

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

**ANÁLISE AMBIENTAL DA VIABILIDADE DE SELEÇÃO DE  
PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL ATRAVÉS DA ACV E DO  
SOFTWARE BEES 3.0**

**André Silva Oliveira**

Porto Alegre  
2007

ANDRÉ SILVA OLIVEIRA

**ANÁLISE AMBIENTAL DA VIABILIDADE DE SELEÇÃO DE  
PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL ATRAVÉS DA ACV E DO  
SOFTWARE BEES 3.0**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia

Porto Alegre  
2007

O48a Oliveira, André Silva

Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0 / André Silva Oliveira. – 2007.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.

Orientação: Prof. Dr. Luis Carlos Pinto da Silva Filho

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Indústria da construção. 3. Materiais de construção – Resíduos. 4. Impacto ambiental. I. Silva Filho, Luis Carlos Pinto da, orient. II. Título.

CDU-69:658(043)

**ANDRÉ SILVA OLIVEIRA**

**ANÁLISE AMBIENTAL DA VIABILIDADE DE SELEÇÃO DE  
PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL ATRAVÉS DA ACV E DO  
SOFTWARE BEES 3.0**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Meio Ambiente, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de novembro de 2007

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho  
Phd. pela Univ. de Leeds  
orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Miguel Aloysio Sattler (UFRGS)**  
Phd. pela University of Sheffield

**Profa. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Gino Roberto Gehling (UFRGS)**  
Dr. pela Universitat Politècnica de Catalunya

Dedico este trabalho à minha família e meus amigos, pela compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Luis Carlos, me orientou na escolha do tema e desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos amigos e família, que me ajudaram a realizar este sonho.

## RESUMO

OLIVEIRA, A. ANÁLISE AMBIENTAL DA VIABILIDADE DE SELEÇÃO DE PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL ATRAVÉS DA ACV E DO SOFTWARE BEES 3.0. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

Ao longo da história da humanidade, a visão de progresso prevalente se expressa pelo crescente domínio e transformação da natureza. De acordo com este paradigma, os recursos naturais são vistos como ilimitados. Isto pode justificar a falta de preocupação com os resíduos gerados durante a produção e ao final da vida útil dos produtos, características de um modelo linear de produção. No contexto atual de preocupação com a degradação ambiental e o esgotamento das reservas naturais muitas iniciativas foram implementadas no sentido de conscientizar os setores produtivos da economia e os órgãos governamentais dos países da necessidade de mudanças. A indústria da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia e um grande gerador de resíduos. O desenvolvimento de produtos, processos e serviços menos agressivos ao meio ambiente e à saúde humana é um desafio para as nações que buscam o desenvolvimento sustentável e encontram na indústria da construção civil um suporte para as mudanças necessárias. Dentro desta realidade, existe a necessidade do desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem na seleção de produtos mais sustentáveis na construção civil. Em alguns países, softwares estão sendo desenvolvidos para servirem como ferramenta de apoio à tomada de decisão na busca por produtos e serviços mais sustentáveis. Alguns destes, como o Building for Environmental and Economic Sustainability versão 3.0 (BEES 3.0), são fundamentados na Análise de Ciclo de Vida (ACV). Este é um procedimento sistemático para mensurar e avaliar os impactos que um produto ou material causa no meio ambiente e sobre a saúde humana, desde a sua produção até a disposição final. O BEES é um programa de apoio à decisão desenvolvido pela SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), para ser utilizado na escolha de produtos e materiais da construção e em programas de certificação ambiental de produtos e edifícios. O mesmo foi desenvolvido nos Estados Unidos, por isso não se pode ter certeza de sua aplicabilidade direta para as condições de países com realidades tão diferentes como é o caso do Brasil. O presente estudo buscou verificar a possibilidade de gerar dados confiáveis sobre os impactos causados durante o ciclo de vida das estruturas de concreto armado e comparar os resultados com os gerados pelo software BEES 3.0, verificando a validade de suas premissas para a realidade brasileira. Os resultados indicam que softwares como o BEES podem ser importantes para a análise de impactos ambientais, mas necessitam ser adaptados para a realidade brasileira. É fundamental, ainda, coletar dados adequados sobre as práticas produtivas usadas no Brasil para alimentar este tipo de análise. A análise de três tipos de concretos, com e sem adições, usando as premissas do programa, evidencia que é possível projetar materiais de construção com menor impacto ambiental.

Palavras-chave: impactos ambientais, sustentabilidade, adição de resíduos;

## ABSTRACT

OLIVEIRA, A. ANÁLISE AMBIENTAL DA VIABILIDADE DE SELEÇÃO DE PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL ATRAVÉS DA ACV E DO SOFTWARE BEES 3.0. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

Along the evolution of mankind, the dominating vision of progress has often been represented by the control and transformation of nature. According to this paradigm, natural resources are seen as limitless. This can justify the historical lack of concern regarding the production of waste during the manufacturing and use of goods, a typical stance of the linear model of production that prevail until almost the end of the XXth century. Since then, a rising awareness of the importance of environmental values has brought along a new concern about the degradation of natural environments and the exhaustion of natural resources. In tandem, many initiatives started to be implemented to convince private and public sectors of the economy of the need for changes. The development of new products, processes and services, less aggressive to the environment and the public health, is a challenge for all nations that are trying to pursue a more sustainable development path. The civil construction industry has an important role in this scenario, because it is the biggest consumer of natural resources of any economy and a great source of residues. Given the complexity of the issue, it is useful to develop computational tools to assist in the selection of “greener” products. Various countries are developing software aids that help making more informed decisions regarding sustainable practices. One of them is the *Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)*, developed for the *SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)* in the US, to be used in the selection of products and materials for construction and in programs of environmental certification of products and buildings. It is based on a Life Cycle Assessment (LCA), a systematic procedure used to measure the impacts that a product or material causes in the environment or on the human being’s health, from its production up to final disposal. Although environmental problems are normally global and not limited by political barriers, differences between production practices, costs and general policy values among Brazil and the US gives rise to caution in adopting the BEES software in Brazil without a previous evaluation and adaptation to the local reality. To help in this sense, this study investigated how results generated with version 3.0 of the BEES software would compare with values derived from a direct analysis of the environmental impact of the production of a reinforced concrete beam. The analysis of beams produced with three types of concrete, with and without the addition of supplementary cementing materials, provided evidence that it is possible, in both cases, to identify key environmental costs and project structures to obtain a smaller environmental impact. The study indicated that software such as BEES can be quite useful in the process of identifying and checking better production practices. It is necessary, however, to adapt them to the local reality and to start collecting reliable data about the environmental costs of production practices used in Brazil to allow them to work properly.

Keywords: environmental impacts, sustainability, supplementary cementing materials

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1 CONTEXTO .....	19
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO .....	24
1.2.1 Objetivo Principal .....	24
1.2.2 Objetivos Secundários .....	25
1.3 PRESSUPOSTOS .....	25
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	26
<b>2 AVALIAÇÃO AMBIENTAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL</b> .....	28
2.1 IMPACTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	28
2.2 NORMAS AMBIENTAIS.....	31
2.3 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV).....	32
2.3.1 Definição do Objetivo e Escopo .....	33
2.3.2 Análise do Inventário .....	34
2.3.3 Avaliação dos Impactos .....	35
2.3.4 Interpretação do Ciclo de Vida .....	36
<b>3 METODOLOGIA DE PESQUISA</b> .....	37
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	38
3.2 CONHECENDO O BEES 3.0 .....	38
3.3 ESCOLHA DOS CONCRETOS .....	39
3.4 DEFINIÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO.....	39
3.5 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE VIGAS .....	39

3.6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE VIGA COM O BEES 3.0 .....	41
3.7 CONCLUSÕES DA PESQUISA .....	41
<b>4 ANÁLISE DA FERRAMENTA BEES 3.0 .....</b>	<b>42</b>
4.1 PASSO 1: SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE CÁLCULO.....	45
4.2 PASSO 2: DEFINIÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA COMPARAÇÃO .....	47
4.3 PASSO 3: GERAÇÃO DE GRÁFICOS DE IMPACTOS .....	49
4.4 SIMULAÇÕES COM O SOFTWARE BEES 3.0 .....	50
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	57
<b>5 ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE CONCRETO ARMADO DE CIMENTO PORTLAND.....</b>	<b>58</b>
5.1 AGREGADOS .....	59
5.2 CIMENTO PORTLAND .....	64
5.2.1 Processo de Fabricação Via Seco .....	66
5.2.2 Principais Tipos de Cimento Portland .....	68
5.3 FORMAS DE MADEIRA .....	71
5.4 ARMADURA DE AÇO .....	72
<b>6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL .....</b>	<b>74</b>
6.1 ESCOPO .....	74
6.1.1 Coleta de Dados .....	75
6.1.2 Delimitação das Fronteiras do Estudo.....	78
6.1.3 Definição da Unidade Funcional .....	79
6.1.4 Análise dos Impactos Ambientais .....	79

6.2 INVENTÁRIO 1º CENÁRIO .....	80
6.2.1 Inventário 1º Cenário – Região de Estudo 1.....	80
6.2.2 Inventário 1º Cenário – Região de Estudo 2.....	82
6.2.3 Inventário 1º Cenário – Região de Estudo 3.....	84
6.2.4 Inventário 1º Cenário – Região de Estudo 4.....	84
6.2.5 Inventário Final do 1º Cenário .....	85
6.3 ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO 1º CENÁRIO .....	86
6.3.1 Impacto Ambiental Global .....	86
6.3.2 Impacto Ambiental Regional .....	89
6.3.3 Impacto Ambiental Local .....	91
6.4 INVENTÁRIO 2º CENÁRIO .....	93
6.4.1 Inventário 2º Cenário – Região de Estudo 1.....	94
6.4.2 Inventário 2º Cenário – Região de Estudo 2.....	95
6.4.3 Inventário 2º Cenário – Região de Estudo 3.....	96
6.4.4 Inventário 2º Cenário – Região de Estudo 4.....	97
6.4.5 Inventário Final do 2º Cenário .....	97
6.5 ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO 2º CENÁRIO .....	98
6.5.1 Impacto Ambiental Global .....	98
6.6 INTERPRETAÇÃO .....	101
<b>7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL COM O BEES 3.0 .....</b>	<b>107</b>
7.1 SELEÇÃO DE PARÂMETROS E ALTERNATIVAS .....	107
7.1.1 Seleção de Parâmetros de Cálculo .....	107
7.1.2 Escolha de Alternativas .....	107
7.1.3 Escolha de Categorias de Impactos Ambientais .....	108

7.2 RESULTADOS DO BEES 3.0 .....	108
7.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	109
<b>8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>113</b>
8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	113
8.2 CONCLUSÕES .....	114
8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	115
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>116</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: fluxo de Inventário .....	23
Figura 2.1: etapas da ACV .....	33
Figura 3.1: fluxograma da pesquisa .....	37
Figura 4.1: escolha de parâmetros .....	45
Figura 4.2: escolha do elemento.....	47
Figura 4.3: tela de escolha dos gráficos a serem gerados pelo BEES 3.0 .....	50
Figura 4.4: grande grupo envoltória ... ..	51
Figura 4.5: gráfico de desempenho ambiental total das vigas .....	52
Figura 4.6: gráfico de desempenho ambiental por estágio de ciclo de vida .....	54
Figura 4.7: gráfico de fluxos do aquecimento global .....	55
Figura 4.8: gráfico saúde humana por fluxos .....	55
Figura 4.9: gráfico de poluição do ar por fluxos .....	56
Figura 5.1: explosão da rocha matriz .....	62
Figura 5.2: transporte de matacões até o britador .....	62
Figura 5.3: britador .....	62
Figura 5.4: separação por granulometria .....	62
Figura 5.5: draga de areia .....	63
Figura 5.6: transporte fluvial de areia .....	63
Figura 5.7: explosão de bancada de calcário .....	65
Figura 5.8: vista de um britador tipo martelo .....	65
Figura 5.9: vista de um silo de homogeneização .....	66
Figura 5.10: moagem final .....	68
Figura 5.11: vista de uma armadura de aço .....	72
Figura 6.1: localizações dos atores envolvidos .....	77
Figura 6.2: fronteiras do estudo .....	78

Figura 6.3: variação de emissão de CO <sub>2</sub> de cada viga em função de seu consumo de cimento .....	87
Figura 6.4: distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo .....	88
Figura 6.5: distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo considerando transporte de madeira por 2.000 km .....	88
Figura 6.6: gráfico de potencial de acidificação das vigas .....	90
Figura 6.7: gráfico do potencial de poluição do ar .....	93
Figura 6.8: variação de emissão de CO <sub>2</sub> de cada viga em função de seu consumo de cimento .....	100
Figura 6.9: distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo .....	100
Figura 6.10: distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo considerando transporte de madeira por 2.000 km .....	101
Figura 6.11: gráfico do potencial de aquecimento global dos dois cenários estudados...	102
Figura 6.12: gráfico constituintes do concreto e aquecimento global .....	103
Figura 6.13: gráfico constituintes do concreto e acidificação .....	104
Figura 6.14: gráfico constituintes do concreto e consumo de água .....	104
Figura 6.15: gráfico constituintes do concreto e nutrificação .....	105
Figura 6.16: gráfico constituintes do concreto e poluição do ar .....	106
Figura 7.1: gráfico comparação do potencial de aquecimento global .....	109
Figura 7.2: gráfico comparação do potencial de acidificação .....	110
Figura 7.3: gráfico comparação do potencial de consumo de água .....	111
Figura 7.4: gráfico comparação do potencial de nutrificação .....	111
Figura 7.5: gráfico comparação do potencial de poluição do ar .....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: geração de CO <sub>2</sub> .....	21
Tabela 4.1: categorias de pesos para impactos .....	46
Tabela 4.2: organização dos elementos no BEES 3.0 .....	48
Tabela 4.3: tipos de concretos disponíveis no BEES 3.0 .....	49
Tabela 5.1: composição dos cimentos portland comum e compostos .....	69
Tabela 5.2: composição dos cimentos portland alto-forno e pozolânico .....	70
Tabela 5.3: composição dos cimentos portland de alta resistência inicial .....	70
Tabela 5.4: matéria-prima na produção do aço .....	73
Tabela 6.1: concretos estudados .....	74
Tabela 6.2: composição média do CPIV-32 Votoran .....	75
Tabela 6.3: quantidade de madeiras para formas .....	75
Tabela 6.4: quantidade de aço .....	75
Tabela 6.5: distância de transporte entre os atores envolvidos .....	77
Tabela 6.6: impactos ambientais avaliados .....	79
Tabela 6.7: fluxos de CO <sub>2</sub> derivados do transporte de matéria-prima – região de estudo 1 .....	81
Tabela 6.8: fluxos de poluentes derivados da produção de cimento – região de estudo 1 .....	81
Tabela 6.9: total de fluxos da região de estudo 1 - 1º Cenário .....	82
Tabela 6.10: fluxos de CO <sub>2</sub> na produção do concreto A - 1º Cenário .....	83
Tabela 6.11: fluxos de CO <sub>2</sub> na produção do concreto B - 1º Cenário .....	83
Tabela 6.12: fluxos de CO <sub>2</sub> na produção do concreto C - 1º Cenário .....	83
Tabela 6.13: fluxos de água na produção dos concretos - 1º Cenário .....	83
Tabela 6.14: total de fluxos na região de estudo 3 - 1º Cenário .....	84
Tabela 6.15: total de fluxos na região de estudo 4 - 1º Cenário .....	85
Tabela 6.16: inventário final do 1º Cenário .....	85

Tabela 6.17: fator de equivalência para aquecimento global .....	86
Tabela 6.18: potencial de aquecimento global das vigas - 1º Cenário .....	87
Tabela 6.19: fator de equivalência para acidificação .....	89
Tabela 6.20: potencial de acidificação - 1º Cenário .....	89
Tabela 6.21: potencial de consumo de água - 1º Cenário .....	90
Tabela 6.22: fator de equivalência de nutrição .....	91
Tabela 6.23: determinação do potencial de nutrição total das vigas - 1º Cenário ....	92
Tabela 6.24: fator de equivalência para poluição do ar .....	92
Tabela 6.25: potencial de poluição do ar - 1º Cenário .....	93
Tabela 6.26: fluxos de CO <sub>2</sub> derivados do transporte de matéria-prima – região de estudo 1 .....	94
Tabela 6.27: fluxos de poluentes derivados da produção de cimento – região de estudo 1 .....	94
Tabela 6.28: total de fluxos na região de estudo 1 - 2º Cenário .....	95
Tabela 6.29: fluxos de CO <sub>2</sub> na produção do concreto A - 2º Cenário .....	95
Tabela 6.30: fluxos de CO <sub>2</sub> na produção do concreto B - 2º Cenário.....	96
Tabela 6.31: fluxos de CO <sub>2</sub> na produção do concreto C - 2º Cenário .....	96
Tabela 6.32: fluxos de água na produção dos concretos - 2º Cenário .....	96
Tabela 6.33: total de fluxos na região de estudo 3 - 2º Cenário .....	97
Tabela 6.34: total de fluxos na região de estudo 4 - 2º Cenário .....	97
Tabela 6.35: inventário final do 2º Cenário .....	98
Tabela 6.36: fator de equivalência para aquecimento global .....	99
Tabela 6.37: potencial de aquecimento global das vigas – 2º Cenário .....	99
Tabela 7.1: potenciais de poluição pelo BEES 3.0 .....	108

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ACV: Análise do Ciclo de Vida

ISO: Organização Internacional para Padronização

IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

EPA: Agência de Proteção Ambiental Americana

CGTEE: Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica

cps: corpos de prova



# 1 INTRODUÇÃO

Este primeiro capítulo visa orientar o leitor quanto ao conteúdo desta dissertação. Discute-se, no princípio do mesmo, o contexto no qual a proposta de pesquisa está inserida, seguido pelos objetivos do trabalho, os pressupostos e a apresentação da estrutura do trabalho.

