

# A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais

Life Cycle Assessment – LCS and the phase of Environmental Impact Assessment considerations on the use of different methods and their reflexes on final results

Marcella RM Saade<sup>1\*</sup>, Maristela G Silva<sup>2</sup> e Vanessa Gomes<sup>1</sup>

1. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Construção. Av. Albert Einstein, 951, Caixa Postal: 6021, CEP: 13083-852, Campinas, São Paulo, Brasil; 2. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil. Av. Fernando Ferrari, 514, CEP: 29075-910, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

\*Autor para correspondência: [marcellarms@hotmail.com](mailto:marcellarms@hotmail.com)

**Resumo** A Avaliação do Ciclo de Vida representa uma ferramenta consistente e consonante com os princípios da sustentabilidade, com grande potencial para auxílio na tomada de decisões relativas às mais diversas áreas e setores industriais e políticos. Devido à ampla gama de aplicações a que se destina, e ao seu referido potencial, a realização da ACV demanda clara identificação e documentação das considerações feitas durante o estudo, e dos métodos utilizados, para garantir a correta interpretação dos resultados fornecidos. A presente pesquisa objetiva evidenciar as diferenças advindas do uso de 6 métodos de avaliação de impactos, aplicados à ACV de uma tonelada de cimento Portland CP III 32, utilizando a plataforma de apoio SimaPro 7.3, a fim de avaliar até que ponto a escolha do método pode influenciar os resultados finais e a decorrente interpretação do estudo como um todo. O estudo demonstrou que, para todos os métodos utilizados, a classe de impacto relativa à mudança climática se destacou, porém as demais classes de impacto variaram em termos de sua importância perante o problema ambiental como um todo, podendo implicar em conclusões divergentes em torno da carga ambiental característica do produto avaliado. Ademais, enfatizou-se a importância de cautela na escolha do método, e de conhecimento acerca da metodologia adotada por cada modelo de avaliação de impactos.

**Palavras-chaves:** Avaliação do ciclo de vida, métodos de avaliação de impactos ambientais, SimaPro 7.3, categorias de impacto, classes de impacto, CP III 32.

**Abstract** Life Cycle Assessment represents a consistent tool and is in line with the principles of sustainability, with great potential to aid in making decisions regarding the most diverse areas and

industrial and political sectors. Due to the wide range of applications to which it is addressed, and referred to its potential, the realization of LCA demands clear identification and documentation of the considerations made during the study, and the methods used to ensure the correct interpretation of the results provided. This research aims to highlight the differences resulting from the use of six methods of impact assessment applied to LCA of one ton of Portland cement CP III 32. The platform to support SimaPro 7.3 was used in order to assess to which extent the choice of a method may influence the results and the resulting interpretation of the study as a whole. The study showed that for all methods, the class of impact on climate change is highlighted, but the other classes of impact varied in terms of their importance before the environmental problem as a whole, may result in different conclusions about the environmental load characteristic of the product reviews. Moreover, he emphasized the importance of careful choice of method, and knowledge of the methodology adopted for each type of impact assessment.

**Keywords:** Assessment of the Life Cycle, methods for assessing environmental impacts, SimaPro 7.3, impact categories, impact classes, CP III 32.

## Introdução

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta metodológica utilizada para avaliar, quantitativamente, o ciclo de vida de produtos e/ou atividades em termos de sua interação com o meio

ambiente (Goedkoop *et al.* 2009). Segundo Ferrão (1998), a ACV pode ser entendida como sendo a compilação dos fluxos de entrada e de saída e a avaliação dos impactos ambientais associados a um produto ou processo ao longo de seu ciclo de vida. A ACV parte do princípio de que todos os estágios da vida de um produto/processo têm potencial para gerar impactos ambientais relevantes, devendo, portanto, serem avaliados, configurando uma abordagem holística da questão (Oliveira e Saade 2010).

Os estudos precursores da ACV moderna remontam à década de 60, mas foi a partir de 1990 que se observou um notável crescimento das atividades envolvendo a metodologia do ciclo de vida na Europa e nos EUA, traduzido pelo número de *workshops* e fóruns organizados (OLIVEIRA; SAADE, 2010). Em 1992, a Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou um comitê técnico responsável por normalizar um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo a Avaliação do Ciclo de Vida. Instituiu-se, assim, a série ISO 14040, responsável por estabelecer diretrizes metodológicas para a realização da ACV.

Por motivos de praticidade e eficiência, a ACV é comumente dividida em quatro etapas: *i)* definição dos objetivos e escopo, na qual o propósito da análise é especificado, bem como é definida a unidade funcional do estudo, *ii)* análise de inventário, na qual os cálculos de consumo de recursos e de emissões são realizados, *iii)* avaliação de impactos, na qual as emissões e o consumo de recursos são relacionados a diferentes categorias de impactos ambientais, e, por fim *iv)* interpretação, na qual os resultados de cada uma das etapas anteriores são avaliados, assim identificando necessidade de adequação das definições do estudo, caracterizando uma metodologia iterativa.

A ACV, atualmente, é utilizada para avaliar uma ampla gama de materiais e processos, configurando uma ferramenta de suporte à elaboração e definição de diferentes atividades, que vão desde a rotulagem ambiental e o *design* de produtos até sistemas energéticos, produção de alimento e alternativas de transporte (Goedkoop *et al.* 2009). Hoje, portanto, a ACV representa muito mais do que uma simples avaliação de impactos de produtos finais. A Figura 1 apresenta as etapas típicas de uma ACV, e suas possíveis aplicações.

