das curvas de Abrams, a partir disso obtiveram-se as relações a/c específicas para cada cimento (CPII-Z, CPIV e CPV-ARI) e cada resistência desejada (36,6 e 56,6 MPa), totalizando os seis diferentes traços desejados (Tabela 2). A quantidade de material por metro cúbico de cada traço está na Tabela 3.

Tabela 2 – Traços unitários definitivos e consumo de cimento por  $m^3$  e aditivo

	Traço Unitário	a/c	Consumo de cimento (kg.m <sup>-3</sup> )	Aditivo (%)
II 30	1:2.05:3.03	0.50	353.43	-
II 50	1:1.29:2.27	0.37	473.39	0.3
IV 30	1:1.70:2.68	0.44	395.23	0.2 (plastificante)
IV 50	1:1.00:1.98	0.32	534.79	0.4
V 30	1:2.91:3.88	0.64	276.64	-
V 50	1:1.90:2.88	0.47	374.94	-

Fonte: autores.

Tabela 3 – Quantidade de materiais por metro cúbico

	Cimento	Areia	Brita	Água (kg)	Aditivo (kg)
II 30	353,43	724,53	1.070,89	176,72	-
II 50	473,39	610,67	1.074,60	177,52	1,42
IV	395,23	671,89	1.059,22	174,69	0,79 (plast.)
IV	534,79	534,79	1.058,88	174,88	2,14
V 30	276,64	805,02	1.073,36	177,05	-
V 50	374,94	712,39	1.079,83	178,10	-



Fonte: autores.

### 3.2 INVENTÁRIO

Nesta etapa são estabelecidos os fluxos de entrada e saída de material e energia para cada unidade de processo do sistema relacionado ao produto. Esta pesquisa envolve as fases de uso/manutenção, demolição e reciclagem do pilar de concreto armado, e agrega aos resultados obtidos por Silva (2014). A autora realizou o inventário das fases de obtenção da matéria-prima e execução do pilar, e alguns dados do inventário são utilizados nas fases do ciclo de vida subsequentes.

Na fase de uso e manutenção adotou-se que o pilar de concreto aparente recebe rotina de limpeza a cada três anos, de maneira a atender a estética e a vida útil estabelecida. O inventário da água foi obtido da base de dados do programa SimaPro 8.0.2 (*tap water, at user*), com características similares às locais. As alternativas que receberam cobertura superficial não receberam lavagens periódicas, dado que a repintura foi realizada a cada seis anos e manteve a estética dos pilares. Foi adotada a TCPO (2008) para a composição de custos.

Já na fase de desconstrução/reciclagem estimou-se que os métodos seriam conforme as práticas usuais atuais. Para realizar a desconstrução do pilar de concreto armado, fez-se uso de martelo rompedor para reduzir as dimensões do concreto e facilitar o carregamento. Foi considerado uma porcentagem de perdas de 5% do material no carregamento do entulho.

A empresa GR2 de Santa Maria/RS, responsável pela gestão de resíduos da região, utiliza caminhões com capacidade de 6 m<sup>3</sup> e 12 m<sup>3</sup>. Para ficar de acordo com a TCPO (2008), optou-se pela utilização do caminhão com capacidade de 6 m<sup>3</sup> para o transporte do entulho da UFSM, local onde está situado a estrutura fictícia, até a sede da empresa GR2.

Ao chegar à empresa, o entulho é descarregado em local pré-estabelecido. O aço é separado para ser enviado à sucata, e posteriormente, retorna à siderúrgica onde será totalmente reciclado.

Desta forma foram quantificadas todas as entradas e saídas para posteriormente realizar a ACV. Maiores informações sobre o inventário podem ser buscadas nas dissertações de Lamberti (2015) e Silva (2014).

### 3.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS E INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O cálculo da avaliação de impactos foi realizado a partir da análise das substâncias envolvidas no sistema do produto, por meio de quantificação da influência tabelada de cada uma das substâncias em cada categoria de impacto, de acordo com o método selecionado. O método de avaliação adotado foi o Eco-indicator 99.