## 1.1 CONTEXTO

Ao longo da história da humanidade, a visão do progresso vem se confundindo com o crescente domínio e transformação da natureza. De acordo com este paradigma, os recursos naturais são vistos como ilimitados. Isto pode justificar a falta de preocupação com os resíduos gerados durante a produção e ao final da vida útil dos produtos, características de um modelo linear de produção, como explica JOHN (2000).

O contexto atual de preocupação com a degradação ambiental e o esgotamento das reservas naturais tem feito com que muitas medidas sejam implementadas, principalmente por instituições internacionais, no sentido não só de conscientizar os setores produtivos da economia e, os órgãos governamentais dos países, mas também a população em geral.

A ISO 14000 – Normas de Gerenciamento Ambiental – pode ser considerada como um reflexo desta mentalidade, onde a incorporação de “benfeitorias” ambientais acaba sendo a única alternativa para justificar a produção de bens com processos que agridam o meio-ambiente ou consomem recursos. No nível atual de desenvolvimento tecnológico, a adoção destas políticas de compensação é fundamental para a sobrevivência de muitas empresas.

Recentemente, uma grande rede de articulação que busca a conservação da natureza, conhecida no mundo todo como WWF, elaborou um documento que responde ao seguinte questionamento: “É tecnicamente possível satisfazer à crescente demanda energética global usando fontes e tecnologias de energia limpa e sustentável capazes de proteger o clima do planeta?”.

A resposta, segundo o relatório, é sim. Se as decisões necessárias para mudar a matriz de produção e consumo energético forem tomadas nos próximos cinco anos. Segundo o relatório, ainda há tempo para desenvolver e empregar as tecnologias necessárias para evitar o aquecimento global, e todos os efeitos deletérios associados ao mesmo.

O impacto que mais preocupa os ambientalistas é o aquecimento global. De acordo com a WWF-BRASIL (2007), o aquecimento global, um dos principais problemas ambientais atuais, poderá custar à economia mundial até 20% do PIB anual do planeta nas próximas décadas, se não forem tomadas medidas urgentes para reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa e evitar enchentes, tempestades e outras catástrofes naturais.

Para salvar o clima do nosso planeta, de acordo com um o relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), a humanidade terá de diminuir de 50% a 85% as emissões de CO<sub>2</sub> até a metade deste século.

De acordo com Mehta (2007), a temperatura da terra tem aumentado desde 1950. Há muito tempo os cientistas encontraram a forte relação entre a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e o aquecimento da superfície da terra. Na verdade, sem a presença deste gás, a terra seria inabitável, pois a temperatura na sua superfície iria cair de forma considerável. Durante milhões de anos, o teor de dióxido de carbono foi regulado pelo balanço entre as emissões vulcânicas e a fixação do mesmo em vegetais. Oscilações neste balanço causaram grandes alterações climáticas, com períodos de maior calor alternando com glaciações que cobriram de boa parte da crosta terrestre.

O problema é que a grande emissão de gás carbônico a partir da revolução industrial e o incremento no consumo de combustíveis fósseis estão causando uma intensificação muito rápida do fenômeno de acumulação de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Segundo vários cientistas, este fenômeno já está causando mudanças climáticas de grande impacto, que incluem o degelo acelerado nas calotas polares e a alteração de climas locais, com incremento de tempestades, alteração do regime de chuvas e surgimento de regiões desérticas que estão sendo devastadas por secas antes nunca vistas.

Segundo Malhotra (2007) a taxa de mudança da temperatura da terra no fim da última era glacial foi de apenas 1°C em um período de mil anos. O documento do IPCC (2007) estima que, até o fim deste século, a temperatura da Terra pode subir de 1,8°C, na melhor das hipóteses, ou até 4°C, em cenários menos amenos. O relatório prevê que isto pode acarretar o aumento na intensidade de tufões e secas, além de elevação no nível dos oceanos.

Ou seja, nos últimos 500 milhões de anos, a terra entrou e saiu de diversas eras glaciais, mas as mudanças foram lentas, o que permitiu que muitas espécies se adaptassem. Desde o início da civilização humana, o clima havia se mantido ameno e constante. Nos últimos anos,

porém, as mudanças climáticas estão indicando que o clima pode ser alterado drasticamente em apenas uma geração, o que pode trazer conseqüências imprevisíveis.

Além do dióxido de carbono, existem outros gases causadores do efeito estufa (Green House Gas, ou GHG, sigla em inglês), tais como o metano e óxidos de nitrogênio. De acordo com Malhotra (2007), todavia, o CO<sub>2</sub> é o que mais contribui com o aquecimento global devido a grande quantidade gerada.

Os maiores geradores de CO<sub>2</sub> são os países desenvolvidos, como pode ser visto na tabela 1.1.

Tabela 1.1: Geração de CO<sub>2</sub>

Países	Geração de CO <sub>2</sub> t per capita / ano
Estados Unidos	19,7
União Européia	8,6
China	2,8
Índia	1,1

Adaptado de Malhotra (2007)

No ano 2000 houve uma emissão de CO<sub>2</sub> que totalizou aproximadamente 21 bilhões de toneladas em todo o mundo. Só os Estados Unidos e a União Européia foram responsáveis por 45% dessas emissões.

A América do Norte é entre os continentes o maior responsável pelo aquecimento global por ser o maior consumidor de combustíveis fósseis. Em 1998 a América do Norte foi responsável por 25,8% das emissões de dióxido de carbono do mundo todo (MALHOTRA, 2007). Os maiores países deste continente, Estados Unidos e Canadá, possuem juntos 5% da população mundial e consomem 25% da energia consumida no planeta.

Considerando as emissões de GHG através de queimadas das florestas, de acordo com a WWF – Brasil (2007), o Brasil ficará em 4º lugar entre os maiores responsáveis pelo efeito estufa. As queimadas, principalmente da Amazônia, representam 75% das emissões brasileiras.

Dentro de uma realidade de destruição do planeta ocorreram algumas manifestações de organizações que buscam a garantia de um futuro para as próximas gerações em um mundo equilibrado. Este equilíbrio almejado seria entre os três pilares do desenvolvimento sustentável: desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e proteção ambiental.

O primeiro passo dado neste sentido aconteceu em 1972, quando ocorreu em Estocolmo a Primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. A partir deste evento floresceu a conscientização sobre como o desenvolvimento econômico pode causar impactos ambientais irreversíveis e desequilíbrios sociais.

Outra conferência importante foi a ECO-92, que ocorreu no Rio de Janeiro em 1992, onde foi consagrado o conceito de desenvolvimento sustentável e produzida a Agenda 21. Este documento estabeleceu a importância de cada país se comprometer a refletir, global e localmente sobre a forma de cada setor da sociedade cooperar no estudo de soluções para os problemas sócio-ambientais.

A Agenda 21 foi ratificada pela maioria dos países, mas o mesmo não aconteceu com o Protocolo de Quioto (1997 – Japão). Essa diferença se deve ao fato da Eco-92 apresentar apenas propostas, sem estabelecer prazos, nem limites para a emissão de poluentes.

Já o Protocolo de Quioto estabeleceu metas para a redução da emissão de gases poluentes que intensificam o efeito estufa, com destaque para o dióxido de carbono. Este protocolo exigia mudança na matriz energética dos países e esbarrou no alto custo destes investimentos. Alguns países desenvolvidos, principalmente os Estados Unidos, se negaram a assinar o acordo. O presidente George W. Bush não estava disposto a submeter o desenvolvimento da economia norte-americana aos sacrifícios necessários para a implementação das medidas propostas.

De acordo com Malhotra (2007) nos dias de hoje são discutidas duas formas de frear o aquecimento global, são elas: seqüestro de carbono e redução da emissão de GHG. De acordo com Hawkins et al. (2006), o seqüestro de carbono geológico implica em separar grande parte do CO<sub>2</sub> gerado quando o carvão mineral é transformado em energia útil e transportá-lo para locais onde possa ser armazenado bem no fundo da terra em meios porosos. Estes locais para armazenar CO<sub>2</sub> são campos de petróleo ou gás esgotados ou formações salinas (estratos geológicos permeáveis repletos de água salgada). De acordo com Malhotra (2007), atualmente a forma economicamente viável de enfrentar o problema é a redução da emissão dos GHG.

Dentro desta realidade, onde pesquisas estão sendo desenvolvidas no sentido de proteger o planeta Terra, a indústria da construção civil é conhecida como o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia e um grande gerador de resíduos, entre essas emissões estão os GHG. O desenvolvimento de produtos, processos e serviços, menos agressivos ao

meio ambiente e à saúde humana, é um desafio às nações que buscam o desenvolvimento sustentável e encontram na indústria da construção civil, um suporte para as mudanças necessárias.

Com isso, existe a necessidade do desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem na escolha de produtos mais sustentáveis na construção civil. A análise do ciclo de vida (ACV) é um procedimento sistemático para mensurar e avaliar os impactos que um produto ou material causa no meio ambiente e sobre a saúde humana, desde a sua produção até a disposição final. Em todas as etapas são considerados os efeitos sobre o meio ambiente em forma de variáveis de entrada (input) e saída (output). A figura 1.1 ilustra os fluxos em uma determinada fase do ciclo de vida de um produto.

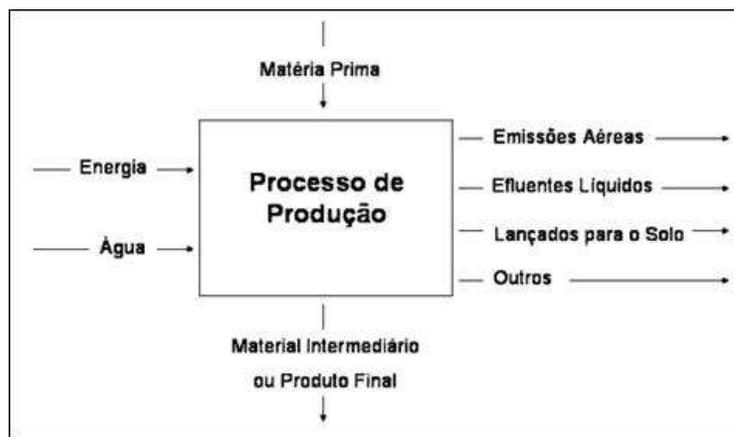


Figura 1.1: Fluxo de Inventário (Lippiatt e Ahmad, 2004)

Na análise do ciclo de vida de um produto da construção civil, por exemplo, cada fase terá uma quantidade de fluxos de recursos que são consumidos e resíduos que são dispostos de alguma forma no meio ambiente, reciclado ou utilizado em outra linha de produção. Na ACV é feita a quantificação destes fluxos, gerando grande quantidade de dados que muitas vezes acabam necessitando de ferramentas computacionais com banco de dados.

Em alguns países, softwares estão sendo desenvolvidos para servirem como ferramenta de tomada de decisão na busca por produtos e serviços mais sustentáveis. Alguns destes, como o Building for Environmental and Economic Sustainability versão 3.0 (BEES 3.0), podem vir a ser uma ferramenta importante na busca pelo desenvolvimento sustentável.

De acordo com Soares et. al (2006), a aplicação da ACV, frequentemente integrada aos processos de tomada de decisão nos setores empresarial e industrial, é reconhecidamente de

grande valia para o setor da construção civil. Existem vários instrumentos e ferramentas que permitem a avaliação de impactos ambientais de materiais de construção no decorrer de sua vida útil. Trusty (2000) apresenta um sistema simplificado de classificação, de forma que possam ser comparadas, discutidas e avaliadas de acordo com suas características.

Nesta classificação o BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*) está no nível 1, formado por ferramentas que fornecem informações e comparações entre materiais e produtos, utilizados no estágio de aquisição. Podem incluir, além de dados ambientais, dados econômicos que não são abordados neste trabalho.

O BEES se constitui em um programa de apoio à decisão desenvolvido especificamente pela SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), para ser utilizado na escolha de produtos e materiais da construção e em programas de certificação ambiental de produtos e edifícios. O BEES foi desenvolvido nos Estados Unidos, por isso não possui aplicabilidade direta para as condições de países com realidades tão diferentes como é o caso do Brasil. O banco de dados do BEES 3.0 é baseado em médias nacionais desenvolvidas para os EUA, considerando um período de 8 anos e informações constantes no banco de dados desenvolvido pela empresa Pricewaterhouse Coopers (*Data for Environmental Analysis and Management – DEAM*).

De acordo com Carvalho (2002), no Brasil a indústria de materiais de construção civil tem grande possibilidade de utilização da ACV, no entanto faltam dados confiáveis e representativos de fluxos das indústrias brasileiras. Estes dados poderiam ser gerados em nível empresarial, por indústrias que investem em “marketing verde” ou precisam desenvolver o Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA) no momento do licenciamento ambiental.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Os objetivos propostos para este trabalho foram divididos em principal e secundários, como descrito a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho consiste em verificar a possibilidade de gerar dados confiáveis sobre os impactos durante o ciclo de vida das estruturas de concreto armado do Brasil com uso da metodologia proposta pelo software BEES e da ACV.

## 1.2.2 Objetivos Secundários

A partir da definição do escopo do objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos secundários para esta pesquisa.

- Levantar os parâmetros utilizados pelo modelo BEES para avaliação do desempenho ambiental de vigas de concreto armado;
- Identificar os dados disponíveis no contexto nacional sobre cargas ambientais de concretos produzidos com cimentos portland, e/ou de informações que possibilitem a quantificação dessas cargas;
- Simular através de uma Análise de Ciclo de Vida o desempenho ambiental de três vigas de concreto armado, confeccionadas com materiais típicos e executadas na cidade de Porto Alegre a partir de dados disponíveis no contexto nacional em dois cenários diferentes, gerando uma base de comparação entre eles e com o software BEES;
- Simular no BEES 3.0 uma viga com características semelhantes a pelo menos uma das três vigas analisadas por ACV, para avaliar comparativamente como cada uma destas ferramentas analisa o desempenho ambiental desta viga através do software;
- Comparar os resultados gráficos e numéricos dos dois métodos para vigas semelhantes;
- Analisar como a alteração no cenário escolhido para a ACV e a variação do traço afeta o desempenho ambiental de uma mistura de concreto.