Devido ao potencial de aplicação em diferentes atividades e

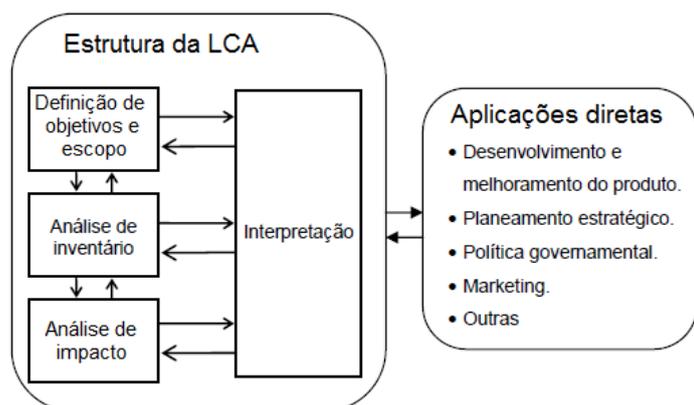


Figura 1 Estrutura e aplicações da ACV (ISO 14042:2000)

setores, é de suma importância que os resultados de ACV's sejam passivos de clara interpretação e compreensão, a fim de garantir que a referida ferramenta forneça auxílio bem direcionado e coerente à tomada de decisões decorrente dos resultados do estudo. Para tanto, torna-se importante ter cautela na escolha dos métodos utilizados para a realização de uma ACV, incluindo-se aí, principalmente, os métodos de avaliação de impactos, etapa na qual se insere no estudo um nível de incerteza e subjetividade acerca da adaptação dos resultados do inventário a valores de impacto ambiental.

Segundo Owens (1997), na etapa de avaliação de impactos são impostas restrições devido à perda de informações temporais, espaciais, de dose-resposta, dentre outras informações numéricas normalmente encontradas no inventário de dados, que demandam cautela quanto ao nível de precisão dos resultados da avaliação de impactos. Ainda segundo este autor, o grau de restrições impostas varia de acordo com o problema ambiental em questão, e com o método utilizado para extrapolar os dados de inventário.

Além da incerteza agregada aos resultados finais da ACV, as distintas metodologias de cálculo adotadas pelos métodos de avaliação de impacto refletem diferentes valores e informações, com diferentes princípios de priorização de impactos (Baumann e Tillman 2004). Assim, os resultados finais podem variar consideravelmente entre si, dependendo do método empregado, e dar margem a interpretações distintas.

#### Avaliação de impactos ambientais

Na terceira etapa da ACV são descritos os impactos decorrentes das cargas ambientais calculadas na análise de inventário. Nesta etapa, os resultados numéricos do inventário são traduzidos para resultados ambientais relevantes, relacionando-os a impactos específicos, como acidificação e depleção da camada de ozônio (Baumann e Tillman 2004). Segundo Seppälä *et al.* (2002), a avaliação de impactos ambientais objetiva, tipicamente, auxiliar na obtenção de uma impressão geral dos efeitos ambientais causados por um complexo conjunto de intervenções: emissões, consumo de recursos e uso de terras.

A importância da etapa de avaliação dos impactos reside na simplificação dos resultados, uma vez que os mesmos se tornam mais compreensíveis e de fácil comunicação; na redução do número de parâmetros resultantes, considerando que o inventário pode conter mais de 200 parâmetros, número este que na avaliação de impactos pode ser reduzido a aproximadamente 15; e no fato de que os agentes interessados no estudo, muitas vezes, consideram a categoria de impacto mais palpável do que as emissões que causam o referido impacto, por exemplo: para muitos, é mais fácil compreender as conseqüências da acidificação do que a emissão de SO<sub>2</sub> propriamente dita (Baumann e Tillman 2004).

A norma para a realização da avaliação de impactos, a ISO 14.042: 2000, divide esta tarefa em definição das categorias de impacto, classificação, caracterização, normalização, ponderação, agrupamento e análise da qualidade dos dados, sendo as três primeiras subfases obrigatórias e as quatro últimas opcionais.

Inicialmente, na definição das categorias de impacto, é feito um refinamento das categorias previamente definidas na definição do objetivo e escopo, a partir de informações coletadas e dos resultados obtidos na análise de inventário. Na classificação, os parâmetros calculados no inventário são conectados às respectivas categorias de impacto, conhecendo-se a relação causa e efeito entre os poluentes e os potenciais impactos ambientais.

Na subfase da caracterização, calcula-se a extensão do impacto ambiental por categoria, obtendo o total de impacto utilizando fatores de equivalência, chamados, no caso, de fatores de caracterização. Por exemplo: no caso da categoria relacionada à mudança climática, o fator de caracterização seria a medida “CO<sub>2</sub> equivalente”. Dessa forma, indica-se a contribuição de um resultado do inventário à categoria ambiental à qual pertence (Goedkoop *et al.* 2008).

Na normalização, os resultados da caracterização são divididos por um valor de referência, de forma a associar os impactos do estudo com o total de impactos de uma determinada região, a fim de avaliar a contribuição de determinada categoria de impacto ao problema ambiental como um todo (Oliveira e Saade 2010). Há diferentes formas de se determinar o valor de referência, sendo a mais comum delas a determinação dos indicadores das categorias de impacto para uma região por um ano, seguida da divisão deste resultado pelo número de habitantes daquela região (Goedkoop *et al.* 2008).

A ponderação representa o procedimento através do qual a importância de um impacto ambiental é ponderada em relação ao outro, procedimento este que ainda gera muita controvérsia e discussão, devido à subjetividade envolvida na escolha da ordem de relevância dos impactos.

E, finalmente, o agrupamento consiste em agrupar as diferentes categorias de impacto em um ou mais conjuntos, fornecendo, em muitos casos, uma pontuação única, de fácil divulgação, porém com considerável agregação de subjetividade e incerteza.

Para realizar a tradução dos dados numéricos do inventário em resultados ambientalmente relevantes, é comum a utilização de métodos de avaliação de impactos, os quais contêm informações ambientais acerca de inúmeras substâncias e recursos, e realizam as etapas da avaliação de impactos utilizando fatores previamente definidos. Cada método possui seus princípios de medições e fatores de caracterização, normalização e ponderação particulares. A estrutura típica da avaliação de impactos, seguida pela grande maioria dos métodos, é apresentada na Figura 2.