A interpretação dos resultados foi realizada sobre os valores técnicos obtidos, em unidade de Pt (equivale a um milésimo da carga ambiental média anual de um cidadão europeu) obtida no software SimaPro 8.0.2.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

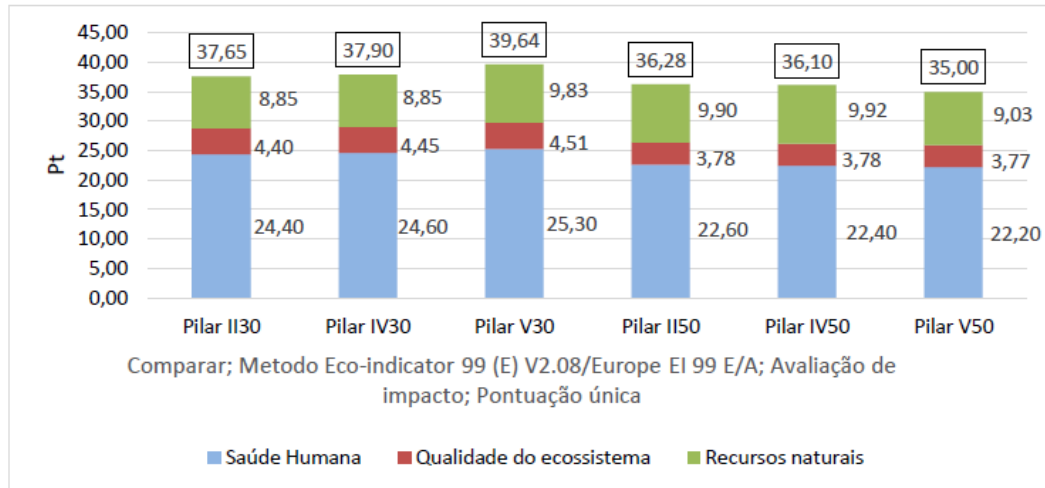
Neste item são apresentados os resultados que se obteve através da aplicação da metodologia descrita, em que serão feitas análises e comentários a respeito.

### 4.1 IMPACTOS TOTAIS: DO BERÇO AO TÚMULO

Após lançar os inventários no software SimaPro 8.0.2, fez-se a Análise do Ciclo de Vida de cada alternativa de pilar. A Figura 3 mostra o quantitativo, em Pt (milésimo da carga

ambiental média anual de um cidadão europeu), dos impactos sobre as três classes e a somatória sobre cada conjunto de resultados.

Figura 3 - Impactos sobre a saúde humana, ecossistemas e recursos naturais



Fonte: autores.

Nota-se que as alternativas dimensionadas com  $f_{ck} = 50$  MPa apresentam menores impactos totais, o melhor resultado do traço V50 (35,00 Pt). Os outros dois traços, II50 e IV50, apresentaram valores próximos (36,28 Pt e 36,10 Pt, respectivamente). No entanto, entre os pilares dimensionados com  $f_{ck} = 30$  MPa o cimento CPV-ARI apresentou o pior resultado de impactos totais (39,64 Pt). Os traços II30 e IV30 obtiveram valores próximos, 37,65 Pt e 37,90 Pt respectivamente. O pilar II30, único com  $f_{ck} = 30$  MPa que atingiu a vida útil mínima naturalmente, obteve o melhor resultado desse grupo novamente.

## 4.2 IMPACTOS INDIVIDUAIS

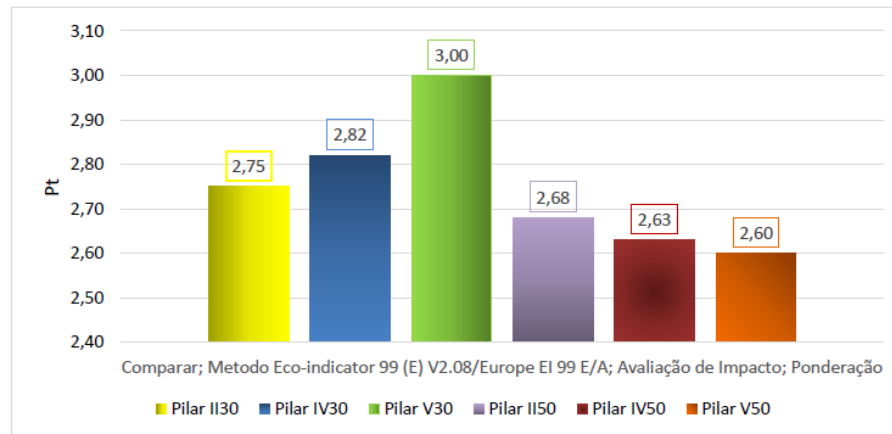
A fim de melhor compreender os impactos totais calculados no item 4.1, foram analisados separadamente as cinco categorias dos aspectos ambientais mais relevantes considerando a vida útil estimada provável para cada pilar de concreto armado. No entanto, fez-se a análise apenas dos impactos mais relevantes, de acordo com a metodologia da análise do ciclo de vida modular (ACV-m) conforme o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014).