## 1.3 PRESSUPOSTOS

A seguir estão apresentados os pressupostos deste trabalho

- O desempenho ambiental de um elemento de um edifício, no caso a viga de concreto armado, pode ser avaliado através de procedimentos que identifiquem impactos ambientais gerados ao longo do seu ciclo de vida;

- Os dados de fluxos de materiais e resíduos gerados durante o ciclo de vida do elemento devem ser de fontes nacionais, ou internacionais que possam ser utilizadas no Brasil;
- O modelo BEES utiliza dados de fluxos do seu país de origem e seus resultados não são confiáveis para outros países;
- As metodologias utilizadas nos cálculos das duas avaliações devem ser semelhantes para que os resultados possam ser comparados.

## 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado em oito capítulos. O primeiro apresenta o contexto no qual a pesquisa está inserida, os objetivos e pressupostos da pesquisa, além da apresentação da estrutura da dissertação.

O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica sobre impactos ambientais causados pelos ciclos de vida dos produtos da construção civil, além de normas e métodos que norteiam a avaliação destes impactos.

No terceiro capítulo se apresenta a metodologia de pesquisa, detalhando suas etapas.

O quarto capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o software BEES 3.0. Na segunda parte deste capítulo são apresentados os passos de utilização desta ferramenta de seleção de produtos mais sustentáveis para a construção civil. No final deste capítulo, é apresentada uma simulação com o BEES do desempenho ambiental de vigas de concreto armado.

O capítulo cinco é dedicado à análise de impactos ambientais associados à produção de concreto armado. No decorrer do capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre o ciclo de vida de cada um dos materiais que compõem o concreto armado de cimento portland.

No capítulo seis são apresentados e analisados os resultados da avaliação ambiental com a técnica de ACV, de três vigas de concreto armado com diferentes traços de concreto, em dois cenários distintos.

No capítulo sete é feita avaliação ambiental de uma viga com o software BEES 3.0 e os resultados são comparados com os resultados de uma viga semelhante analisada no capítulo seis.

O último capítulo é dedicado às considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Este capítulo é uma revisão bibliográfica sobre impactos ambientais causados pelos ciclos de vida dos produtos da construção civil, além de normas e métodos que norteiam a avaliação destes impactos.

### **2.1 IMPACTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

A construção civil tem grande importância dentro de um contexto de busca pelo desenvolvimento sustentável, no qual se objetiva garantir as necessidades do presente sem comprometer as necessidades das futuras gerações.

Como argumenta John (2000), nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações.

Segundo Gondim et al. (2004), a indústria da construção civil é um dos setores de maior importância na formação do Produto Interno Bruto do Brasil (PIB). Em cada importante período da história econômica do Brasil, entre 1968 e 2002, é encontrada a participação da construção civil na economia e vice-versa.

Uma grande vantagem da construção como alavanca de desenvolvimento econômico é que a mesma não gera grande demanda de importações, o que não pressiona a balança comercial. Ao contrário, a indústria da construção funciona como um fator incentivador dos outros setores da economia, devido à alta taxa de geração de emprego, renda e impostos, além da variada demanda industrial (GONDIM et al., 2004).

A construção civil é importante para ajudar a resolver os problemas sociais, pois muitas vezes emprega pessoas sem qualificação, que aprendem a trabalhar com a experiência e muito resistentes a utilização de novas tecnologias, sendo dificilmente substituído por máquinas.

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção - CBIC (1999), calcula-se que no Brasil para cada 1,0 bilhão de reais a mais da demanda da construção, sejam criados 177.000 novos empregos, somando os diretos e indiretos. Ao final do ano de 2006, o

Sindicato da Indústria da Construção Civil - SINDUSCON (2007) contabilizou cerca de 1,5 milhão de trabalhadores formalizados em todo o Brasil.

Por todas estas razões, segundo Erlandsson e Borg (2003), é necessário dar prioridade ao setor da construção, para que se possa alcançar uma sociedade sustentável dentro de um período de tempo razoável. Isto é essencial, especialmente por causa da longa vida das construções e do ritmo da pesquisa e desenvolvimento dentro do setor da construção.

O problema é que a indústria da construção civil é uma grande responsável por impactos ambientais, mas existem formas de minimizar estes impactos. Erlandsson e Borg (2003) enfatizam que a indústria do material de construção; a energia e o uso da água das residências; a ocupação da terra e os fatores relacionados à construção e utilização de edificações constituem uma parte dominante do impacto ambiental total causado pela sociedade.

A extração de matéria-prima na construção corresponde a uma parcela significativa da degradação ambiental, segundo John et al. (2001). John (2000) ressalta, ainda, que a cadeia produtiva da construção civil, também denominada *construbusiness*, apresenta importantes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo: extração de matérias primas, produção de materiais, construção, uso e demolição.

A indústria da construção civil produz os bens com as maiores dimensões físicas do planeta, com isso é o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia (JOHN, 2000) e um grande gerador de resíduos. Para piorar este aspecto, estima-se que as perdas na construção de prédios podem chegar a 30%, em massa (PINTO, 1999).

A indústria deve fechar seu ciclo produtivo de tal forma que minimize a saída de resíduos e a entrada de matéria prima não-renovável. Estes ciclos para a construção tentam aproximar a construção civil do conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como um processo que leva a mudanças na exploração de recursos, na direção dos investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e nas mudanças institucionais, todas visando à harmonia e ao entrelaçamento nas aspirações e necessidades humanas presentes e futuras.

Em 1996, a Conferência das Nações Unidas sobre Assentamentos Humanos teve maior importância para o setor da construção civil, pois abordou de forma direta o papel deste setor na busca pelo desenvolvimento sustentável. De acordo com John et al. (2001), o International Council for Building Research Studies and Documentation (CIB) elaborou um relatório que

apresenta os principais aspectos que devem ser observados para eliminar ou reduzir impactos ambientais relativos ao setor da construção civil. A abordagem adotada pelo CIB inclui preocupações com todas as fases envolvidas na vida útil da edificação, passando pelo processo de projeto, produção dos materiais, construção, recursos envolvidos no uso e manutenção e impactos gerados ao final da vida útil. Recursos humanos, educação, conscientização e regulamentação são apontados pelo CIB como questões importantes no processo de implantação de princípios de sustentabilidade no desenvolvimento do setor da construção civil.

Dentre os materiais empregados na construção civil destaca-se o concreto, material mais utilizado no mundo depois da água. Grigoletti e Sattler (2004) encontraram diversos impactos ambientais associados à produção de blocos de concreto para fechamento, desde a obtenção de matéria-prima até a disposição em aterros após a vida útil do produto. Entre os principais impactos está a utilização de fontes não-renováveis de energia e a liberação de dióxido de carbono e metais pesados para o meio ambiente.

A questão das emissões associadas à produção do clínquer é um dos principais componentes da “pegada ecológica” da construção. Estima-se que cerca de 6% do CO<sub>2</sub> gerado no Brasil seja oriundo da decarbonatação do calcário que ocorre durante a produção de cimento.

De acordo com Mehta (2007), existem três ferramentas importantes que podem ser utilizadas para diminuir os impactos ambientais causados pelas obras de concreto, são elas:

- Redução no consumo de concreto – Desenvolver projetos inovadores que utilizem menos concreto, adiar ou cancelar projetos de pouca prioridade e construir estruturas que necessitem de menor manutenção.
- Diminuir a quantidade de cimento utilizado nas misturas – Otimizar a classificação de agregados, utilizar cinza volante, plastificantes químicos e quando possível aumentar o tempo de endurecimento do concreto.
- Diminuir a quantidade de clínquer presente no cimento – Utilizar um ou mais materiais cimentícios para substituir parcialmente o clínquer, como cinza volante e escórias.

A média mundial da emissão de CO<sub>2</sub> pelas indústrias de cimento é de 3% (JOHN, 2000). Embora este valor possa ser significativamente menor em países desenvolvidos, onde novas

tecnologias estão sendo desenvolvidas, existe uma forte tendência no sentido de adotar a terceira opção proposta por Mehta (2007) e reduzir drasticamente o uso de clínquer no cimento. Isto reduz os custos ambientais derivados da produção do clínquer e traz benefícios extras ao proporcionar destinação final para resíduos como a escória de alto forno e a cinza volante. Em linha com esta tendência, este trabalho analisará custos ambientais, via BEES ou ACV, de misturas de concreto com cimentos com adições. A contabilização dos ganhos ambientais do uso de cimentos compostos e pozolânicos é fundamental para justificar a expansão do seu uso.

## 2.2 NORMAS AMBIENTAIS

No cenário atual, de preocupação com a conservação dos recursos naturais e desenvolvimento sustentável, a gestão ambiental é uma ferramenta importante. Sob este prisma, os aspectos ambientais passam a ser integrados às atividades industriais.

De acordo com Mierzwa (1998, apud Carvalho, 2002) em função do crescente interesse pelas questões ambientais em vários países, foi implementado pela ISO um comitê específico para elaboração de normas ambientais, denominado ISO/TC 207.

Este comitê deu origem a vários subcomitês, entre eles o SC5, que trata das normas de Análise do Ciclo de Vida. A ISO 14000 é uma família de normas, algumas das quais se referem à Análise do Ciclo de Vida e estão listadas a seguir.

- **ISO 14040** Gestão Ambiental - Análise do Ciclo de Vida – Princípios e Orientações
- **ISO 14041** Gestão Ambiental - Análise do Ciclo de Vida - Análise do Inventário do Ciclo de Vida
- **ISO 14042** Gestão Ambiental - Análise do Ciclo de Vida – Avaliação do Impacto ambiental
- **ISO 14043** Gestão Ambiental – Análise do Ciclo de vida – Interpretação
- **ISO 14047** Gestão Ambiental - Análise do Ciclo de vida – Exemplos de Aplicação da ISO 14042

- **ISO 14048** Gestão Ambiental - Análise do Ciclo de vida – Formação dos Dados do Relatório e Inventário.
- **ISO 14049** Gestão Ambiental - Análise do Ciclo de vida – Exemplos de Aplicação da ISO 14041.

Recentemente foi publicada a ISO 14064 (2007), que diz respeito aos GHG. Esta norma define como deve ser feita a quantificação da liberação de gases do efeito estufa em indústrias, para posterior relato dos resultados para os órgãos ambientais. A coleta de dados confiáveis e abundantes deste tipo é fundamental para uma adequada análise de impactos ambientais. Infelizmente, isto ainda não é uma prática corrente no Brasil.

A ISO 14064 é dividida em três partes. A primeira e a segunda parte se referem à formação do inventário e a terceira trata da verificação e validação dos dados. Em 2001 foi publicada a versão brasileira da ISO 14040, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), chamada de NBR ISO 14040. Esta norma descreve os princípios e a estrutura para se conduzir e relatar estudos de ACV e inclui certos requisitos mínimos (ABNT, 2007).

## 2.3 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)

A ACV é um procedimento sistemático para mensurar e avaliar os impactos que um produto ou material causa no meio ambiente e sobre a saúde humana, desde a sua produção até a disposição final, de acordo com o enfoque do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*).

A avaliação inclui todo o ciclo de vida do produto, processo ou atividade, abrangendo a extração e o processamento de matérias-primas; manufatura, transporte e distribuição; uso, reuso, manutenção; reciclagem e destino final.

Segundo a norma NBR ISO 14040 (2001), a ACV considera categorias de impacto que incluem o uso de recursos, a saúde humana e as conseqüências ecológicas.

Por abranger todas as fases da vida dos produtos, e estar padronizada pela ISO, fato que garante credibilidade frente à comunidade científica, a ACV é uma metodologia que vem sendo utilizada em diversos campos da construção civil. Entre eles, pode-se citar:

- avaliação e certificação ambiental de materiais de construção;
- avaliação e certificação ambiental de edifícios;
- elaboração de instrumentos de informações ao projetista (catálogos);
- desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliam na decisão no momento do projeto.

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), a metodologia típica de análise de ciclo de vida é compreendida por quatro etapas, como pode ser visto na figura 2.1. Nos itens a seguir se explica melhor qual o escopo de cada uma destas etapas.

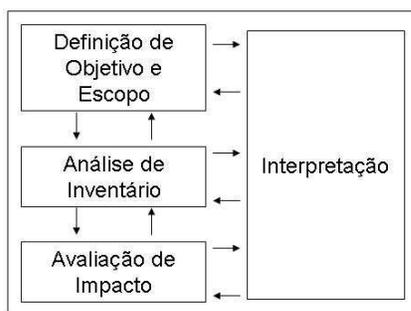


Figura 2.1 – Etapas da ACV (Baseado na NBR ISO 14040)

### 2.3.1 Definição do Objetivo e Escopo

Na fase de definição do objetivo define-se a finalidade do estudo, suas razões e o público-alvo, isto é, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo. A definição de escopo refere-se à delimitação das fronteiras do estudo, tipos de impacto que são analisados e unidade funcional utilizada. De acordo com NBR ISO 14040 (2001), as fronteiras do estudo determinam quais unidades do processo serão incluídas no estudo. Em síntese, as fronteiras do sistema determinam quais as partes do objeto serão analisadas.

A definição das unidades de comparação, chamada de unidade funcional, torna-se um ponto-chave da ACV e dos instrumentos que nela se baseiam para comparar produtos diferentes para uma mesma finalidade (GRIGOLETTI & SATTLER 2004).

De acordo com Allen (2001), a unidade funcional estabelece a equivalência entre os produtos que estão sendo estudados, que podem ter ciclos de vida muito diferentes entre si. A escolha da unidade funcional nem sempre é simples, podendo ter um profundo impacto nos resultados da ACV.

Por exemplo, deve-se comparar 1m<sup>2</sup> de parede acabada de gesso acartonado com 1m<sup>2</sup> de parede acabada de alvenaria, e não um bloco com um painel de gesso. É comum projetistas encontrarem dúvidas ao ter que escolher entre dois materiais com ciclos de vida bem diferentes. Estas diferenças não estão somente na etapa de extração ou fabricação, mas também no desempenho durante o período de utilização.

Um exemplo apresentado por Allen (2001) demonstra claramente a dificuldade que existe em descobrir se é mais ambientalmente correto utilizar sacos de papel ou sacos de plástico, para carregar as compras em uma mercearia. Como o saco de papel é mais frágil que o de plástico, ele só pode ser carregado até a metade do seu volume. Com isso, não é correto comparar um saco de papel com um saco de plástico. Para fazer uma comparação adequada deve-se estabelecer, por exemplo, que um saco de plástico equivale a dois sacos de papel. O volume útil de um saco de papel passa a ser a unidade funcional para este caso.

De acordo com Soares et al. (2006), para a realização de uma análise entre diferentes edificações através da ACV, é necessário definir e quantificar as características de desempenho e promover a equivalência entre os sistemas analisados.

### 2.3.2 Análise do Inventário

Na análise do inventário se estuda os fluxos de energia e materiais para a identificação e quantificação dos *inputs* (consumo de recursos naturais) e *outputs* (emissões para o ar, água e solo) associados aos produtos sob análise durante todo o seu ciclo de vida. A análise do inventário é compreendida pela coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de um sistema (NBR ISO 14040, 2001).

A condução de uma análise do inventário é um processo iterativo. Na medida em que os dados são coletados e é incrementado o conhecimento sobre o sistema, podem ser encontrados requisitos ou limitações que exijam mudança nos procedimentos de coleta de dados.

Uma característica positiva do ACV reside justamente neste aspecto abrangente que deriva do fato de que análise compreende todas as etapas do ciclo de vida de determinado material. É comum ver análises de materiais, ou até mesmo de edifícios, que se baseiam somente nos aspectos ambientais de uma fase do ciclo de vida. Kronka (2001) enfatiza que, muitas vezes, produtos acabam sendo classificados como ambientalmente corretos, só por terem um componente reciclável. Segundo Kuhn (2006), esta abordagem ignora os impactos que podem ser causados em outras etapas do ciclo de vida do produto.

Especificamente, em avaliações de edificações, a dificuldade central para a realização de um inventário do ciclo de vida exaustivo é a inacessibilidade a diversos dados importantes e a qualidade duvidosa e amplitude reduzida daqueles dados disponíveis (KUNH, 2006).

### 2.3.3 Avaliação dos Impactos

A avaliação do impacto da ACV, de acordo com a (NBR ISO 14040, 2001), é dirigida às avaliações da significância de impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de inventário do ciclo de vida. Em geral, este processo envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreender estes impactos. Nessa avaliação pode ocorrer a iteração com o objetivo e escopo, para determinar se os mesmos podem ser alcançados, e até mesmo para modificá-los, se for necessário.