Os indicadores correspondentes a cada categoria de impacto definida podem se enquadrar em qualquer estágio entre os resultados numéricos do inventário e os resultados finais (nos quais o efeito ambiental propriamente dito ocorre) na corrente de causa e efeito, como mostrado na Figura 2. Segundo Jolliet *et al.* (2003), considerando esta estrutura, duas principais escolas de métodos de avaliação se desenvolveram:

1. Métodos clássicos de avaliação de impactos, que restringem a modelagem quantitativa a estágios relativamente iniciais

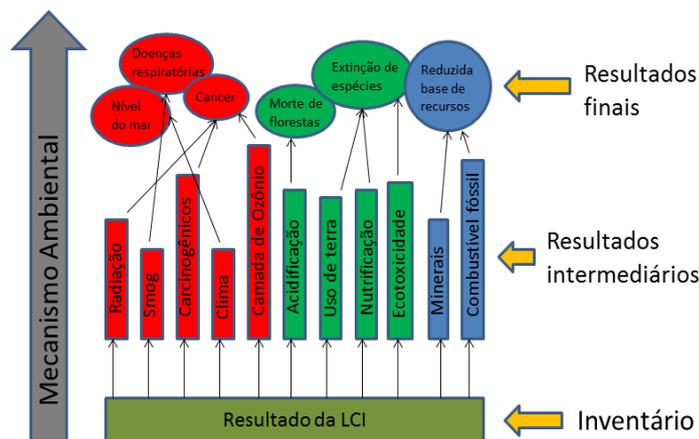


Figura 2 Estrutura geral de um método de análise de impactos. Adaptado de Goedkoop *et al.* (2008).

na corrente de causa e efeito, a fim de minimizar incertezas e agrupar os resultados de inventário nas chamadas “categorias *midpoints*”, que seriam os resultados intermediários;

2. Métodos orientados a danos, que tentam modelar a corrente de causa e efeito até o chamado “*endpoint*”, ou dano propriamente dito, que seria o resultado final; modelagem esta que pode, em certos casos, agregar altos valores de incerteza.

O presente artigo objetiva evidenciar as diferenças advindas do uso de métodos variados de avaliação de impactos, aplicados a um mesmo objeto de estudo, a fim de avaliar até que ponto a escolha do método pode influenciar os resultados finais e a decorrente interpretação do estudo como um todo.

Escolheu-se como objeto de estudo o Cimento Portland CP III 32 (NBR 5735:1991), com adição de 66% de escória de alto-forno, devido à disponibilidade de dados locais acerca da produção deste material, advinda de relatórios técnicos realizados pela Universidade Federal do Espírito Santo (Silva 2006) e de estudo de caso acerca da geração de escória de alto-forno de uma empresa siderúrgica sediada em Vitória-ES (Oliveira e Saade 2010), e devido ao conhecimento das categorias ambientais que estão, tipicamente, associadas à produção do cimento.

## Métodos

A presente pesquisa pode ser dividida em três partes: *i*) revisão bibliográfica, abrangendo a metodologia da etapa de avaliação de impactos em uma ACV, e alguns dos métodos disponíveis, *ii*) aplicação da metodologia da ACV à fabricação do Cimento Portland CP III 32, utilizando seis diferentes métodos de avaliação de impactos, e *iii*) apresentação e discussão dos resultados, avaliando as diferenças obtidas com o uso dos 6 métodos, posterior comparação dos resultados para a classe de impacto que se mostrou mais relevante em todos os métodos ou em sua maioria, e as potenciais implicações decorrentes na interpretação dos resultados.

As etapas de pesquisa realizadas estão de acordo com a norma ISO 14040:1997. A ACV realizada desconsidera os impactos associados ao uso e à disposição final do cimento, encerrando a análise, portanto, no “portão” da fábrica. Logo, a pesquisa se enquadra na definição “*cradle to gate*”, ou “do berço ao portão”.

#### Definição do objetivo e escopo do estudo

O objetivo do presente estudo é realizar análises de ciclo de vida simplificadas do cimento CP III 32, aplicando 5 diferentes métodos de avaliação de impactos ambientais, a fim de avaliar as diferenças obtidas nos resultados e discutir possíveis interpretações discordantes.

A unidade funcional adotada para o estudo foi de uma tonelada de CP III 32. Optou-se por utilizar a plataforma de apoio SimaPro 7.3, por apresentar flexibilidade de manipulação, adaptabilidade a diversos objetivos e, principalmente, possibilidade de utilização de variados métodos de avaliação de impactos.

#### Análise de inventário

Os dados necessários para a modelagem do ciclo produtivo de uma tonelada de CP III 32 foram retirados de três diferentes fontes, expostas no Quadro 1, abaixo apresentado.

#### Avaliação de impactos

Os métodos selecionados para a realização da avaliação de impactos ambientais são todos, a princípio, desenvolvidos para a comunidade europeia, uma vez que a plataforma de apoio adotada foi desenvolvida na Europa, e pelo fato de que as pesquisas europeias relacionadas à ACV, por terem sido iniciadas naquela região, destacam-se perante a comunidade científica mundial. Foram adotados todos os métodos europeus que realizam a etapa da normalização, na qual considera-se que é inserido um fator de subjetividade e/ou incerteza. O Quadro 2 apresenta as particularidades associadas a cada método de avaliação considerado.

A avaliação de impactos realizada desconsiderou as etapas de avaliação de danos, ponderação e pontuação única, uma vez que, como se pode ver no Quadro 2, tais etapas não são contempladas por todos os métodos avaliados.

As três versões disponíveis nos métodos Eco-indicator 99, Recipe Endpoint e Recipe Midpoint são utilizadas para

**Quadro 1** Fonte dos dados de inventário para a realização da ACV de 1 tonelada de CP III 32.

	Consumo de recursos para produção do CP III 32	Emissões associadas à produção de CP III 32	Consumo e emissões associadas à geração da escória de alto-forno
Fonte <sup>1</sup>	Pesquisa realizada pela UFES (SILVA, 2006)	Inventário Brasileiro de Emissões de Efeito Estufa (CARVALHO et al, 2010)	Estudo de caso realizado para a Empresa Siderúrgica A, em Vitória, ES (OLIVEIRA; SAADE, 2010)

<sup>1</sup>Para documentação do consumo energético nos processos desenvolvidos, foi utilizada, quando necessária, a matriz energética brasileira disponível na base de dados *Ecoinvent*.