### 4.2.1 Mudanças climáticas

Os três traços dimensionados para  $f_{ck} = 30$  MPa apresentaram os piores resultados, dentre estes, o traço II30, único que não necessitou uso de proteção superficial para alcançar a vida útil mínima estabelecida (50 anos), obteve o melhor resultado (2,75 Pt). No grupo  $f_{ck} = 50$  MPa, o melhor resultado foi do pilar V50 (2,60 Pt), que apresentou a menor vida útil desse grupo (102 anos), Figura 4.

Observa-se que as fases de uso, manutenção, descarte e reciclagem tiveram baixo impacto neste item. Silva (2014) obteve valores em torno de 2,6 Pt para pilares com  $f_{ck} = 30$  MPa e 2,5 Pt para pilares com  $f_{ck} = 50$  MPa, com pequena variação em ambos. O acréscimo de impacto ambiental na categoria mudanças climáticas foi de 0,1 Pt a 0,4 Pt.

Figura 4 – Ponderação de mudanças climáticas para cada alternativa de pilar

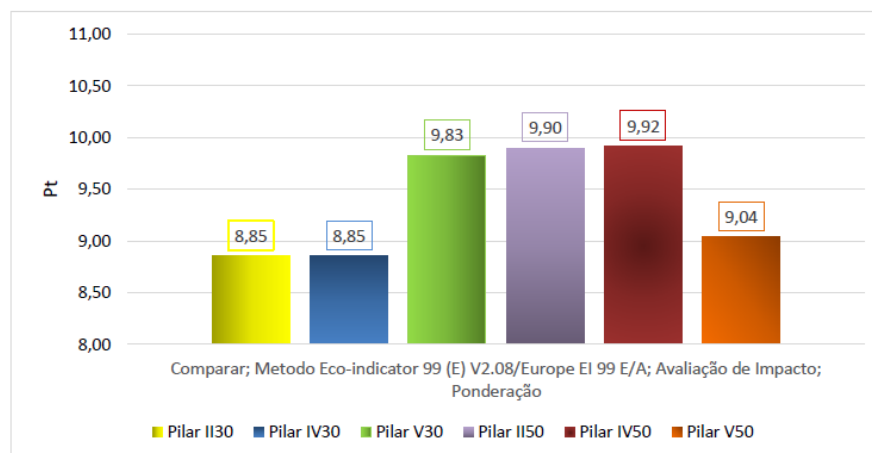


Fonte: autores

#### 4.2.2 Consumo de recursos naturais

Na categoria de utilização de recursos naturais os resultados agruparam-se de maneira diferente, como pode ser analisado na Figura 5.

Figura 5 – Ponderação de utilização de recursos naturais para cada alternativa de pilar



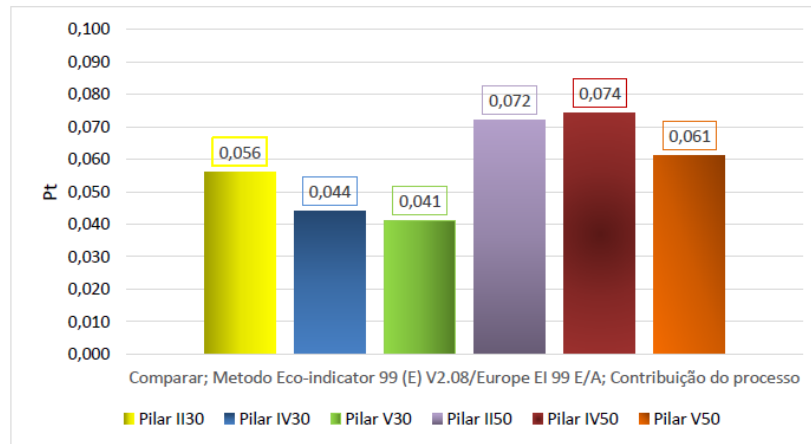
Fonte: autores

Os menores valores foram dos traços II30 (8,85 Pt), IV30 (8,85 Pt) e V50 (9,04 Pt). Silva (2014) obteve valores em torno de 7,55 para pilares dimensionados com  $f_{ck}$  30 MPa e 7,16 para pilares com  $f_{ck}$  50 MPa. Logo, o acréscimo de utilização de recursos naturais nas fases pós-construção foi de 1 Pt a 3 Pt.