Esta etapa pode ser dividida em:

- **Seleção e Definição das Categorias de Impactos:** Podem ser as categorias tradicionais ou definidas de acordo com as necessidades de cada estudo.
- **Classificação:** Os diferentes tipos de cargas ambientais são agrupados de acordo com os impactos a elas associados. Em determinados casos um tipo de carga ambiental pode estar associada a mais de um impacto, ou vários tipos de cargas ambientais podem estar associadas a um mesmo impacto.
- **Caracterização:** Os resultados do inventário, dentro de cada categoria de impacto, são convertidos em indicadores. Ou seja, usam-se fatores que convertem uma carga ambiental em impacto equivalente.

Além disso, dependendo do objetivo e do escopo, é possível utilizar elementos opcionais nesta etapa.

Pode-se utilizar uma normalização padrão, sem determinar a importância relativa de cada impacto, fazendo com que cada categoria tenha a mesma importância na formação do resultado final.

Pode-se também utilizar técnicas de agrupamento ou outras que permitam estabelecer uma hierarquização entre os diferentes grupos de categorias de impactos.

Também é possível utilizar uma pesagem, que é a estipulação de pesos para cada categoria de impactos, provenientes da opinião pessoal do executante da análise; estabelecidos pelo cliente; ou derivados de um exercício de extração do conhecimento de especialistas.

#### 2.3.4 Interpretação do Ciclo de Vida

Segundo a NBR ISO 14040 (2001) a última fase da ACV é a Interpretação do Ciclo de Vida, fase durante a qual os resultados da análise do inventário e da avaliação de impactos são combinados, de forma coerente, considerando o objetivo e o escopo definidos anteriormente, visando permitir que se estabeleçam correlações e interpretações apropriadas.

O produto desta fase normalmente toma a forma de conclusões e recomendações, que devem ser consistentes com o objetivo e o escopo proposto para o estudo, e podem servir como subsídio e auxílio para os tomadores de decisão.

Caso não tenham sido atingidas as exigências iniciais, a análise do inventário e a avaliação dos resultados devem ser aperfeiçoadas.

### 3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para atingir os objetivos deste trabalho, que incluíam averiguar o funcionamento e analisar a possibilidade de utilização do BEES no Brasil, foi necessário comparar os resultados produzidos pelo software com outros métodos de avaliação ambiental. Decidiu-se tomar como base de comparação o método de ACV de uma viga de concreto armado. A idéia foi verificar se existia compatibilidade entre os resultados do método com os gerados pela ferramenta computacional desenvolvida nos Estados Unidos.

Para tanto foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia apropriada para esta pesquisa, que tornasse possível abordar boa parte do ciclo de vida de uma viga de concreto armado, quantificar o máximo possível de aspectos ambientais e calcular o potencial de impacto deste elemento ao meio ambiente. Os resultados da ACV deveriam ser comparáveis aos do BEES, ferramenta que desenvolve todos os cálculos automaticamente, levando em consideração uma grande quantidade de fluxos bem mais confiáveis. Na figura 3.1 pode-se ver o fluxograma adotado para esta pesquisa, com as diversas etapas que foram desenvolvidas mutuamente ou em seqüência.

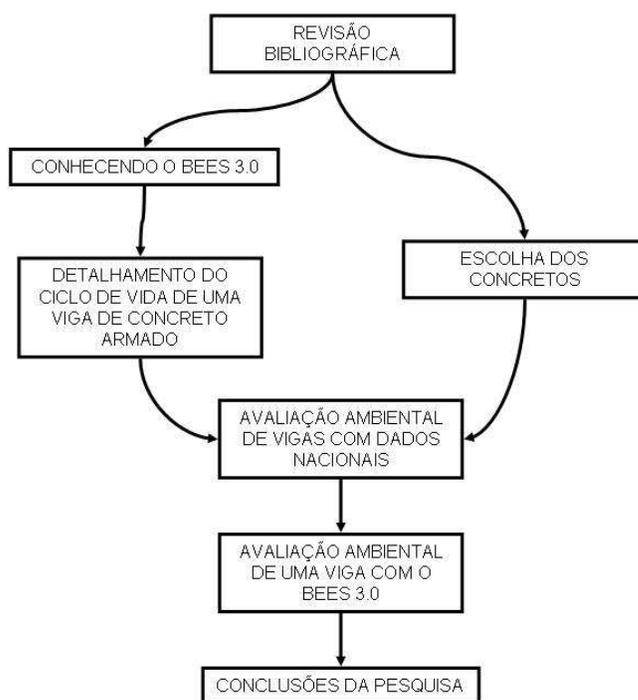


Figura 3.1: Fluxograma da Pesquisa

### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica se desenvolveu ao longo de toda a pesquisa, com o objetivo de esclarecer conceitos e fundamentar os passos de cada etapa. A bibliografia foi utilizada inicialmente para contextualizar a proposta de pesquisa, justificando sua escolha no âmbito de uma situação de degradação ambiental atual do planeta por ações antrópicas, dentre elas, com muito impacto, as atividades da construção civil.

Na contextualização da pesquisa foram explicitados alguns dos problemas ambientais causados pelas diversas áreas produtivas da economia, as ações tomadas por órgãos internacionais e os métodos e metodologias que podem ajudar a mudar este panorama. A revisão bibliográfica permitiu também conhecer o BEES e seu processo de aplicação.

### 3.2 CONHECENDO O BEES 3.0

O software BEES 3.0 é uma ferramenta desenvolvida nos Estados Unidos, que tem por base a ISO 14040 (ISO, 1997). O mesmo utiliza uma grande quantidade de fluxos e um banco de dados extenso. O problema é que todos os cálculos são baseados em parâmetros típicos de produtos e processos americanos, o que gera reservas quanto à aplicabilidade dos resultados em outros países, como o Brasil, no qual os materiais e técnicas construtivas podem apresentar características muito diferentes.

Apesar desta ressalva considera-se, como justificado no capítulo 1, que seria muito interessante investigar a possibilidade de emprego do BEES no Brasil, com ajustes, se necessário. Este software é fruto de vários anos de pesquisas e já está na sua terceira versão, sendo disponível gratuitamente para avaliações e utilizações. Sua amplitude e facilidade de aplicação o tornariam uma importante alternativa de ferramenta para avaliação de impactos ambientais em maior escala, necessidade premente no nosso país.

Para viabilizar esta análise o capítulo 4 deste trabalho foi dedicado para o conhecimento da ferramenta BEES 3.0. Isto foi fundamental como referência para as próximas etapas da pesquisa. O conhecimento foi extraído do manual do programa, que apresenta o seu funcionamento, com as fórmulas e índices utilizados nos cálculos. Consultas aos autores e à literatura esclareceram alguns aspectos específicos.

### 3.3 ESCOLHA DOS CONCRETOS

Foi definido que o elemento construtivo que será adotado como objeto de estudo para os fins de avaliação do impacto ambiental neste trabalho será uma viga padrão de concreto armado.

Para se utilizar o BEES 3.0 é necessário escolher um tipo de concreto para as vigas a analisar. Com o intuito de verificar as diferenças, em termos de impactos ambientais, de diferentes tipos de concreto, decidiu-se simular os efeitos de se empregar diferentes traços e tipos de cimento.

Optou-se por simular concretos com cimentos CP-IV, por ser um dos cimentos comumente encontrado no mercado nacional. Quando necessário foram moldados e ensaiados corpos de prova, no LEME – Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais da UFRGS, para determinação da resistência à compressão, utilizando traços típicos. Os detalhes sobre os concretos empregados serão apresentados no capítulo 6.

### 3.4 DEFINIÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO

Para analisar os impactos causados no ciclo de vida de um produto é necessário, antes de mais nada, conhecer este ciclo de vida. Para tanto é necessário levantar os fluxos que envolvem cada uma das etapas de produção do material, incluindo obtenção de matéria-prima, transportes utilizados, manufatura, resíduos, etc..

Neste trabalho um capítulo foi dedicado para apresentar o ciclo de vida de uma viga de concreto armado e de todos os materiais que o compõem. Com isso, foi possível identificar alguns fluxos e desconsiderar aqueles não mensuráveis, criando uma fundamentação teórica para a realização da avaliação ambiental das vigas, que serviu de base de comparação para os resultados gerados com o BEES.

### 3.5 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE VIGAS

As vigas de concreto armado passaram por uma avaliação da ACV. A metodologia nesta etapa foi baseada na NBR ISO 14040. Como um dos objetivos deste trabalho é comparar os resultados da análise do ciclo de vida feita com dados nacionais, com os resultados gerados pelo software BEES 3.0, foi de fundamental importância utilizar, sempre que possível, a

mesma metodologia para ambas as ferramentas. Como o BEES 3.0 se baseia na ISO 14040, procurou-se utilizar as mesmas fórmulas e fatores de equivalência para a determinação dos fluxos em ambos os casos.

Os índices de emissões nas etapas do ciclo de vida dos materiais que compõem as vigas foram retirados de trabalhos nacionais sobre o tema. Vários fluxos foram desconsiderados por serem insignificantes, não possuírem índices de geração confiáveis ou, simplesmente, por não serem encontrados na bibliografia.

Para delimitação das fronteiras do estudo, o ciclo de vida estudado foi dividido em quatro regiões. Isto foi feito para facilitar os cálculos e também para facilitar o entendimento pelo leitor, visto que o ciclo de vida de um elemento de construção envolve vários materiais, com transportes e fluxos independentes. Com isso, os fluxos foram calculados em cada uma das regiões em separado, sendo somados na formação do inventário final.

Foi visto como de fundamental importância o cálculo das emissões durante o transporte das matérias-primas e materiais envolvidos. Para calcular as distâncias percorridas foi necessário estabelecer quem seria o fabricante do cimento, seus fornecedores de matérias-primas e o fabricante do ferro. A empresa concreteira é hipotética, localizada em um bairro de Porto Alegre, a uma considerável distância do local de construção da viga. Estes locais foram marcados no mapa de uma ferramenta on-line gratuita na internet, chamada de *google maps*, onde foi possível calcular distâncias percorridas em rodovias e vias urbanas.

Para verificar o quanto uma mudança na localização da fábrica de cimentos pode influenciar no desempenho ambiental das vigas foram montados dois cenários. O primeiro com a cimenteira localizada na cidade de Esteio próxima do local de construção da viga e distante do fornecedor de cinza volante. O segundo cenário foi feito com a fábrica de cimento na cidade de Pinheiro Machado, distante da cidade de Porto Alegre e próximo da CGTEE de Candiota, que é fornecedora de cinza volante para a fabricação de cimento.

A porcentagem das matérias-primas que constituem o cimento foi fornecida por um fabricante através de e-mail, de modo que foi possível calcular os fluxos de emissões durante a fabricação do clínquer. Alguns dados foram estipulados, com a intenção de viabilizar a realização da pesquisa, como a distância percorrida no transporte de madeira para confecção das formas e transporte dos agregados necessários para o concreto das vigas.

### 3.6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE VIGA COM O BEES 3.0

O software BEES 3.0 oferece várias opções de vigas de concreto que podem ser utilizados pelo usuário. Para fins da pesquisa foi escolhida uma viga com características semelhantes a uma das vigas analisadas pela ACV. A seleção dos impactos ambientais e alternativas de comparação foi feita, sempre que possível, de forma que os resultados possam ser comparados graficamente com os resultados encontrados na análise do ciclo de vida.

### 3.7 CONCLUSÕES DA PESQUISA

No decorrer dos capítulos seis e sete os resultados de avaliação ambiental são gerados e discutidos, de forma que possam ser sintetizados no fim da pesquisa.

## 4 ANÁLISE DA FERRAMENTA BEES 3.0

Como descrito em Lippiatt e Ahmad (2004), o software BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*), versão 3.0, tem como proposta desenvolver e implementar um sistema metodológico para seleção de produtos da construção com o intuito de conseguir um balanço mais apropriado entre o desempenho econômico e ambiental, que possa basear decisões de mercado. O objetivo final é contribuir para uma redução do custo efetivo da construção, levando em consideração os seus impactos ambientais durante todo o ciclo de vida dos produtos.

A metodologia utilizada pelo BEES considera o ciclo de vida de um produto e seus múltiplos impactos econômicos e ambientais. Segundo Lippiatt e Ahmad (2004), o software analisa todos os estágios da vida do produto, tomando como referência a norma ISO 14040 (ISO, 1997), no que diz respeito ao desempenho ambiental do produto. O desempenho econômico é analisado utilizando o método da Análise do Custo de Vida da ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

O software utiliza doze impactos ambientais fundamentais para avaliar o desempenho ambiental, gerando um escore para cada impacto, e um escore agregado que representa o desempenho ambiental total. O BEES especifica a importância dos pesos usados para combinar o desempenho econômico e ambiental e gerar o escore de desempenho total do produto analisado.

A seguir estão descritos os impactos ambientais considerados pelo software BEES 3.0 e os agentes promotores considerados para o cálculo dos escores, de acordo com Lippiatt (2002).

- **Aquecimento Global:** diz respeito ao lançamento, para a atmosfera, de gases que contribuem para o efeito estufa. Para o cálculo do impacto são necessárias as quantificações, em gramas, de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), clorofluorcarbono CFC 12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), clorofórmio (CHCl<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), metil-bromo (CH<sub>3</sub>Br), metil-cloro (CH<sub>3</sub>Cl), halon 1301 (CF<sub>3</sub>Br), tetrafluorcarbono (CF<sub>4</sub>), cloro-metileno (CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>), HCFC 22 (CHF<sub>2</sub>Cl), óxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O), entre outros.
- **Potencial de Acidificação:** Este impacto diz respeito ao lançamento, para a atmosfera, de gases que atingem os ecossistemas, através de sua dissolução da

água da chuva ou ao se depositarem em corpos d'água. São necessárias as quantificações de emissões de amônia ( $\text{NH}_3$ ), ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), cianeto de hidrogênio ( $\text{HCN}$ ), fluoreto de hidrogênio ( $\text{HF}$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

- **Potencial de Eutrofização:** Lançamento para água e solo de nutrientes minerais em quantidades que causem o crescimento desequilibrado de algumas espécies. São necessárias as quantificações de lançamentos para a água e/ou solo de amônia ( $\text{NH}_3$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), compostos de fósforo e nitrogênio,  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{DQO}$ , íons nitrato e nitrito ( $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NO}_2^-$ ), entre outros.
- **Depleção de Combustíveis Fósseis:** É quantificado a partir do consumo de carvão, gás natural e óleo, e diz respeito apenas aos impactos gerados no uso do combustível, não incluindo os impactos associados à extração e produção do recurso fóssil.
- **Contaminação do Ar Interno (indoor):** Contabilizado a partir das emissões de componentes orgânicos voláteis ( $\text{VOCs}$  – *volatile organic compound*) do produto na fase de uso nas edificações.
- **Alteração do Habitat:** Este impacto refere-se à ocupação de solo pela atividade e conseqüentemente, perda da biodiversidade. Para o cálculo, são consideradas aproximações de densidades de espécies que se desenvolveriam no local de instalação da atividade (quantidade de espécies por  $\text{m}^2$ ).
- **Depleção de Recursos Hídricos:** Este impacto diz respeito ao consumo de água potável. A avaliação é feita a partir do consumo de recurso hídrico.
- **Poluição Atmosférica:** Se refere ao aumento da quantidade de partículas sólidas e líquidas encontradas no ar, devido às atividades humanas tais como combustão, uso de veículos automotores, geração de energia, etc.. Para o cálculo são necessárias as quantificações de lançamentos ao ar de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), material particulado ( $\text{MP}$ ) e óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ).
- **Saúde Humana:** Substâncias que causam danos à saúde humana, desde efeitos moderados até efeitos letais. Considera mais de 200 substâncias que estão

divididas em cancerígenas e não-cancerígenas. Algumas destas substâncias são: dioxinas, arsênio (As), di-etanol aminas ( $C_4H_{11}O_2N$ ), mercúrio (Hg), tetracloro carbono ( $CCl_4$ ), hexacloroetano ( $C_2Cl_6$ ), fenol ( $C_6H_5OH$ ), cádmio (Cd), chumbo (Pb), entre outros.