**Quadro 2** Particularidades dos métodos de avaliação de impactos adotados no estudo.

	Significado da sigla	Órgão e país de origem	Etapas consideradas	Outras particularidades
Eco-indicator 99	-	PRé: Product Ecology Consultants, Holanda	Caracterização, Avaliação de danos, Normalização, Ponderação e Agrupamento	Há 3 versões: hierárquica, igualitária e individualista, e cada versão possui dois conjuntos de ponderação <sup>1</sup> . Método orientado a danos.
Recipe Endpoint	-	PRé: Product Ecology Consultants, Holanda	Caracterização, Avaliação de danos, Normalização, Ponderação e Agrupamento	Há 3 versões: hierárquica, igualitária e individualista <sup>1</sup> , e há dois tipos de conjunto de ponderação: para a Europa e para o mundo <sup>2</sup> . Método orientado a danos.
Recipe Midpoint	-	PRé: Product Ecology Consultants, Holanda	Caracterização e Normalização	Há 3 versões: hierárquica, igualitária e individualista <sup>1</sup> , e há dois tipos de conjunto de ponderação: para a Europa e para o mundo <sup>2</sup> . Método clássico.
CML 2001	Center of Environmental Science	Universidade de Leiden, Holanda	Caracterização e Normalização	Há 3 tipos de conjunto de ponderação: para a Holanda, para a Europa Ocidental e para o mundo <sup>2</sup> . Método clássico.
EDIP 2003	Environmental Design of Industrial Products	Universidade Técnica da Dinamarca, Dinamarca	Caracterização, Normalização e Agrupamento	Método clássico
Impact 2002+	-	Instituto Federal de Tecnologia Suíço (EPFL), Suíça	Caracterização, Avaliação de danos, Normalização, Ponderação e Agrupamento	Combinação de método clássico com método orientado a danos.

<sup>1</sup>A ACV foi realizada considerando as três versões de cada método, utilizando o conjunto de normalização recomendado pelos autores do método;

<sup>2</sup>A ACV foi realizada considerando o conjunto de ponderação para a Europa (ocidental, no caso do CML 2001), uma vez que os demais métodos não contemplam a normalização mundial.

considerar diferentes perspectivas culturais, a fim de lidar com as incertezas metodológicas do modelo, uma vez que as opiniões acerca da seriedade e do risco dos diferentes efeitos ambientais são, usualmente, diversas. Muitos consideram que, a longo prazo os problemas ambientais podem ser resolvidos, enquanto alguns crêem que efeitos ambientais não comprovados cientificamente devem ser desconsiderados. O Quadro 3 resume as características e considerações de cada versão.

Após concluídas as ACV's para o CP III 32 com os 6 métodos citados, foi feita uma análise dos resultados focada apenas na classe de impactos que apresentou a maior relevância nas 6 avaliações (ou, pelo menos, na maior parte das avaliações), a fim de identificar as diferenças advindas da aplicação dos métodos de maneira mais específica e clara, uma vez que nem todos os métodos abrangem as mesmas classes de impactos e, assim, o resultado geral (considerando todas as classes) pode, de certa forma, distorcer as diferenças entre os resultados advindos dos métodos escolhidos.

**Quadro 3** Considerações das três versões de perspectiva cultural disponíveis nos métodos Eco-indicator e Recipe. Adaptado de Goedkoop *et al.* (2000).

	Perspectiva de tempo	Gerenciamento do problema ambiental	Nível de evidência requerido
<b>Igualitária</b>	Muito longo prazo	Problemas podem levar à catástrofes	Todos os possíveis efeitos são considerados
<b>Hierárquica</b>	Equilíbrio entre curto e longo prazo	Políticas adequadas podem evitar muitos problemas	Efeitos incluídos na avaliação com base em consenso
<b>Individualista</b>	Curto prazo	Tecnologia pode evitar muitos problemas	Efeitos comprovados são incluídos

**Resultados e discussão**

Apresentam-se, a seguir, os Figuras referentes à etapa de normalização obtidos para cada método de avaliação de impactos, seguidos da análise dos valores para a classe de impacto mais relevante.

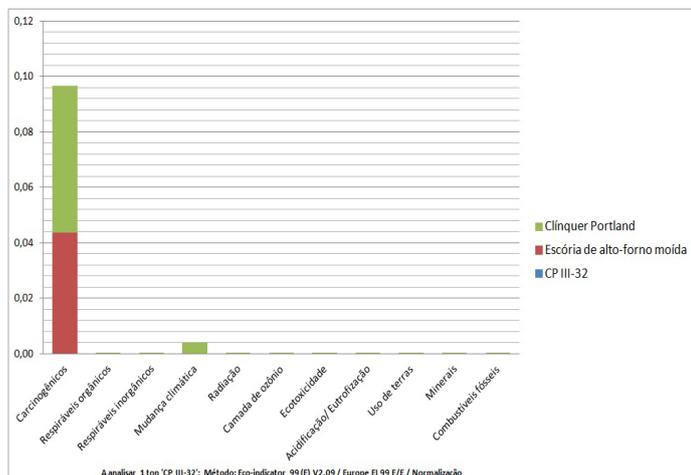
**Eco-indicator 99**

As Figuras 1, 2 e 3 exibem os resultados da etapa de normalização utilizando o método Eco-indicator 99, nas versões igualitária, hierárquica e individualista, respectivamente.