#### 4.2.3 Consumo de energia

Os valores foram pequenos, os menores foram os traços V30 (0,041 Pt) e IV30 (0,044 Pt), representados na Figura 6. A considerar que um Pt equivale a um milésimo da carga ambiental média anual de um cidadão europeu, o consumo de energia de todo o ciclo de vida de um pilar de concreto armado, que inclui consumo de energia da betoneira (fase de construção) e do lava-jato (fase de uso) nesta pesquisa, deve ser exíguo.

Figura 6 – Ponderação de consumo de energia para as alternativas de pilar

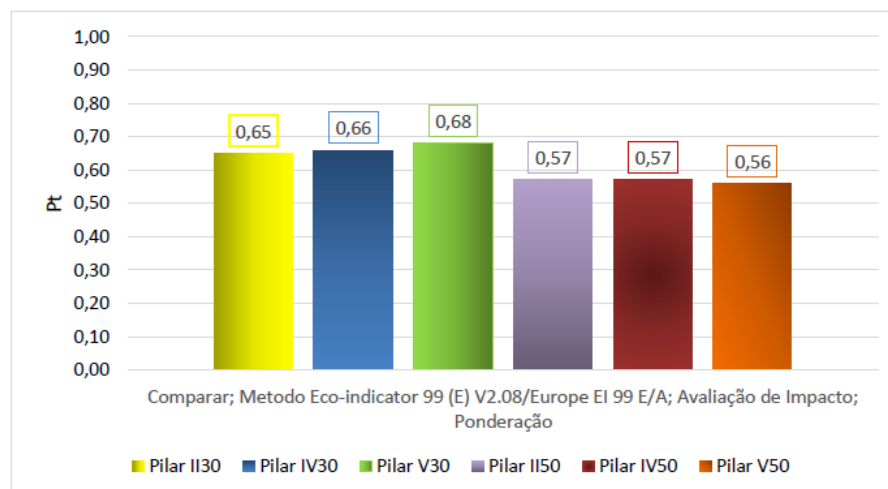


Fonte: autores

#### 4.2.4 Geração de resíduos

Já para a categoria de “Geração de resíduos”, os valores mantiveram-se baixos, pois considerou-se que o material sofreu reciclagem, com 5% de perdas. Silva (2014) obteve números que variaram de 0,36 a 0,40, portanto, por meio da Figura 7, observa-se que os valores aumentaram em torno de 60% até o fim da vida útil dos pilares. Da mesma forma que observado pela autora, os traços do grupo  $f_{ck} = 30$  MPa apresentaram impactos superiores aos traços do grupo  $f_{ck} = 50$  MPa.