- **Formação de Névoa Fotoquímica:** Sob certas condições climáticas, algumas substâncias emitidas pelas atividades industriais e de transporte, em presença de radiação solar, sofrem reações químicas, produzindo névoa fotoquímica. O número de substâncias consideradas, e que podem gerar este impacto, é superior a 100. Para a determinação deste impacto são necessárias as quantificações de: furano ( $C_4H_4O$ ), propileno ( $CH_3CH_2CH_3$ ), formaldeído ( $CH_2O$ ), acetaldeído ( $CH_3CHO$ ), aldeídos, óxidos de nitrogênio  $NO_x$ ), entre outros.
- **Depleção da Camada de Ozônio:** Algumas substâncias atacam a camada de ozônio, provocando sua redução. Como consequência, há riscos à saúde humana, fauna e flora. Para a quantificação deste impacto são necessárias as quantificações de: tetracloro carbono ( $CCl_4$ ), clorofluorcarbono CFC 12 ( $CCl_2F_2$ ), halon 1301 ( $CF_3Br$ ), HCFC 22 ( $CHF_2Cl$ ), metil bromo ( $CH_3Br$ ), entre outros.
- **Toxicidade Ecológica:** Este impacto diz respeito ao lançamento de substâncias para o ambiente, que comprometem os ecossistemas terrestres e aquáticos. O BEES 3.0 considera mais de 150 substâncias potencialmente tóxicas para o meio ambiente. Algumas delas: dioxinas, mercúrio (Hg), cádmio (Cd), cromo tri e hexavalente (Cr III e Cr VI), naftaleno ( $C_{10}H_8$ ), berílio (Be), arsênio (As), níquel (Ni), cobre (Cu), vanádio (V), cobalto (Co), selênio (Se), zinco (Zn), chumbo (Pb), entre outros.

Lippiatt (2002) destaca que os escores obtidos com o uso do BEES resultam da adoção de pesos e quantidades de poluentes típicas de produtos dos Estados Unidos, pois o software considera alternativas genéricas e fabricantes específicos do produto. Os resultados padrão do BEES, portanto, não se aplicam diretamente a produtos vendidos em outros países, onde práticas agrícolas e de manufatura, misturas de combustíveis, regulamentos ambientais, distâncias de transporte e mercados de materiais podem diferir. De acordo com Kronka (2001), apesar de o BEES ser voltado para a realidade norte americana, pode-se extrair

elementos importantes a serem aplicados na definição de critérios para seleção de materiais construtivos sustentáveis compatíveis com a realidade brasileira. Esta é a premissa que orientou o presente trabalho. Para que esta premissa pudesse ser adequadamente investigada, foi necessário entender em detalhe o funcionamento do software. A seguir apresenta-se uma breve descrição de como se utiliza o BEES 3.0.

#### 4.1 PASSO 1: SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE CÁLCULO

O primeiro passo para operacionalização do sistema BEES consiste na seleção dos parâmetros que serão utilizados para os cálculos. Esta definição é feita com auxílio da tela que pode ser vista na Figura 4.1.

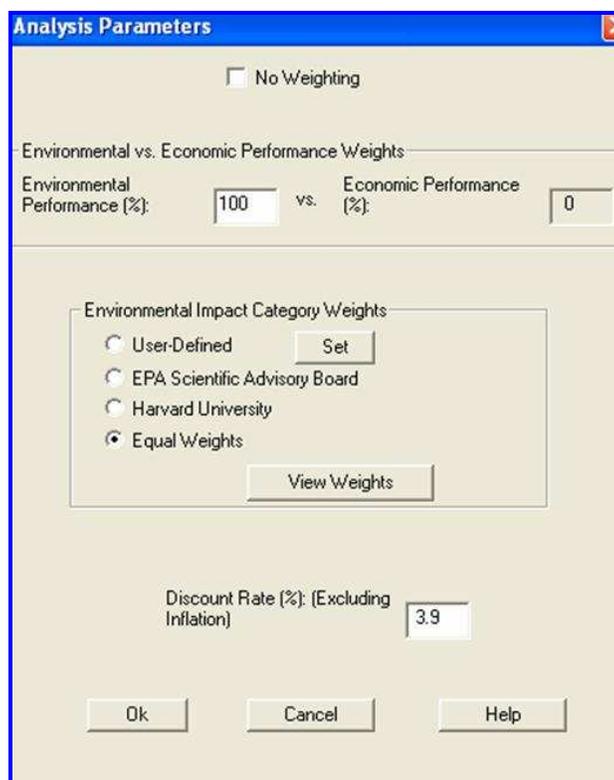


Figura 4.1: Escolha de Parâmetros

Tendo em vista que o foco deste trabalho está centrado nas questões relacionadas ao desempenho ambiental de produtos da construção civil, no exemplo ilustrativo gerado para

demonstrar como opera o software, discutido no próximo item, definiu-se um peso relativo de 100% para desempenho ambiental e 0% para o desempenho econômico.

Verifica-se, na figura 4.1, que, após a definição do escopo da análise (econômica ou ambiental), deve ser escolhida uma categoria de pesos para os impactos ambientais, que estabelece a importância relativa entre os 12 impactos ambientais fundamentais considerados pelo BEES 3.0. Cada categoria atribui valores diferentes para a importância relativa de cada impacto ambiental. A soma dos pontos dos impactos, todavia, é sempre igual a 100, para manter a base decimal e percentual da análise.

O software admite quatro categorias de pesos para os impactos ambientais, que podem ser vistas na Tabela 4.1. Na primeira categoria o usuário tem liberdade para definir os pesos relativos, podendo distribuir a pontuação entre os impactos da forma que achar mais conveniente. Um conjunto inicial de pesos é atribuído pelo software. Na segunda categoria, denominada “Pesos Iguais”, os pesos são distribuídos da forma mais uniforme possível. As outras duas categorias foram desenvolvidas pela Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency – EPA*) e pela Universidade de Harvard, ambas dos Estados Unidos. Uma foi baseada na opinião dos especialistas científicos da EPA e outra em especialistas acadêmicos de Harvard.

Tabela 4.1: Categorias de Pesos para Impactos

Categorias	Impactos											
	Aquecimento global	Acidificação	Eutrofização	Depleção de Combustíveis Fósseis	Qualidade do ar interno ( <i>indoor</i> )	Alteração do Habitat	Consumo de Água	Poluição Atmosférica	Formação de Névoa Fotoquímica	Toxicidade Ecológica	Depleção da Camada de Ozônio	Saúde Humana
Definido pelo Usuário	9	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8
Pesos Iguais	9	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8
EPA Science Advisory Board - based	16	5	5	5	11	16	3	6	6	11	5	11
Harvard University Board - based	11	9	9	7	7	6	9	10	9	6	11	6

Para os casos de avaliação do desempenho econômico dos produtos da construção, é possível alterar a Taxa de Desconto Real, alternativa que não foi explorada neste trabalho, dada a grande complexidade das discussões envolvidas na definição de valores adequados para este parâmetro.

## 4.2 PASSO 2: DEFINIÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA COMPARAÇÃO

O segundo passo consiste em escolher qual o elemento de construção a analisar. O modelo BEES usa o sistema de classificação da padronização ASTM, UNIFORMAT II, para organizar os elementos de construção em grupos.

Na tabela 4.2 pode-se ver a organização das possíveis escolhas de elementos de construção. Estão à disposição do usuário 23 elementos, organizados em cinco grandes grupos, que se sub-dividem em 12 grupos de elementos.

Cada um desses elementos é uma parte da construção de um edifício, ou da utilização, como é o caso do grupo de elementos Móvel. O usuário escolhe um desses elementos com a utilização da tela que pode ser vista na Figura 4.2.

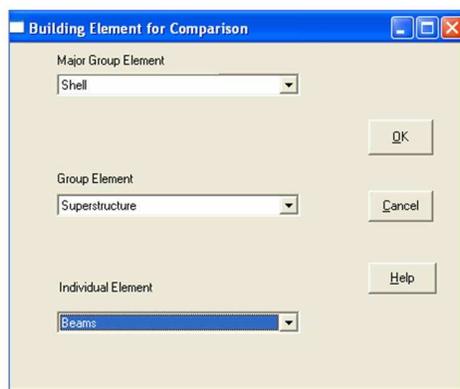


Figura 4.2: Escolha do Elemento

A definição do elemento vai disponibilizar alguns produtos que podem ser utilizados. Por exemplo, a seleção do elemento “vigas” disponibiliza automaticamente 30 tipos de concretos típicos utilizados nos Estados Unidos. Entre eles se encontram concretos fabricados a partir de

cimentos com adição de resíduos e cimentos 100% portland. A tabela 4.3 mostra os diversos tipos de concreto disponíveis.

Tabela 4.2: Organização dos Elementos no BEES 3.0.

<b><u>Grande Grupo</u></b>	<b><u>Grupo de Elementos</u></b>	<b><u>Elementos</u></b>
Local da Construção	Energia Elétrica	Gerador à óleo
	Melhoramento do Local	Pavimentação do lote
	Preparação do Local	Tratamento do solo
Equipamentos e Móveis	Móveis / escritório	Cadeira
		Armário
		Mesas
Interiores	Acabamento	Louças do Banheiro
	Construção do Interior	Divisórias
		Armários
	Acabamento do Interior	Teto
		Revestimento do Piso
Acabamento da Parede		
Envoltória	Fechamento	Acabamento Externo
		Estrutura de Suporte
		Divisórias
		Acabamento
	Cobertura	Forro
		Material de cobertura
	Superestrutura	Vigas
		Pilares
Estrutura da Cobertura		
Subestrutura	Construção da Base	Alvenaria de Fundação
	Fundações	Radier

Fonte: Lippiatti (2002).

Tabela 4.3: Tipos de Concretos Disponíveis no BEES 3.0.

<b>Nome do Concreto</b>
100 % Cimento Portland 4ksi
100 % Cimento Portland 5ksi
15 % Cinza Volante 4ksi
20 % Cinza Volante 4ksi
15 % Cinza Volante 5ksi
20 % Cinza Volante 5ksi
20 % escória alto-forno 4ksi
35 % escória alto-forno 4ksi
50 % escória alto-forno 4ksi
20 % escória alto-forno 5ksi
35 % escória alto-forno 5ksi
50 % escória alto-forno 5ksi
5 % calcário 4ksi
10 % calcário 4ksi
20 % calcário 4ksi
10 % calcário 5ksi
20% calcário 5ksi
5 % calcário 5ksi
ISG IP Cement 4ksi (15-25% pozolana)
ISG IP Cement 5ksi (15-25% pozolana)
Lafarge Silica Fume (4ksi)
Lafarge Silica Fume (5ksi)
Lafarge NewCem Slag Cement 4ksi (20 % escória de alto-forno)
Lafarge NewCem Slag Cement 4ksi (35 % escória de alto-forno)
Lafarge NewCem Slag Cement 4ksi (50 % escória de alto-forno )
Lafarge NewCem Slag Cement 5ksi (20 % escória de alto-forno)
Lafarge NewCem Slag Cement 5ksi (35 % escória de alto-forno)
Lafarge NewCem Slag Cement 5ksi (50 % escória de alto-forno)
Lafarge Portland Tipo I 4ksi
Lafarge Portland Tipo I 5ksi

### 4.3 PASSO 3: GERAÇÃO DE GRÁFICOS DE IMPACTOS

Como já foi dito anteriormente, o BEES 3.0 considera 12 impactos ambientais diferentes, gerando um escore para cada um destes impactos. Os resultados são apresentados na forma de gráficos de colunas, onde as diferentes alternativas podem ser comparadas visualmente pelo usuário. O software disponibiliza uma série de gráficos diferentes que podem ser gerados para ilustrar o desempenho ambiental dos produtos, que podem ser detalhados por estágio de ciclo de vida e por fluxo de poluentes. Na figura 4.3 pode-se ver a tela do software que apresenta as várias opções de gráficos que podem ser gerados.



Figura 4.3: Tela de Escolha dos Gráficos a serem Gerados pelo BEES 3.0

Os gráficos dos impactos por estágio de ciclo de vida mostram os pesos para as fases da vida do material (aquisição da matéria-prima, manufatura, transporte, uso e fim da vida do material). Desta forma é possível verificar em qual fase determinado material causa, com maior intensidade, um determinado impacto ao meio ambiente. Com estes gráficos por estágio de ciclo de vida é possível identificar em qual momento um determinado material impacta mais o meio ambiente e qual o fluxo de substância contribui mais massivamente neste impacto. Análises deste tipo podem ajudar em ações que venham a interferir no ciclo de vida de materiais como a intenção de diminuir o impacto ambiental da construção civil.

Para saber quais são as substâncias liberadas durante o ciclo de vida dos produtos pode-se gerar também gráficos por fluxos. Nestes gráficos as principais substâncias recebem um peso para um determinado impacto dos materiais escolhidos para a comparação.

#### 4.4 SIMULAÇÕES COM O SOFTWARE BEES 3.0

Para ilustrar o funcionamento do software foram feitas simulações do desempenho de vigas de concreto armado. Seguindo os passos de utilização do software BEES 3.0, apresentados anteriormente, foi selecionado 100% para análise do desempenho ambiental e 0% para

desempenho econômico. Entre as quatro categorias de pesos relativos para os impactos foi escolhida a “pesos iguais”, que assume que todos os impactos possuem importância similar. O próximo passo consiste na definição das alternativas para comparação. Decidiu-se analisar um elemento tipo viga de concreto armado. Para isso foi selecionado o grande grupo Envoltória (em inglês, shell), e o sub-grupo Superestrutura, como pode ser visto no fluxograma da figura 4.4.

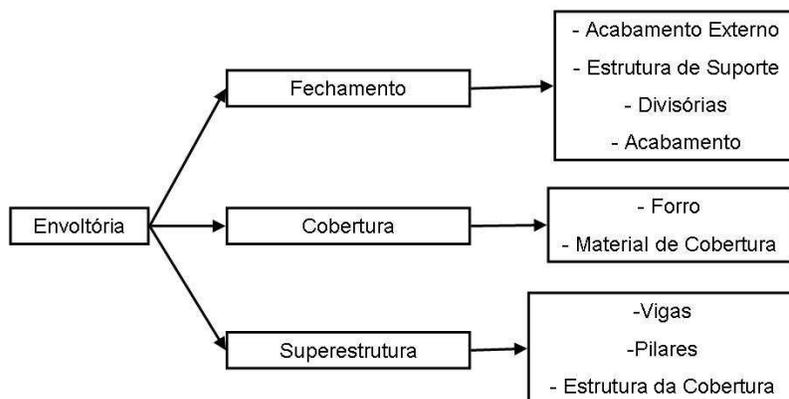


Figura 4.4: Grande Grupo Envoltória

Tendo definido o tipo de elemento a analisar (viga), partiu-se para a escolha do tipo de concreto a ser utilizado. O concreto padrão considerado pelo BEES, segundo Lippiatti (2002), assume que serão empregados 60% a 75% de agregados, cimento portland comum, com ou sem adições, e água.

A seguir então listados os concretos escolhidos para a simulação. A escolha foi baseada no interesse de ver o impacto de um cimento puro e com adições e no fato de que as formulações com adições selecionadas guardam certa semelhança com alguns cimentos brasileiros, que utilizam cinza volante (CP-IV) e escória de alto forno (CP II-E).

- 100% cimento portland comum (100 CP)
- 20% cinza volante e 80% cimento portland (20 CV)
- 20% escória de alto forno e 80% cimento portland (20 EA)
- 50% escória de alto forno e 50% cimento portland (50 EA)

O modelo BEES coloca à disposição do usuário duas opções de resistência para os concretos:

- 4ksi, igual a 4000 kgf/in<sup>2</sup> ou cerca de 27,58 MPa;
- 5ksi, igual a 5000 kgf/in<sup>2</sup> ou cerca de 34,47 MPa.

Para a simulação foi escolhida a resistência 4ksi ou 27,58 MPa, para os quatro tipos de concreto apresentados anteriormente, que corresponde, aproximadamente, a um fck de 20 MPa.