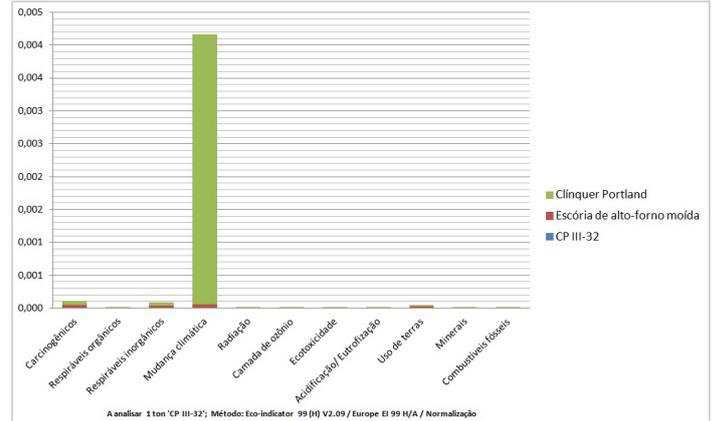
Percebem-se, pela análise dos Figuras abaixo apresentados, diferenças significativas na importância dada às classes de impactos na normalização pelo método Eco-indicator 99. Na versão igualitária, o impacto sobre a saúde humana se destaca consideravelmente, enquanto nas versões hierárquica e individualista destaca-se a contribuição à mudança climática. Tal observação pode ser explicada pela consideração de todos os possíveis efeitos ambientais na versão igualitária do método, não avaliando a comprovação científica do efeito dos potenciais carcinogênicos considerados.

**Recipe Endpoint**

Os Figura 4, Figura 5 e Figura 6 exibem os resultados obtidos com a utilização do método Recipe Endpoint para a etapa de normalização dos impactos associados ao CP III 32, nas versões igualitária, hierárquica e individualista, respectivamente, e



**Figura 1** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Eco-indicator 99 na versão igualitária.



**Figura 2** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Eco-indicator 99 na versão hierárquica.

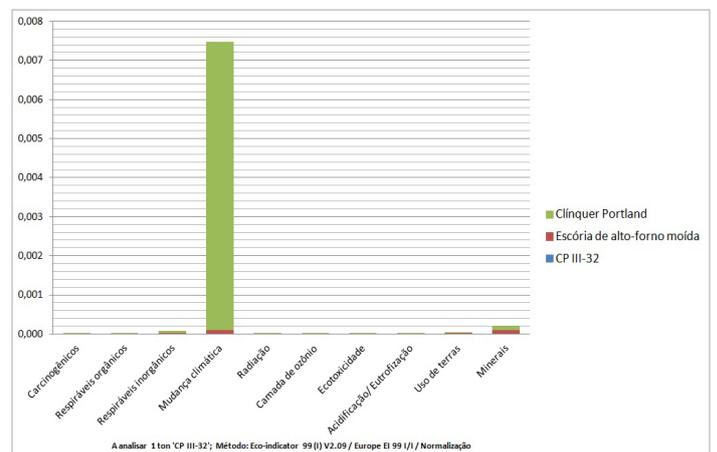
considerando valores europeus de normalização.

Pela análise dos Figuras, percebe-se que houve pouca diferença entre os resultados obtidos com as três versões, destacando, somente, a classe de impactos “toxicidade humana” que se torna irrelevante nas versões hierárquica e individualista, provavelmente pela necessidade de consenso e/ou comprovação científica dos efeitos ambientais nessas duas versões; e a relevância do impacto associado à mudança climática, tanto relacionada à saúde humana, quanto à qualidade dos ecossistemas.

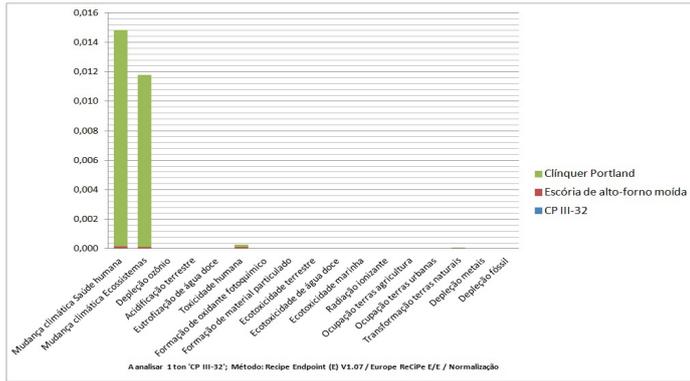
**Recipe Midpoint**

Os Figura 7, Figura 8 e Figura 9 exibem os resultados da etapa de normalização dos impactos associados ao CP III 32 nas versões igualitária, hierárquica e individualista, considerando os valores de normalização europeus.

Pela análise dos Figuras, conclui-se que as classes de impacto “toxicidade marinha” e “toxicidade humana” diminuíram consideravelmente nas versões hierárquica e individualista, quando comparadas à versão igualitária, devido à desconsideração dos efeitos ambientais não comprovados nas duas primeiras versões. A classe de impacto que apresentou maior relevância, nas três versões, foi a “transformação de terra natural”, seguida da “mudança climática”.



**Figura 3** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Eco-indicator 99 na versão individualista.



\*Mudança climática – Saúde humana: considera o aumento do risco à saúde em função de um aumento na temperatura (Goedkoop *et al.* 2009); \*\*Mudança climática - ecossistemas: prevê potencial extinção de espécies devido ao aumento na temperatura (Goedkoop *et al.* 2009).

**Figura 4** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Recipe Endpoint na versão igualitária

#### CML 2001

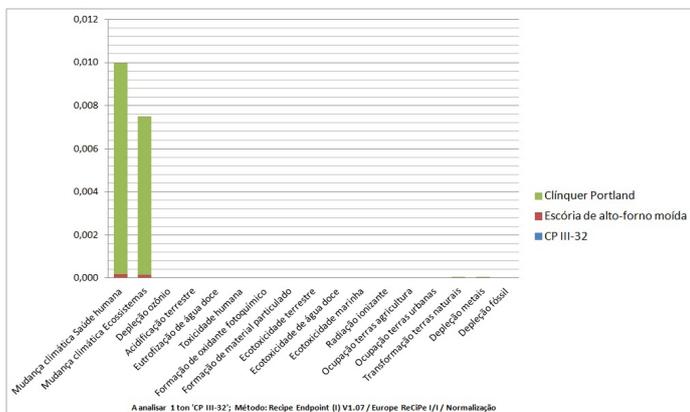
O Figura 10 representa a normalização dos impactos associados ao CP III 32, utilizando o método CML 2001, com valores de normalização europeus.