Figura 7 – Ponderação de geração de resíduos para as alternativas de pilar



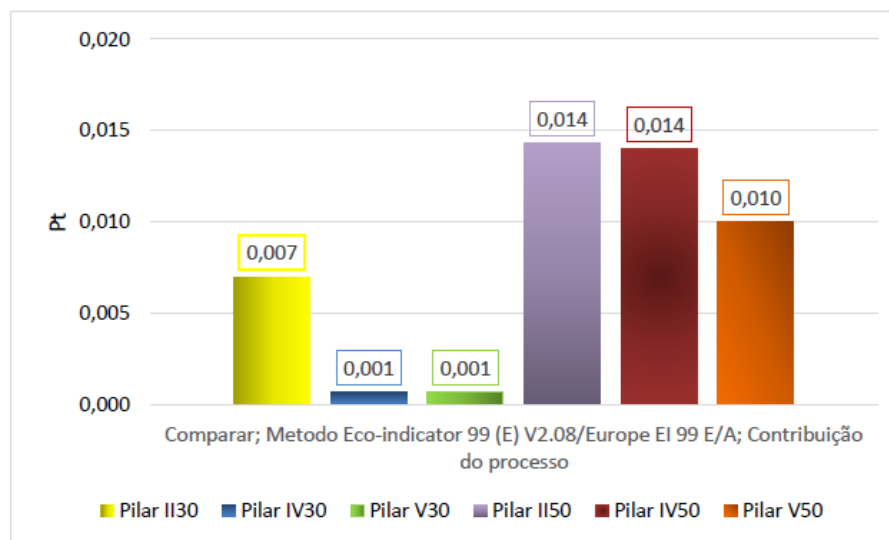
Fonte: autores

#### 4.2.5 Consumo de água

Para o consumo de água, a relação água/cimento era preponderante até a execução do pilar. Silva (2014) apresentou valores de água em m<sup>3</sup>, e destacou a proximidade de resultados nos traços com diferentes cimentos na resistência de 30 MPa e proximidade de resultados para os dimensionados com 50 MPa, estes com menor consumo que os primeiros citados. No período pós-construção o uso de água foi intensificado com o passar do tempo, nas lavagens periódicas dos traços que apresentaram vida útil mínima estabelecida (50 anos). Nos demais traços (IV30 e V30), as lavagens foram dispensadas devido a manutenção da estética pelas pinturas com tinta acrílica. Ou seja, o consumo de água foi superior em pilares com estimativa de vida útil maiores. Os resultados para a vida útil completa são mostrados na Figura 8 em Pt.

São valores baixos, mesmo caso do consumo de energia. O impacto foi maior nos dois traços com vida útil provável de 150 anos, II50 (0,014 Pt) e IV50 (0,014 Pt).

Figura 8 – Ponderação de consumo de água para as alternativas de pilar

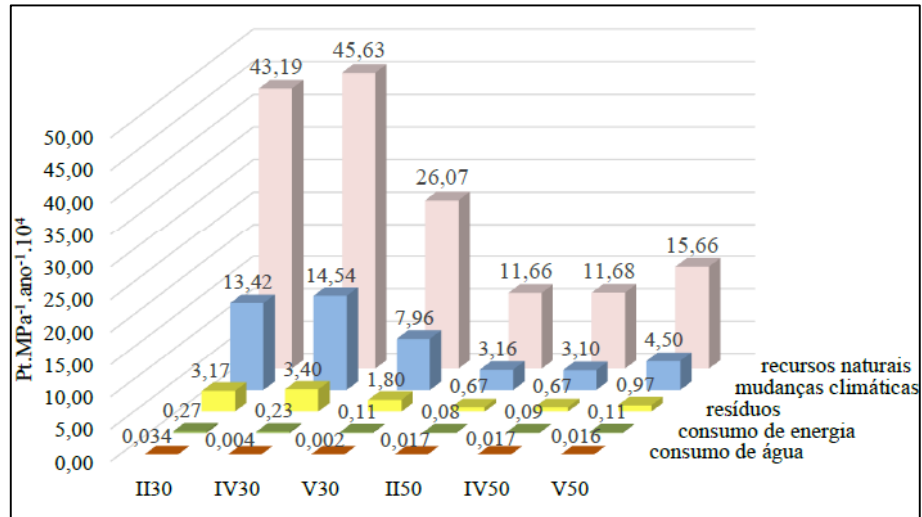


Fonte: autores

#### 4.2.6 Análise unitária dos resultados de impactos individuais

Os impactos individuais foram calculados em unidade de resistência (MPa<sup>-1</sup>) e de vida útil (ano<sup>-1</sup>) multiplicados por 10<sup>4</sup> (valor arbitrário para tornar os resultados mais claros). A Figura 9 reúne os resultados unitários dos cinco tipos de impactos analisados.

Figura 9 – Impactos individuais unitários



Fonte: autores

Considerando-se somente os impactos individuais que possuem a mesma unidade,  $\text{Pt.MPa}^{-1} \cdot \text{Ano}^{-1} \cdot 10^4$ , observa-se a seguinte ordem decrescente: recursos naturais > mudanças climáticas > resíduos > consumo de energia > consumo de água. Assim, os recursos naturais são os impactos individuais mais importantes, apresentando valores, em média, 3,5 vezes maiores do que o segundo – mudanças climáticas. Os três demais impactos, resíduos, consumo de energia e de água apresentam valores bem mais baixos.