O software dá opção de três distâncias a serem percorridas pelo concreto, entre a manufatura e utilização: 32km (20 milhas), 80km (50 milhas) e 161 km (100 milhas). A opção escolhida para a simulação com todos os concretos foi de 80 km, valor considerado representativo da realidade de grandes cidades. Mantendo a distância constante se assegurou que o transporte não iria acarretar em uma diferença direta entre os resultados.

Tendo definido os parâmetros de análise foram gerados os gráficos de impacto. Primeiramente foi gerado um gráfico (vide figura 4.5) de desempenho ambiental total para as quatro vigas analisadas. A unidade funcional para este caso é 1m<sup>3</sup> de viga.

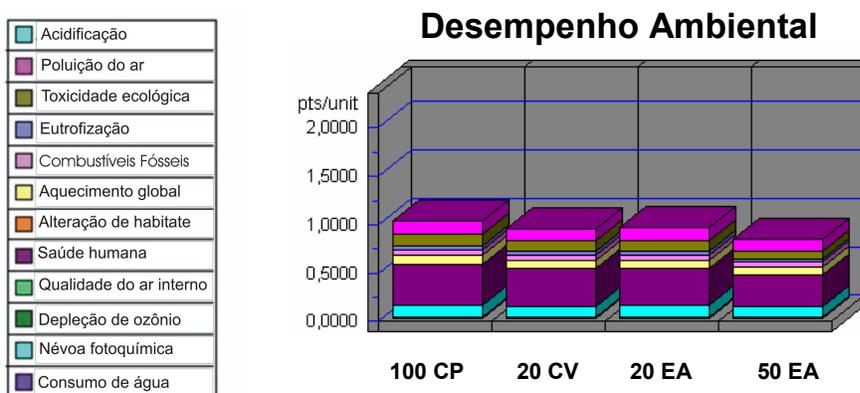


Figura 4.5: Gráfico de desempenho ambiental total das vigas

Resumidamente para chegar ao gráfico da figura 4.5, o software calcula os fluxos correspondentes a cada impacto ambiental, formando o inventário. Estes valores são convertidos em fluxos equivalentes para cada impacto ambiental. Com isso, cada impacto é medido através de unidades específicas, exemplo: *gramas de CO<sub>2</sub> equivalente* para o impacto aquecimento global e *íon hidrogênio equivalente* para o impacto acidificação.

Para comparar os resultados de diferentes impactos é necessário fazer a normalização dos resultados. Para isto o BEES 3.0 utiliza o TRACI, método desenvolvido pelo Escritório de

Pesquisa e Desenvolvimento da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) para integração dos impactos ambientais. Desta forma é possível colocar todos os valores dos impactos em uma mesma escala e gerar o gráfico de desempenho ambiental total.

Cada cor do gráfico representa um impacto ambiental analisado pelo BEES 3.0. Quanto maior a quantidade de pontos por unidade funcional, maior é o impacto ambiental. Verifica-se que a viga com cimento 100% portland (100 CP) atingiu o pior desempenho ambiental, enquanto a viga com 50% de escória de alto forno teve o melhor desempenho. Nota-se, claramente, que a adição de resíduos foi determinante nos resultados. Quanto maior a quantidade de resíduos adicionada ao cimento, melhor é o desempenho ambiental da viga. Além disso, as vigas denominadas 20CV e 20EA, que possuem a mesma porcentagem de resíduos adicionados, possuem desempenho ambiental total bem semelhante.

O impacto ambiental mais representativo no desempenho ambiental total de vigas de concreto é o impacto à saúde humana, representado, de acordo com o BEES 3.0, pela emissão de substâncias tóxicas ou cancerígenas. Além disto, o software indica que a produção de cimento gera impactos importantes em termos de poluição do ar, toxicidade ecológica, aquecimento global e geração de névoa fotoquímica.

Entre as opções de gráficos que podem ser gerados pelo BEES há também o gráfico por estágio do ciclo de vida, onde é apresentada a pontuação em cinco fases do ciclo de vida dos materiais, que são: aquisição da matéria-prima, manufatura, transporte, uso e disposição final.

- **Aquisição da Matéria-Prima:** Inclui os impactos envolvidos na aquisição dos materiais necessários para a produção de concreto, como pedra britada, areia e cimento. Cabe destacar que o transporte entre o local de extração da matéria-prima e a planta de produção de cimento é desconsiderado pelo BEES.
- **Manufatura:** Envolve a produção do concreto na usina de concreto (concreteira) e o transporte até a obra com caminhão betoneira, onde o concreto vai sendo misturado durante o transporte.
- **Transporte:** O BEES considera os impactos referentes ao transporte de materiais até a usina de concreto.
- **Uso:** Envolve os impactos que podem ocorrer durante a utilização do produto analisado, considerando-se um ciclo de vida de 50 anos.

- **Fim da Vida:** Os impactos causados no fim da vida útil de uma viga de concreto armado também são estimados pelo BEES 3.0, no que se refere ao descarte de resíduos no meio ambiente.

O gráfico do desempenho ambiental dos concretos da simulação, por estágio do ciclo de vida, pode ser visto na figura 4.6.

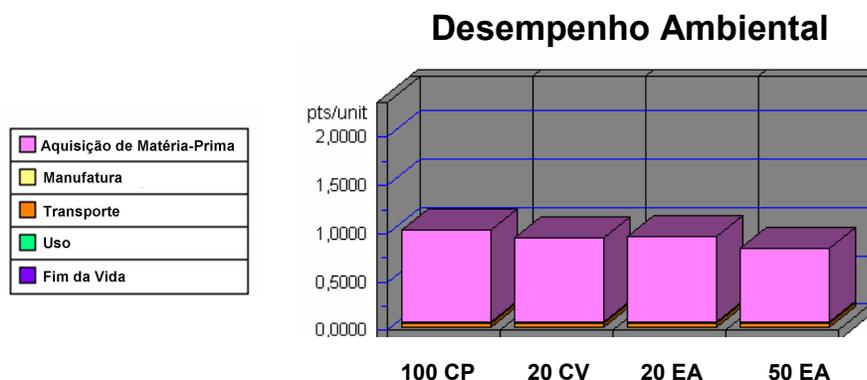


Figura 4.6: Gráfico de desempenho ambiental por estágio do ciclo de vida

No gráfico da figura 4.6 pode-se ver que todas as quatro vigas analisadas causam maior impacto na fase denominada de “Aquisição de Matéria-prima”, porque o BEES envolve dentro desta fase a produção dos cimentos, material utilizado que causa o maior impacto ao meio ambiente.

O BEES 3.0 oferece, ainda, a opção de gerar gráficos por categoria de impactos por fluxo. Neste caso todos os fluxos encontrados, relativos a um determinado impacto, são apresentados com sua unidade equivalente. Na figura 4.7 pode-se observar o gráfico do impacto aquecimento global, com todos os fluxos quantificados pelo software.

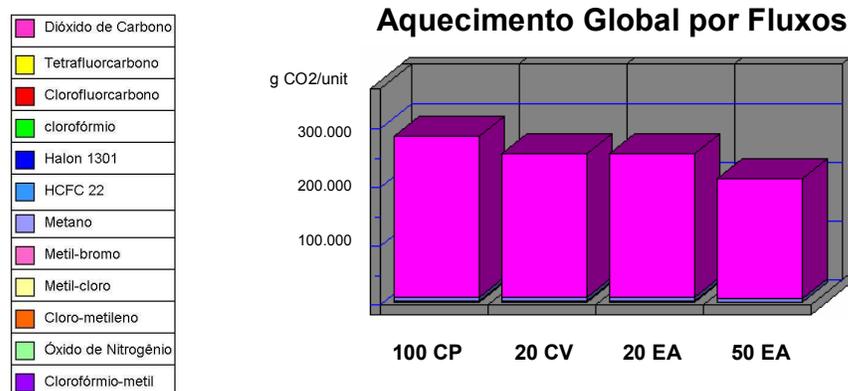


Figura 4.7: Gráfico de Fluxos do Aquecimento Global

É possível verificar visualmente que, para as quatro vigas analisadas, o fluxo que mais contribui com o aquecimento global é a liberação de dióxido de carbono, bastante presente na produção do clínquer, que é o principal componente do cimento portland. A utilização de adições reduz consideravelmente as quantidades de emissões, chegando a uma redução de cerca de 25% no caso do concreto com 50% de escória.

O gráfico apresentado na figura 4.5 indicava que os *danos causados à saúde* podem ser considerados como o impacto mais presente durante o ciclo de vida das vigas analisadas, de acordo com a metodologia de normalização utilizada pelo BEES 3.0. Buscando detalhar este efeito, a figura 4.8 mostra o gráfico do impacto na saúde humana por fluxos, no qual se podem identificar alguns dos fluxos que prejudicam a saúde humana, presentes no ciclo de vida útil das vigas de concreto consideradas. Verifica-se que o BEES indica que a produção das vigas resulta na produção de uma série de substâncias extremamente prejudiciais à saúde humana, tais como dioxinas, fenol e chumbo. Para viabilizar a comparação, o gráfico é montado em termos de gramas de tolueno equivalente por unidade funcional.

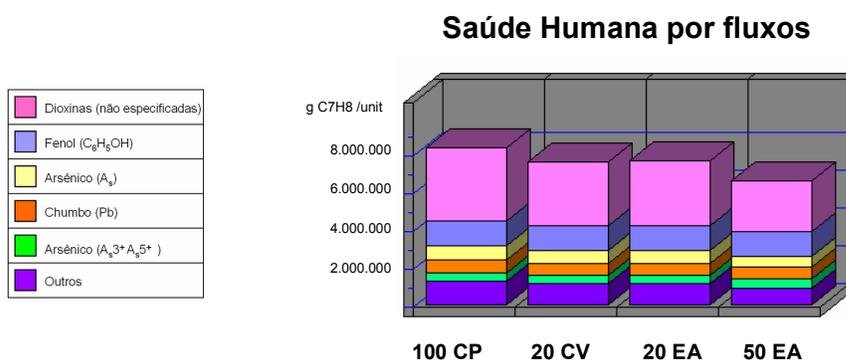


Figura 4.8: Gráfico Saúde Humana por Fluxos

Pode-se observar, analisando a figura 4.8, que a produção de clínquer influencia diretamente neste efeito, pois o aumento do teor de adições reduz a toxicidade.

Cabe ressaltar que o software leva em consideração os efeitos causados pela exposição industrial ou natural a vários produtos químicos que podem causar prejuízos à saúde humana. Estes podem causar efeitos diferentes, por isso o BEES separa os mesmos em dois grandes grupos: fatores cancerígenos e não-cancerígenos. Para os fluxos cancerígenos a unidade equivalente utilizada no cálculo é o benzeno em gramas por unidade funcional, enquanto para os não-cancerígenos é utilizado o equivalente em gramas de tolueno por unidade funcional. Para formação do cálculo final é feita uma equivalência entre os efeitos do benzeno e o tolueno, da seguinte forma: 1 kg benzeno = 21.100 kg tolueno.

Outro impacto que foi tido como considerável na análise do desempenho ambiental total (vide figura 4.5) foi a poluição do ar. Detalhando o mesmo pode-se gerar o gráfico por fluxos mostrado na figura 4.9.

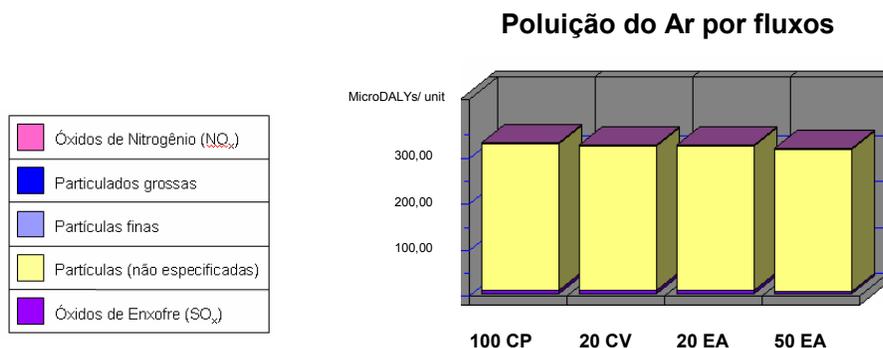


Figura 4.9: Gráfico de Poluição do Ar por Fluxos

Para o cálculo do desempenho das vigas de concreto, em termos de poluição do ar, o BEES utiliza os fluxos de NO<sub>x</sub>, partículas grossas, partículas finas, partículas não identificadas e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>). As quantidades em cada um destes fluxos são convertidas em *MicroDalys*. O *Daly* representa um ano de vida saudável perdido devido à exposição a estas substâncias. Como pode ser visto na figura 4.9, o principal efeito de poluição é gerado pela emissão de partículas não identificadas. Neste caso, a inclusão de adições não afeta consideravelmente o impacto negativo. A viga com cimento 100% portland é levemente mais impactante que as demais. Pode-se concluir, portanto, que este efeito não está muito ligado à produção do clínquer mas, provavelmente, ao transporte do concreto.

## 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações de desempenho ambiental de vigas realizadas com utilização da ferramenta BEES 3.0 possibilitaram uma investigação profunda dos impactos causados pelo ciclo de vida das vigas de concreto.

Com os gráficos gerados pelo programa foi possível identificar as etapas que causam maior impacto e os fluxos mais importantes dentro do ciclo de vida deste elemento. A biblioteca de elementos, apesar de limitada, permite algumas análises interessantes de impactos de atividades de construção.

A ferramenta permite que se verifique qual o efeito da adição de resíduos e que se explorem os benefícios de reduzir rotas de transporte e outras opções de produção. Sente-se falta dos impactos derivados da produção dos insumos necessários para a produção do cimento. Um maior refinamento pode ser necessário.

Os impactos principais são bem detalhados e permitem que se avalie de forma holística os efeitos deletérios da produção de concreto. Seria interessante utilizá-lo para avaliações no Brasil. O problema é que a matriz de impactos adotada é bastante complexa e foi derivada de dados bastante específicos, válidos para a realidade americana. Não existem dados disponíveis com a mesma amplitude sobre a realidade brasileira. Por isto, acredita-se que é importante averiguar se o uso do BEES para os materiais nacionais se compatibiliza com métodos de análise mais tradicionais de impactos ambientais, o que será feito nos próximos capítulos.

## **5 ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE CONCRETO ARMADO DE CIMENTO PORTLAND**

Cimento portland é a denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), a origem do cimento foi há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. Os romanos também usavam a cal como principal material cimentício<sup>1</sup>.

Existem evidências que um cimento à base de cal foi usado na construção dos muros de uma cidade romana no século IV a.C. , no século II a.C., este novo material começou a ser usado em edificações em Roma. A pozolana, nome dado às terras vulcânicas da região de Pozzuoli, na Itália, localidade próxima ao Monte Vesúvio, foi utilizada na confecção de argamassas empregadas para construir a Via Ápia, os banhos romanos, o Coliseu e o Pantheon, em Roma, e vários aquedutos (KAEFER, 1998).

Os romanos usaram a cal como material cimentício, hoje utilizado em conjunto com o cimento na produção de diversos tipos de argamassas. Plínio relata uma argamassa com proporção 1:4 de cal e areia.

O concreto é um produto da construção civil, composto por uma mistura de aglomerante, agregados miúdos, agregados graúdos e água. Além de outros materiais eventuais, adições e os aditivos, que permitem modificar as características ou reduzir o custo do material dando características especiais ao concreto, como torná-lo mais impermeável.

Existem três tipos básicos de concretos: simples, armado e magro. O concreto simples, que pode assumir diferentes propriedades, variando desde o concreto rolado até o celular, possui boa resistência aos esforços de compressão, mas tende a apresentar uma reduzida resistência à tração. O concreto armado emprega reforços à tração, na forma de armaduras de aço, na sua composição, desta forma ele pode resistir aos esforços de tração e ser utilizado em elementos estruturais, como vigas, colunas e lajes. Já o concreto magro é confeccionado sem armadura e com pouco cimento, o que faz com que tenha baixa resistência e alta permeabilidade. No presente trabalho será analisado o concreto armado de cimento portland, com adições minerais, sem cal ou aditivos químicos.