Destaca-se o impacto associado ao aquecimento global, seguido dos impactos associados à ecotoxicidade aquática marinha e à depleção abiótica.

#### EDIP 2003

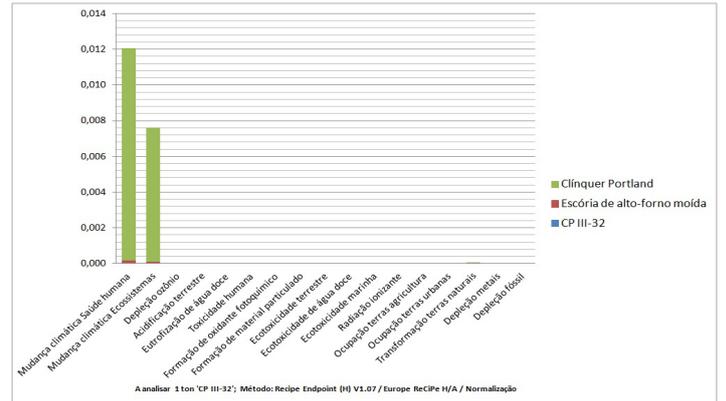
A Figura 11, abaixo apresentada, exibe os resultados obtidos com a normalização dos impactos associados ao CP III 32, utilizando o método de avaliação EDIP 2003. A legenda “100a” refere-se ao horizonte de tempo de 100 anos.

Mais uma vez, a classe de impacto com maior relevância é a relacionada ao aquecimento global, destacando, em bem menor escala, a eutrofização aquática.



\*Mudança climática – Saúde humana: considera o aumento do risco à saúde em função de um aumento na temperatura (Goedkoop *et al.* 2009); \*\*Mudança climática - ecossistemas: prevê potencial extinção de espécies devido ao aumento na temperatura (Goedkoop *et al.* 2009).

**Figura 6** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Recipe Endpoint na versão individualista.



\*Mudança climática – Saúde humana: considera o aumento do risco à saúde em função de um aumento na temperatura (Goedkoop *et al.* 2009); \*\*Mudança climática - ecossistemas: prevê potencial extinção de espécies devido ao aumento na temperatura (Goedkoop *et al.* 2009).

**Figura 5** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Recipe Endpoint na versão hierárquica

#### Impact 2002+

O Figura 12, abaixo, indica os resultados obtidos com a normalização dos impactos associados ao CP III 32, utilizando o método de avaliação Impact 2002+.

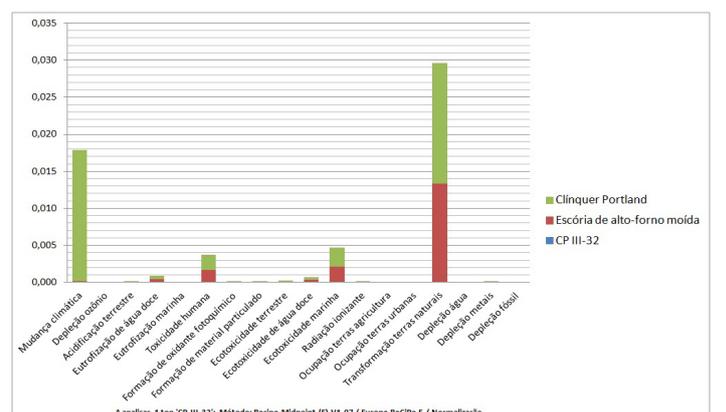
O aquecimento global foi a classe de impacto dominante para este método, seguido do consumo de energias não-renováveis.

#### Análise dos resultados para classe de impacto dominante

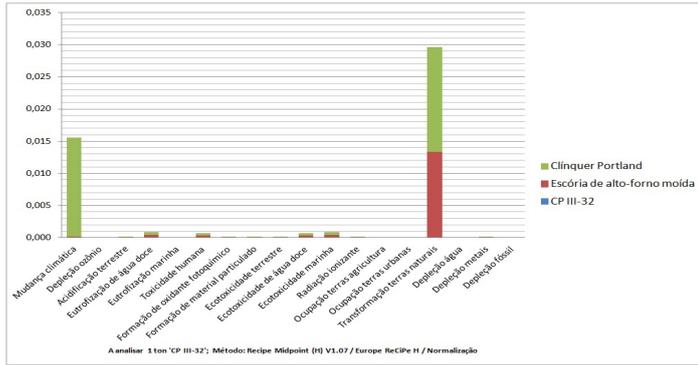
Por meio da análise dos Figuras apresentados acima, é possível identificar que a classe de impactos “mudança climática” ou “aquecimento global” se destacou em todos os métodos utilizados; o que era de se esperar, uma vez que o processo produtivo do clínquer emite quantidade relevante de dióxido de carbono. Foi realizada, portanto, uma análise focada nos valores normalizados relativos a esta classe específica, cujos resultados são apresentados abaixo.

O Figura 13 e a Tabela 1 indicam a variação dos valores obtidos com a normalização para a classe de impacto associada à mudança climática, para cada método adotado, e para as diferentes versões embutidas nos métodos Eco-indicator 99, Recipe Endpoint e Recipe Midpoint. O conjunto de dados apresenta uma variância de 0,000041634 e um desvio padrão de 0,006452459.