Exceto no item consumo de água, observa-se que os piores desempenhos foram dos pilares com resistência característica de 30 MPa. Dentre estes, os melhores índices foram do cimento CPV-ARI. No item recursos naturais, o impacto individual com os maiores valores, o traço V30 apresentou o valor unitário  $26,07 \text{ Pt.MPa}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot 10^4$ , já os traços II30 e IV30 os valores  $43,19 \text{ Pt.MPa}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot 10^4$  e  $45,63 \text{ Pt.MPa}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot 10^4$ . Em relação ao grupo  $f_{ck}=50 \text{ MPa}$ , os cimentos CII-Z e CIIV, com valores muito próximos, superaram o cimento CPV-ARI, com índices inferiores nas seis categorias. Os traços II50 e IV50 obtiveram valores de 11,66 e 11,68  $\text{Pt.MPa}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot 10^4$  no item recursos naturais, respectivamente.

A opção por uma resistência característica superior demonstra-se uma escolha ambientalmente adequada, independentemente do cimento utilizado, dado que é uma especificação definida no momento do projeto.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na etapa de dimensionamento, percebeu-se a possibilidade de redução no consumo de materiais, primordialmente no consumo do concreto. A definição das resistências características de 30 e 50 MPa geraram pilares com características distintas, que foram decisivas nas etapas subsequentes. A seção do pilar dimensionado para 30 MPa foi de 25 x 45 cm, já para 50 MPa as dimensões foram 20 x 40 cm. Dado que o pé direito era o mesmo, a área superficial e volume de concreto eram diferentes: 3,85 m<sup>2</sup> de área e 0,309 m<sup>3</sup> de volume do concreto com 30 MPa, e 3,3 m<sup>2</sup> e 0,220 m<sup>3</sup> do concreto com 50 MPa. Além da desmaterialização em si, a redução da área superficial reduziu o consumo de água na limpeza ou tinta nas pinturas, e o menor volume favoreceu na desconstrução.

Outra variável foi a adoção do cimento. Nesta pesquisa foram utilizados os cimentos CII-Z, CIIV e CPV-ARI. Portanto, a pesquisa envolveu seis alternativas distintas.

Os resultados totais foram apresentados em três classes afetadas, são elas “saúde humana”, “qualidade do ecossistema” e “recursos naturais”. Ao avaliar de forma unitária, tanto

para a resistência,  $\text{MPa}^{-1}$ , como para a vida útil,  $\text{ano}^{-1}$ , os menores valores de impactos totais ficaram com os traços IV50 ( $42,52 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), II50 ( $42,73 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ) e V50 ( $60,62 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), nesta sequência. O traço V30 apresentou o melhor resultado entre o grupo de  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$  ( $105,15 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ).

Na análise dos impactos individuais foram avaliadas seis categorias: “mudanças climáticas”, “recursos naturais”, “consumo de energia”, “resíduos”, “consumo de água”. Nestas circunstâncias, os melhores resultados foram dos pilares com  $f_{ck} = 50 \text{ MPa}$ , destacam-se os traços II50 e IV50, com resultados muito próximos nos quatro itens individuais avaliados, e o V50 um pouco aquém.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial**. São Paulo; ABNT, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5736 – Cimento Portland pozolânico**. São Paulo; ABNT, 1999.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11578 – Cimento Portland composto - Especificação**. São Paulo; ABNT, 1997.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14040. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044 - Gestão ambiental – Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2014.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Série Sustentabilidade, volume 5. São Paulo: Blücher, 2011.
- CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Projeto ACV-m: Avaliação do Ciclo de Vida Modular.
- GIANNETTI, B. F., ALMEIDA, C. M. V. B., BOUER, E. **Ecologia Industrial - Ferramentas**.
- GUERREIRO, A. Q. **Avaliação do ciclo de vida dos cimentos de produção mais significativos no Brasil**. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2014
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, 1992.
- LIMA, J. A. R. de, **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- PORTAL ODM. **Acompanhamento municipal dos objetivos de desenvolvimento do milênio**. Disponível em: <[www.portalodm.com.br/FIEP](http://www.portalodm.com.br/FIEP)>. Acesso em: 15 de junho de 2016.
- SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. **Avaliação do ciclo de vida: ferramenta para tomada de decisão**. Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente – v.1, n.1, Art. 4, 2006.
- SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em:

<[www.snic.org.br/numeros\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp)>. Acesso em: 03 de julho de 2016.

SILVA, A. O. **Estudo comparativo do ciclo de vida e de custo de pilar com diferentes traços de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

TCPO. **Tabela de Composição de Preços para Orçamento**. 13 edição. São Paulo, Pini, 2008.

UNEP; SETAC. UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **Life cycle management: a business guide to sustainability**. Paris, 2007. 51 p.