---

<sup>1</sup> A cal ainda hoje é utilizada, em conjunto com o cimento portland, na produção de diversos tipos de argamassas. Esta é uma tradição antiga. Plínio relata o uso de uma argamassa com proporção 1:4 de cal e areia. Vitruvius reporta o uso de uma outra com proporção 1:2 de cal e pozolana (KAEFER, 1998).

Com isso, o estudo do ciclo de vida do concreto de cimento portland envolve a análise dos ciclos de vida de todos os materiais que o constituem. É necessário considerar os impactos intervenientes desde a extração das matérias-primas, até a o descarte ou reciclagem do concreto endurecido, transporte, incluindo a energia e recursos consumidos - assim como os poluentes liberados, na obtenção e transformação de cada insumo, no transporte dos mesmos até o local de produção do concreto, na fabricação do concreto, no transporte do concreto até o local de utilização, no lançamento e cura, na utilização do elemento de concreto e na demolição da estrutura e descarte ou reciclagem do concreto.

A seguir está uma breve descrição sobre os constituintes do concreto armado e seus ciclos de vida.

## 5.1 AGREGADOS

Conforme Rodrigues (2003), os agregados são produzidos a partir de britagem de maciços rochosos (originando a pedra britada, ou brita, e o pó de pedra) ou da exploração de ocorrências de material particulado natural (areia, seixo rolado ou pedregulho) (RODRIGUES,2003).

Os agregados são classificados como grãos e miúdos, de acordo com a sua granulometria. De acordo com Valverde (2002), a NBR 7211/1982 fixa as características exigíveis para agregados, miúdos e grãos, de origem natural, encontrados em forma de fragmentos ou resultantes da britagem de rochas. A mesma define como areia ou agregado miúdo os grãos que passam pela peneira de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm. Define, ainda, como agregado grão, os pedregulhos ou brita provenientes de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

Os agregados podem ser considerados como os insumos básicos empregados na produção do concreto, pois representam, em média, 80% do seu volume.

Segundo Valverde (2002), a principal aplicação dos agregados, seja a areia ou a pedra, na fabricação do concreto é de natureza econômica, tendo em vista tratar-se de materiais de baixo custo unitário, inferior ao do cimento. Mas, por outro lado, de acordo com Rodrigues

(2003), o agregado é insumo básico para a produção do concreto, por representar em média 80% do volume dos materiais utilizados.

De acordo com Silva Filho apud Rodrigues (2003) a construção civil é responsável por 14% a 50% do consumo dos recursos naturais do planeta.

O consumo de agregados pode ser considerado como um bom indicador do nível de desenvolvimento econômico e social de um povo. Neste sentido, é interessante notar que os Estados Unidos consomem, para uso na construção civil, anualmente cerca de 7,5 toneladas de agregado por habitante por ano, enquanto a União Européia consome de 5 a 8 t/hab.ano. , enquanto que, no Brasil, o consumo está pouco acima de 2 t/hab.ano. O consumo do Estado de São Paulo, o mais desenvolvido do país, chega a 4,5 t/hab.ano, enquanto em regiões metropolitanas nordestinas o mesmo não chega a 2 t/hab/ano.o (VALVERDE, 2002).

Em termos ambientais, os agregados são classificados como graúdos e miúdos de acordo com a sua granulometria. De acordo com Valverde (2002), a NBR 7211/1982 fixa as características exigíveis para agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados em forma de fragmentos ou resultante da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia cujos grãos passam pela peneira de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

A extração de areia e pedra britada se assemelha a uma atividade mineradora. Como acontece, normalmente, com toda atividade de mineração, trata-se de um empreendimento que impacta fortemente o meio ambiente. O interessante seria reduzir a extração de agregados naturais. No entanto, a restrição de falta de areia e brita no mercado traria um forte impacto econômico e social, já que a construção civil necessita muito destes insumos. De acordo com Silva Filho (apud Rodrigues, 2003), a construção civil é responsável por 14% a 50% do consumo dos recursos naturais do planeta.

A saída para este problema tem sido o licenciamento ambiental das áreas de extração de agregado, com a exigência de emissão de EIA-RIMA (Estudo de Impacto Ambiental-Relatório de Impactos Ambientais) seguindo a legislação ambiental nacional e estadual. Desta forma a extração de agregados atualmente é controlada pelos órgãos ambientais (IBAMA, DNPM, Secretarias Estaduais de Meio Ambiente, etc.), que exigem, além de medidas que

minimizem os impactos na extração, também medidas de recuperação do local após a exploração.

De acordo com Rodrigues (2003), os impactos ambientais causados pela extração mineral de agregados são: alteração da paisagem, supressão da vegetação (principalmente da mata ciliar), alteração na calha dos cursos de água, instabilidade de margens e taludes, turbidez da água e lançamento de efluentes.

As principais rochas utilizadas para a produção de pedra britada são: granito e gnaisse (85%), calcário e dolomita (10%) e basalto e diabásio (5%). A areia é uma substância mineral proveniente da decomposição gradual de rochas, por intemperismo causado pela ação da água ou dos ventos. Normalmente se originam de rochas principalmente graníticas, compondo-se de grãos arredondados de quartzo, podendo conter ainda, em diversas proporções, grãos de outros minerais (RODRIGUES, 2003).

O agregado graúdo mais utilizado na construção civil é a pedra britada, obtida em uma unidade industrial, chamada de pedreira, onde é feita a desintegração através de explosão controlada. Após a detonação da rocha matriz, grandes matacões (pedaços grandes da rocha) são transportados para serem triturados em equipamentos do tipo chamado britador.

O material britado, é passada em peneiras onde a brita é classificada de acordo com sua granulometria, sendo então transportada para baias de armazenamento por meio de esteiras. As figuras 5.1 a 5.4 mostram uma pedreira produtora de brita com suas diversas etapas de produção.

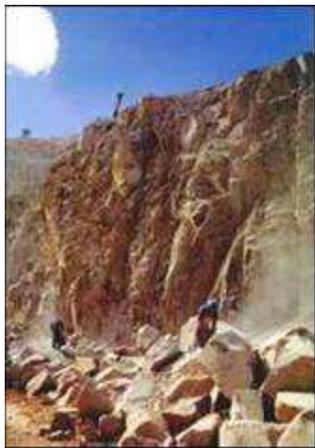


Figura 5.1: Explosão da rocha matriz



Figura 5.2: Transporte dos matacões até o britador.



Figura 5.3: Britador



Figura 5.4: Separação por Granulometria

A areia, usada como agregado miúdo para emprego em argamassas e concretos, pode ser classificada como natural (rios, minas, várzeas) e artificial (resíduo fino de pedreiras ou pó de pedra).

A areia natural é extraída em unidades de mineração chamadas de areais, podendo ser extraída do leitos de rios, depósitos lacustres, veios de areia subterrâneos ou de dunas. A maior parte da areia produzida no Brasil é proveniente de leitos de rios ou extraída de minas, com formação de cavas inundadas pelo lençol freático (RODRIGUES, 2003). A areia, juntamente com a água, é bombeada para silos suspensos, ou então acumulada em montes formados no terreno, para secagem e posteriormente transporte ser embarcada em caminhões basculantes. Algumas vezes a areia é transportada por meio fluvial, através de barcaças, como é o caso da areia que chega à cidade de Porto Alegre através do Lago Guaíba.

As figuras 5.5 e 5.6 apresentam uma draga de extração da areia e o transporte feito com barcaça, respectivamente.



Figura 5.5: Draga de areia



Figura 5.6: Transporte fluvial de areia (barcaça)

## 5.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento portland é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, usualmente junto com uma ou mais formas de sulfato de cálcio (normalmente gipsita) e, em alguns casos, com adições.

O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento portland. De acordo com Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), o clínquer tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante ABCP (2002).

As principais matérias-primas empregadas para a produção do cimento portland são carbonatos de cálcio, na forma de pedra calcária, e a sílica, normalmente obtida da argila. Esses dois recursos são encontrados em abundância na natureza. O calcário normalmente é extraído através do desmonte de bancada de rochas com explosivos, enquanto a argila é obtida com o uso de escavadeiras. Essas duas técnicas podem causar impacto ambiental local. Por isso, as mineradoras, que extraem este tipo de recurso, passam por licenciamento ambiental com exigência de Estudo de Impacto Ambiental (EIA-RIMA) e fiscalização dos órgãos ambientais.

Devido a isto, se podem desprezar os impactos ambientais causados durante a fase de extração do calcário e argila, a exemplo do que foi feito por Carvalho (2002). Mas, deve-se, todavia, levar em consideração os impactos causados durante o transporte destes recursos, quando as jazidas não estão junto às cimenteiras.

Na figura 5.7 pode-se ver uma bancada de calcário no momento da explosão.



Figura 5.7: Explosão de bancada de calcário

Após a explosão da rocha matriz o calcário é pré-selecionado pelo operador da retro-escavadeira, que coloca os fragmentos de calcário no caminhão basculante, para condução até o britador primário.

Este britador pode ser de mandíbula, martelo, de cone, entre outros. Na figura 5.8 pode-se ver um britador de martelo.



Figura 5.8: Vista de um britador tipo martelo.

De acordo com Carvalho (2002), o processo de fabricação do cimento portland é classificado conforme a utilização, ou não, de água como veículo de transporte e homogeneização da matéria-prima para o forno. No Brasil 98% das indústrias cimenteiras utilizam o processo via seco e pré-calcinadores.

A seguir se apresenta uma breve explicação sobre cada etapa do processo de fabricação do cimento portland mais comum no Brasil, de acordo com Carvalho (2002) e ABCP (2002).

### 5.2.1 Processo de Fabricação Via Seco

Como já foi visto anteriormente, depois de extraído da natureza, o calcário é passado para o britador primário, isto é feito para diminuir as dimensões das rochas. Após a britagem o mesmo é conduzido, junto com a argila que foi retirada da natureza com uso de escavadeira, ao silo de homogeneização. O calcário e a argila, já pré-homogeneizados, passam por balanças dosadoras e são conduzidas para o moinho de farinha, normalmente de bolas, para serem diminuídas em proporções micrométricas.

Este moinho muitas vezes é suprido de ar quente que vem do forno para que seja pré-aquecido, auxiliando no processo de decarbonatação do calcário. A farinha é passada para os silos de homogeneização que, através de ar comprimido, irá misturá-la para torná-la o mais homogênea possível. Na figura 5.9 pode-se ver o silo de homogeneização.

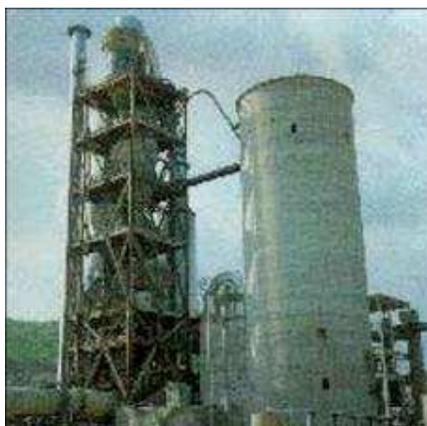


Figura 5.9: Vista de um silo de homogeneização.

A próxima etapa de produção do cimento é chamada de sistema forno, que compreende todas as fases que envolvem o fornecimento de calor para formação do clínquer, através da sinterização da matéria-prima.

A primeira fase do sistema forno é o pré-aquecimento, onde a matéria prima entra no processo com 50°C e sai com 800°C, depois de um período de tempo que pode variar de 25 a 30 segundos. Esta fase é responsável pela perda de água livre da matéria-prima e início da decarbonatação, mais precisamente a decomposição do carbonato de magnésio.

Nas fábricas modernas, a próxima fase é a pré-calcinação, que também é constituída por ciclones. O material desliza, por gravidade, dos pré-aquecedores para os pré-calcinadores. Este processo se inicia com o material a 800°C e termina com o mesmo a 1200°C, sendo alimentado pela circulação de ar quente que vem do forno e por um maçarico. É imprescindível que a descarbonatação seja completa, para que o material penetre na zona de alta temperatura no forno (zona de clinquerização).

Por gravidade, a matéria-prima entra então no forno, que é responsável pela formação do clínquer, numa reação que acontece em torno de 1450°C. O forno é constituído por um cilindro de aço, com comprimentos que variam, nos sistemas mais modernos, de 50 a 100 metros, e diâmetro de aproximadamente 5 metros, revestido com material refratário. Este grande cilindro gira em torno de seu próprio eixo com uma pequena inclinação, de forma que o material possa caminhar por gravidade.

O forno possui um maçarico alimentado por queima de combustível. Nas indústrias brasileiras a energia térmica pode ser suprida através da queima de combustíveis fósseis, como óleo diesel. Atualmente diversos resíduos orgânicos são queimados em substituição aos fósseis, tais como casca de arroz, ou outros resíduos disponíveis na região onde as cimenteiras estão localizadas. Algumas fábricas de cimento utilizam pneus velhos como substituição de combustíveis fósseis, uma alternativa para o destino final de pneumáticos.

No final do forno há resfriadores, que tem a finalidade de resfriar o clínquer o mais rápido possível para impedir a reconversão das fases mineralógicas já formadas. Os gases que saem do resfriador atravessam o forno no sentido contrário ao do material, chegando até o pré-aquecedor. Parte das partículas envolvidas no processo são carregadas pelos gases. Estas podem se precipitar naturalmente, reagindo quimicamente e voltando ao clínquer, ou são forçadas a se precipitar em um precipitador eletrostático.

Após o clínquer estar pronto vem a fase das adições, chamada de moagem final do cimento. Essas adições são normalmente constituídas de um regulador de pega, a gipsita (normalmente conhecida como gesso) e de adições ativas, tais como escória de alto forno e cinza volante. As adições utilizadas e a proporção em que são misturadas ao clínquer vão determinar o tipo do cimento produzido. No processo de moagem, dependendo do tipo de cimento a ser produzido, as partículas submetem-se a redução do tamanho original da ordem de 400:1 – 600:1. A finura e a distribuição granulométrica do cimento influenciam diretamente no seu desempenho.

Nesta etapa normalmente o moinho utilizado é o de bolas, que pode ser visto na figura 5.10. Após a moagem final o cimento é armazenado em silos e posteriormente embalado, utilizando equipamentos automatizados sem interferência humana, ou vendido a granel.



Figura 5.10: Moagem final

### 5.2.2 Principais Tipos de Cimento Portland

Segundo ABCP (2002), existem diversos tipos de cimento portland utilizados no Brasil que se diferenciam em sua composição. Os principais, ou os mais comercializados e empregados na construção civil brasileira são:

- Cimento portland comum (CP-I);
- Cimento portland composto (CP-II);
- Cimento portland de alto forno (CP-III);
- Cimento portland pozolânico (CP-IV).
- Cimento portland de alta resistência inicial (CP-V ARI);

Em menor escala ainda são produzidos e consumidos os seguintes tipos:

- cimento portland resistente aos sulfatos;
- cimento portland branco;
- cimento portland de baixo calor de hidratação;
- cimento para poços petrolíferos.

O primeiro cimento portland lançado no mercado brasileiro foi o que hoje é conhecido como CP-I, sem quaisquer adições ativas além do gesso (3% em média, utilizado como retardador de pega).

De acordo com ABCP (2002), foi o amplo domínio tecnológico sobre este cimento comum que permitiu desenvolver outros tipos de cimento, que inicialmente eram vistos como especiais, mas acabaram atendendo plenamente as necessidades da maioria das aplicações usuais, e apresentando, em muitos casos, alguma vantagem adicional.

Inspirados pelos bons resultados alcançados por países tecnologicamente mais avançados, e interessados em reduzir custos econômicos e ambientais, se desenvolveram os cimentos portland compostos, de alto forno e pozolânicos, que hoje correspondem a 75% da produção industrial brasileira de cimento. A tabela 5.1 apresenta a composição dos cimentos portland comum e compostos, com suas respectivas normas.

Tabela 5.1: Composição dos cimentos portland comum e compostos

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico tipo cinza volante (sigla Z)	Material carbonítico tipo filler (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: ABCP (2003)

O grande consumo de energia na produção do cimento motivou mundialmente a busca de medidas para diminuição da porcentagem de clínquer utilizada no cimento. Com isso, foram desenvolvidos cimentos com uma maior quantidade de resíduos incorporados ao cimento, que hoje são conhecidos como cimentos portland de alto-forno e pozolânicos. No quadro 5.2 pode-se ver a composição destes cimentos normalizados no Brasil.