Avaliando o Figura 13 e os valores mostrados na Tabela 1,



**Figura 7** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Recipe Midpoint na versão igualitária.



**Figura 8** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Recipe Midpoint na versão hierárquica.

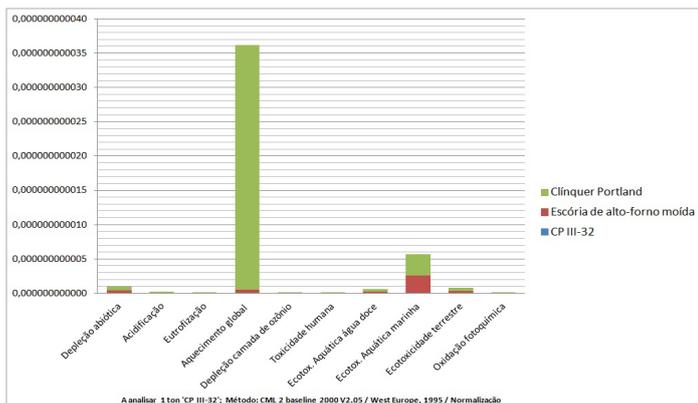
é possível perceber variação considerável no resultado final dos métodos adotados, com um valor máximo de 0,02244, oriundo do uso do método EDIP 2003, e um valor mínimo de  $3,62 \times 10^{-11}$ , oriundo do uso do método CML 2001; apresentando uma diferença de ordem de grandeza  $10^9$ .

A variância da amostra de dados foi pequena, apesar da significativa ordem de grandeza da diferença entre os valores máximo e mínimo, o que, possivelmente, é reflexo dos baixos valores normalizados encontrados nos 6 métodos de avaliação.

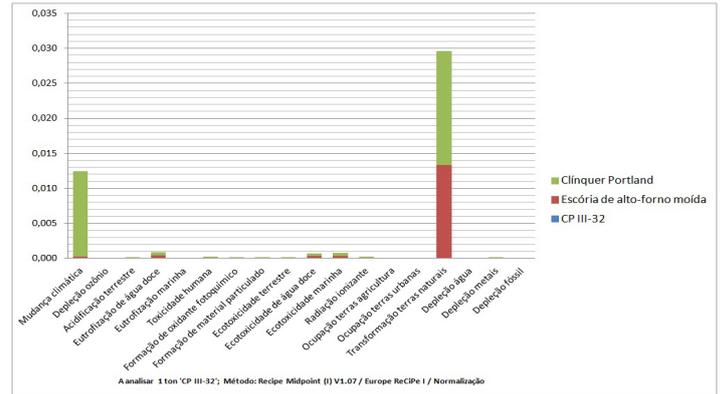
A metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida representa uma ferramenta consistente e consonante com os princípios da sustentabilidade, com grande potencial para auxílio na tomada de decisões relativas às mais diversas áreas e setores industriais e políticos. Devido à ampla gama de aplicações a que se destina, e ao seu referido potencial, a realização da ACV demanda clara identificação e documentação das considerações feitas durante o estudo, e dos métodos utilizados, para garantir a correta interpretação dos resultados fornecidos.

A importância da etapa de avaliação dos impactos ambientais reside na simplificação dos resultados, facilitando sua compreensão e divulgação. Inserem-se nesta etapa, entretanto, níveis de incerteza e subjetividade que influenciam consideravelmente o resultado final, seja por perda de dados numéricos relevantes, por agregação de resultados distintos, ou por inserção de juízo de valor nos cálculos realizados.

Os seis diferentes métodos utilizados destacaram, nos valores



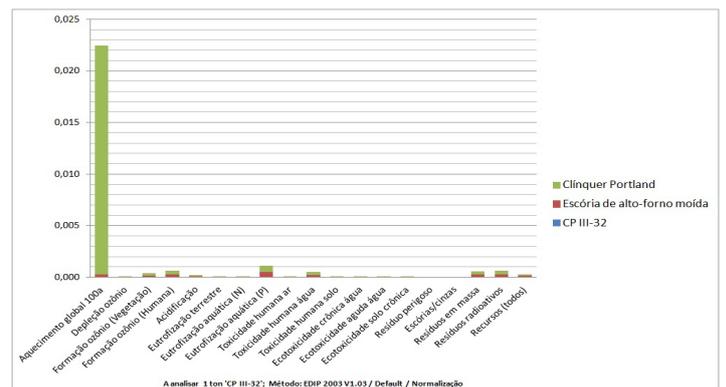
**Figura 10** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o CML 2001.



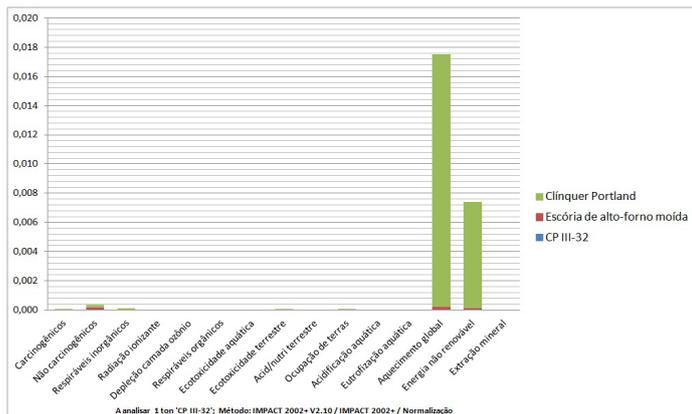
**Figura 9** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Recipe Midpoint na versão individualista.

normalizados, a classe de impacto relativa à mudança climática, porém esta não foi dominante em todas as ACV's realizadas. Ademais, as outras classes de impacto variavam em termos de sua relevância dependendo do método adotado: para o Recipe Midpoint, a transformação de terras naturais foi o impacto mais significativo, para o Impact 2002+ o consumo de energia não-renovável se destacou, ficando atrás apenas da mudança climática, para o Eco-indicator na versão igualitária o impacto associado aos carcinogênicos apresentou-se como o mais significativo, e para o CML 2001 o impacto relativo à toxicidade marinha mostrou-se relevante, dentre outras diferenças.

A análise dos valores normalizados específicos para o impacto relativo à mudança climática mostrou grande diferença entre os valores máximo e mínimo, porém a amostra apresentou pequeno valor de variância, o que indica que os valores para todos os métodos não se encontravam muito distantes do valor esperado. Sabe-se que a produção de cimento encontra na emissão de  $CO_2$  seu maior passivo ambiental, portanto era de se esperar que a classe de impacto associada à mudança climática se mostrasse relevante em todos os métodos, o que poderia explicar a relativa uniformidade dos valores normalizados. Os Figuras demonstraram, entretanto, que as demais classes de impacto apresentaram grande variação em termos de sua importância perante o problema ambiental como um todo, podendo implicar em conclusões divergentes em torno da carga ambiental característica do produto avaliado, no caso, o CP III 32.



**Figura 11** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o EDIP 2003.



**Figura 12** Normalização dos impactos associados a 1 ton de CP III 32, utilizando o Impact 2002+

Os resultados da presente pesquisa destacaram as possíveis diferenças entre os indicadores de impacto resultantes de avaliações de impactos de ACV's, advindos do uso dos diversos métodos disponíveis atualmente. Enfatiza-se, portanto, a necessidade de cautela na escolha do método, e de pesquisa acerca da metodologia empregada em cada modelo, para que as considerações feitas pelos autores do método sejam conhecidas, possibilitando garantir uma adequação da avaliação ao contexto de estudo, e uma interpretação mais consciente dos resultados.

## Referências

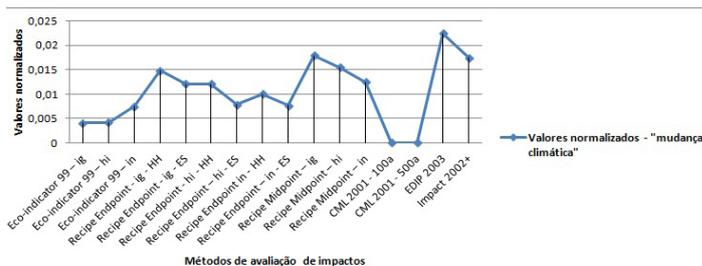
ABNT (1991) Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland de alto-forno**. NBR 5735. Rio de Janeiro, ABNT.

Baumann H, Tillman A (2004) **The Hitch Hiker's Guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application**. Londres, Studentlitteratur.

Carvalho JO, Kihara Y, Maia C, Visado G (2010) "Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produtos Mineraiis (Parte 1)". In: **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**, Brasília, pp 37.

Ferrão PC (1998) **Introdução à gestão ambiental: a avaliação do ciclo de vida de produtos**. IST Press.

Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, Schryver AD, Struijs J, van Zelm R (2009) **Recipe: a life cycle impact assessment method which comprises**



**Figura 13** Variação dos valores normalizados para a classe de impacto associada à mudança climática, para os diferentes métodos adotados.

harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Netherlands, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment.

Goedkoop M, Schryver AD, Oele M (2008) **Introduction to LCA with SimaPro 7**. Amersfoort, Product Ecology Consultants.

Goedkoop M, Effting S, Collignon M (2000) **The Eco-Indicator 99 – a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Manual for Designers**. 2 ed. Amersfoort, Product Ecology Consultants.

ISO (1997) International Organization for Standardization. **ISO 14040: Environmental Management – Life cycle principles and Framework**. Switzerland.

ISO (2000) International Organization for Standardization. **ISO 14042: Environmental Management –Life cycle impact assessment**, Switzerland.

Joliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R (2003) **IMPACT 2002+ : a new life-cycle impact assessment methodology**. International Journal of LCA 8: 324-330.

Oliveira BM, Saade MRM (2010) **Contribuição à aplicação da análise do ciclo de vida na indústria siderúrgica: critérios para alocação de impactos**. 2010. Projeto (Graduação) - Departamento de Engenharia Ambiental. Vitória, Universidade Federal do Espírito Santo.

Owens JW (1997) Life-Cycle Assessment: constraints on moving from inventory to impact assessment. **Journal of Industrial Ecology** 1: 37-49.

Seppälä J, Basson L, Norris GA (2002) Decision analysis frameworks for Life-Cycle Impact Assessment. **Journal of Industrial Ecology** 5: 45-68.

Silva MG, Silva VG, Rodrigues GLC, Polese MO (2006) **Propriedades, Normalização e Tendências na Adição de Escória de Alto-Forno em Cimentos e Concretos**. Boletim Técnico. Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas, Centro Tecnológico. Vitória, Universidade Federal do Espírito Santo.

**Tabela 1** Valores normalizados para a classe de impactos relativa à mudança climática, para cada método escolhido, e suas versões.

	Eco-indicator 99 - ig <sup>1</sup>	Eco-indicator 99 - hi <sup>2</sup>	Eco-indicator 99 - in <sup>3</sup>	Recipe Endpoint - ig <sup>1</sup>	Recipe Endpoint - hi <sup>2</sup>	Recipe Endpoint - in <sup>3</sup>	Recipe Midpoint - ig <sup>1</sup>	Recipe Midpoint - hi <sup>2</sup>	Recipe Midpoint - in <sup>3</sup>	CML 2001	EDIP 2003	Impact 2002+
Valor normalizado para a classe "aquecimento global" ou "mudança climática"	0,004133	0,004166	0,007475	0,01481 (human health) <sup>4</sup>	0,012085 (human health) <sup>4</sup>	0,009987 (human health) <sup>4</sup>	0,017935	0,015518	0,012447	3,62E-11 (100 anos)	0,02244	0,017514
				0,012103 (ecosystems) <sup>5</sup>	0,007904 (ecosystems) <sup>5</sup>	0,00772 (ecosystems) <sup>5</sup>				4,3E-11 (500 anos)		

<sup>1</sup>Versão igualitária; <sup>2</sup>Versão hierárquica; <sup>3</sup>Versão individualista, <sup>4</sup>Considera-se o aumento do risco à saúde em função de um aumento na temperatura, <sup>5</sup>Prevê potencial extinção de espécies devido ao aumento na temperatura (Goedkoop *et al.* 2009).