Tabela 5.2: Composição dos cimentos portland Alto-Forno e Pozolânico

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulométrica de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: ABCP (2003)

Por motivos operacionais, têm ocupado um importante nicho de mercado os cimentos portland de alta resistência inicial, com poucas adições, mas com rápido desenvolvimento de resistência. Na tabela 5.3 se pode observar a constituição deste material.

Tabela 5.3: Composição dos cimentos portland de alta resistência inicial

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulométrica de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alta resistência inicial	CP V	100 - 95	-	-	5	NBR 5733

As adições, como já mencionado, são matérias-primas que, misturadas ao clínquer, vão determinar o tipo de cimento portland. São elas:

- **Gesso** – Tem como função retardar o tempo de pega, isto é, regular o período até o início do endurecimento, quando o cimento é misturado com água. A quantidade adicionada é pequena, normalmente em torno de 3%, mas sem esta adição o clínquer endurece quase que instantaneamente, impossibilitando seu uso na construção civil.
- **Escória de alto-forno** – São obtidas durante a produção do ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Quando foi descoberto que essa escória tinha a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, semelhante ao clínquer, ela deixou de ser um resíduo sem valor das indústrias siderúrgicas e começou a ser adicionada ao clínquer com gesso. Essa mistura resultou em um tipo de cimento que, além de atender plenamente

aos usos mais comuns também apresentou melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final.

- **Materiais pozolânicos** – Podem ser rochas vulcânicas, materiais fossilizados encontrados na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas e derivados da queima do carvão mineral nas usinas termelétricas (cinza volante), entre outros. Esses materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, passam a apresentar propriedade de ligante hidráulico, sob forma de pó muito fino que se forma pastoso e depois endurece. Mas a reação só ocorre na presença de certos ativadores. Um desses materiais é o clínquer que, no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal), que reage com a pozolana.

Sob o ponto de vista ambiental, é interessante ressaltar que a escória de alto-forno e os materiais pozolânicos, utilizados como adições ao clínquer, são resíduos que deixam de ser descartados no meio ambiente, para substituir o clínquer, que gera impactos ambientais consideráveis. Com isso, trazem benefícios ambientais e evitam impactos ambientais relacionados a essas adições. Deve-se, todavia, analisar com cuidado os impactos gerados pelo transporte destes materiais até as cimenteiras.

### 5.3 FORMAS DE MADEIRA

De acordo com Kuhn (2006), a análise da procedência de produtos de madeira é de fundamental importância para as avaliações de sustentabilidade ambiental. Por isso, o tipo de madeira utilizada para a confecção de fôrmas das estruturas de concreto armado deve ser levada em consideração neste trabalho.

Os tipos de madeira normalmente usadas em formas são o cedrinho ou o pinus. Para as escoras o mais utilizado é eucalipto, mas em alguns casos se utilizam escoras metálicas, alternativa que não será explorada neste trabalho.

O cedrinho é uma árvore nativa da Amazônia, mas também é plantada para fins de comercialização em praticamente todo o Brasil. O pinus e o eucalipto são espécies exóticas, por isso são consideradas madeiras de florestas plantadas. Deve-se salientar que o plantio de

árvores exóticas tem sido considerado como atividade danosa ao meio ambiente, devido à perda da biodiversidade e outros impactos associados à formação de grandes áreas de plantio.

No Brasil, visto que não é verificada a disponibilidade de madeira certificada para a construção civil, considera-se que não existe uma alternativa segura quanto à magnitude dos impactos da utilização de madeira para formas e escoras. O único fator que pode ser levado em consideração é o transporte da madeira até o local da confecção das fôrmas e impacto que este causa ao meio ambiente.

#### 5.4 ARMADURA DE AÇO

A armadura no concreto tem a função de resistir a esforços de tração e, em alguns casos, a esforços de compressão. É formada por elementos longitudinais e transversais (estribos), como pode ser visto na figura 23. Classificam-se como barras os produtos de diâmetro nominal de 10mm ou superior, e como fios aqueles de diâmetro nominal de 5mm ou inferior. As barras de armadura são normalmente confeccionadas com aço da categoria CA-25 e CA-50, sendo os fios da categoria CA-60. Estas categorias dizem respeito às relativas tensões de escoamento, em kgf/mm<sup>2</sup>, segundo a NBR 7480 (1996).



Figura 5.11: Vista de uma armadura de aço.

A principal matéria-prima empregada na produção do aço é o ferro-gusa, mas sucata também é utilizado como matéria-prima. Na tabela 5.4 podem ser vistas as matérias primas e quantidades típicas empregadas na produção de aço no Rio Grande do Sul, extraído de Grigoletti e Sattler (2004).

Tabela 5.4: Matéria-prima na produção do aço.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Quantidade / t de aço produzido</b>
Sucata metálica	1,137 t
Ferro gusa	0,303 t
Ferro (diversos)	0,043 t
Alumínio / Alumina	0,003 t
Fluorita	0,002 t
Carbureto de Cálcio	0,001 t
Cal	0,001 t

Fonte: (GRIGOLETTI E SATTLER, 2004)

Para a produção do ferro-gusa a principal matéria-prima é o minério de ferro, extraído da natureza através da atividade de mineração. Ele pode ser encontrado em grandes profundidades ou exposto, formando montanhas. Após a extração o minério de ferro é triturado e lavado para ser transportado à usina siderúrgica.

No forno, chamado de alto-forno, o minério é depositado em camadas sucessivas, intercaladas com carvão coque (combustível) e calcário (fundente). Ar é injetado no interior do forno para que o carvão coque queime e o minério derreta a uma temperatura de 1200°C. Ao derreter, o ferro fica depositado no fundo do forno. A este material se dá o nome de ferro-gusa.

As impurezas, chamadas de escória de alto-forno, flutuam sobre o ferro-gusa de forma que pode ser retirado em estado líquido.

Em uma cavidade no fundo do alto-forno o ferro-gusa é retirado e transportado para formas denominadas lingoteiras. Quando resfriado, o ferro-gusa é retirado da lingoteira e começa a ser chamado de lingote de ferro-gusa.

Neste trabalho será possível calcular os impactos causados pela produção do aço com relação às emissões atmosféricas, e o transporte do aço até o local da obra.

## 6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

Neste capítulo será apresentada a avaliação ambiental de vigas de concreto com cimento portland CP IV, o mais empregado no sul do país, com três traços diferentes. A Análise de Ciclo de Vida foi utilizada como metodologia de avaliação ambiental para fins de comparação com os dados do BEES. Os dados utilizados, de fluxos de substâncias durante o ciclo de vida das vigas de concreto, foram retirados de trabalhos científicos sobre o tema. A análise foi desenvolvida para vigas de concreto armado produzida em uma obra fictícia localizada na cidade de Porto Alegre, com os materiais normalmente utilizados nesta cidade.

Para verificar as alterações no desempenho ambiental de vigas de concreto armado, causadas pela mudança na localização da fábrica de cimento, foram montados dois cenários distintos, que serão explicados no decorrer do capítulo.

### 6.1 ESCOPO

Como discutido anteriormente, o objetivo foi avaliar o desempenho ambiental de vigas de concreto armado com diferentes tipos de concreto. O cimento escolhido para ser usado no trabalho foi o CP IV-32, que significa cimento pozolânico com resistência a compressão de 32 Mpa no 28º dia de idade. O material pozolânico empregado no cimento escolhido é a cinza volante, resíduo proveniente da queima de carvão pulverizado em usinas termoeletricas com o objetivo de gerar energia.

Foram adotados três tipos de concretos (denominados neste trabalho de A, B e C), com características típicas dos concretos utilizados na região de Porto Alegre. Os três concretos são assumidos como misturas de cimento portland CP IV, areia, brita e água, nas proporções e quantidades apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Concretos estudados

Concreto	Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (litros)
<b>A</b>	1 : 2 : 3 : 0,5	369	738	1107	184,5
<b>B</b>	1 : 1,5 : 2,5 : 0,35	459	688,5	1147,5	160,7
<b>C</b>	1 : 2,5 : 3,5 : 0,65	321	802,5	1123,5	208,65

Os traços foram definidos tomando teores de argamassa de 50% em relações (materiais secos) de 4, 5 e 6, equivalentes a consumos de cimento de aproximadamente 480 a 350 kg/m<sup>3</sup>. Este intervalo inclui a maioria dos concretos empregados atualmente para fins corriqueiros.

### 6.1.1 Coleta de Dados

Como já foi visto, a NBR 5736 permite que a quantidade de material pozolânico varie de 15 a 50% no cimento CPIV. Esta faixa é bem significativa, o que possibilita que a escolha da marca possa influenciar no desempenho ambiental do concreto.

Para esta pesquisa foi escolhido o cimento CPIV-32 da marca Votoran, produzido pela fábrica da Votorantim Cimentos, localizada em Esteio/RS. A tabela 6.2 apresenta a composição média do cimento escolhido de acordo com informação do fabricante.

Tabela 6.2: Composição média do CPIV-32 Votoran

Cimento CPIV-32	Clínquer (%)	Gesso (%)	Resíduos (cinza Volante) (%)
	68%	3%	29%

As quantidades de madeiras para as formas e de aço para as armaduras foram retiradas do software de orçamentos PLEO 2.0, com a substituição de chapas de compensado formada por tábuas de pinus 1", por ser este o material mais utilizado nas obras do Rio Grande do Sul. Os dados obtidos podem ser vistos nas tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3: Quantidade de madeira para formas

Característica	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Massa (kg)
Escora eucalipto	0,26	731	190,06
Caibro 5x7 cedrinho	0,05	500	25,0
Ripa 2,5x5 pinus	0,033	590	19,47
Tábua de pinus	0,11	590	64,90
<b>Total:</b>			<b>299,43 kg</b>

Tabela 6.4: Quantidade de aço

Característica	Massa (kg)
Aço CA-50	82,5
Arame Recozido	3,0
<b>Total:</b>	<b>85,5 kg</b>

Para o cálculo dos fluxos durante o transporte dos materiais e matérias-primas foi necessário fazer algumas considerações para o cálculo das distâncias. São elas:

1. A cinza volante utilizada como matéria-prima do cimento CPIV-32, no 1º cenário estudado, é fornecida pela Usina Termelétrica São Jerônimo da CGTEE (Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica) localizada no Município de São Jerônimo/RS.
2. O cimento utilizado na análise do 1º cenário é produzido pela Votorantim Cimentos, na fábrica localizada no Município de Esteio/RS.
3. A cinza volante utilizada como matéria-prima do cimento CPIV-32, no 2º cenário estudado, é fornecida pela Usina Termelétrica Presidente Médice da CGTEE (Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica) localizada no Candiota/RS.
4. O cimento utilizado na análise do 2º cenário é produzido pela Votorantim Cimentos, na fábrica localizada no Município de Pinheiro Machado/RS.
5. A concreteira utilizada neste trabalho é fictícia, com localização escolhida aleatoriamente. O endereço escolhido para a concreteira foi Travessa Escobar S/N, Bairro Camaquã, na cidade de Porto Alegre.
6. O fabricante do aço utilizado nas armaduras das vigas é a empresa Gerdau, na fábrica localizada no município de Sapucaí do Sul / RS.
7. As vigas serão executadas no Campus Ipiranga da UFRGS (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL), localizado na Avenida Bento Gonçalves nº 9500 Porto Alegre / RS.

As localizações dos atores envolvidos na ACV foram marcadas no *Google maps*, gerando o mapa que pode ser visto na figura 6.1.



Figura 6.1: Localizações dos atores envolvidos (*googlemaps*)

Para este estudo foi considerada a distância entre os pontos apresentados na figura 6.1. Com isso, desprezou-se a existência de depósitos ou pontos de venda que possam existir, chegando-se às distâncias apresentadas na tabela 6.5.

Tabela 6.5: Distância de transporte entre os atores envolvidos.

Percurso	Distância
CGTEE São Jerônimo → Cimenteira Esteio	86,7 km
Cimenteira Esteio → Concreteira	32,4 km
Concreteira → OBRA	14,4 km
Siderúrgica GERDAU → OBRA	39,2 km
CGTEE Candiota → Cimenteira Pinheiro Machado	24,4 km
Cimenteira Pinheiro Machado → Concreteira	383,0 km

Fonte: *googlemaps*

As distâncias percorridas entre a extração de agregados (areia e brita) até a concreteira, foram estipuladas em 80 km. O mesmo foi feito com a distância entre a extração de madeira e o local da obra, com o objetivo de cálculo, visto que existem várias possibilidades de aquisição destes materiais, que inclusive também são transportados por vias fluviais.

### 6.1.2 Delimitação das Fronteiras do Estudo

As fronteiras de estudo estão apresentadas na figura 6.2, onde pode ser visto que o estudo está dividido em quatro regiões. As setas em pontilhado indicam os transportes onde é possível contabilizar o consumo de energia com transporte.

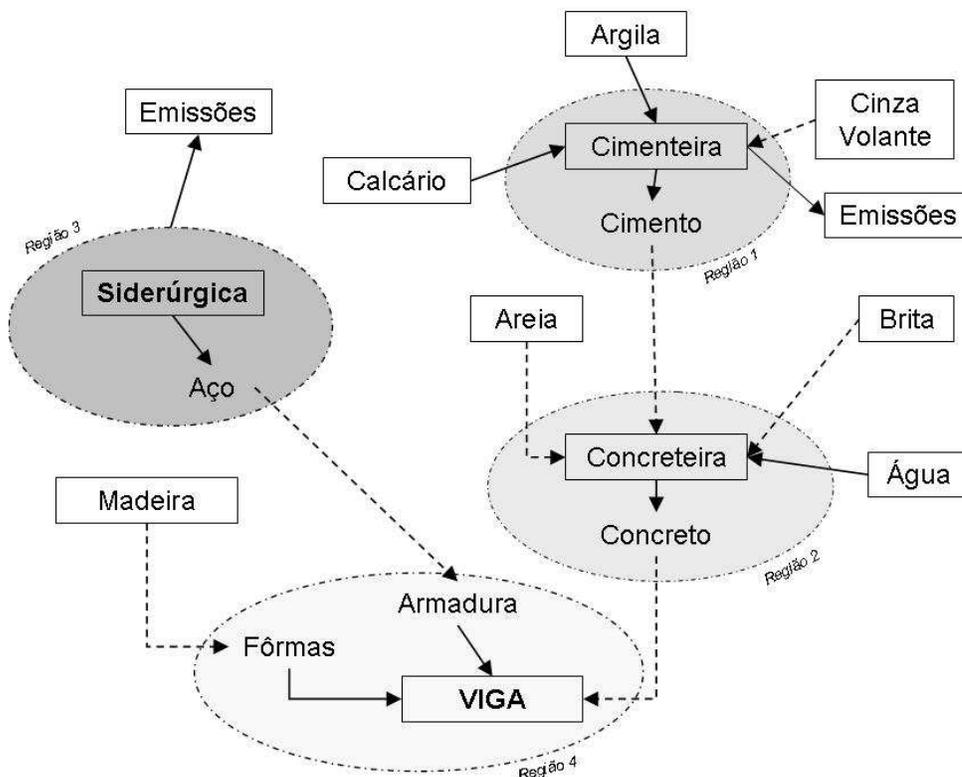


Figura 6.2: Fronteiras do Estudo

As regiões são as seguintes:

**Região 1 - Cimenteira:** Se refere à fábrica de cimento. Engloba o transporte do material pozolânico até a cimenteira e os fluxos no processo de produção do cimento.

**Região 2 - Concreteira:** Fabricação do concreto. Engloba a energia gasta no transporte dos materiais que constituem o concreto.

**Região 3 - Siderúrgica:** Fabricação do aço para armadura das vigas, considerando as emissões atmosféricas durante a produção. Devem ocorrer imprecisões nestes fluxos, devido aos índices utilizados se referirem à produção de aço e não à produção de barras nervuradas, que são as utilizadas em concreto armado.

**Região 4** - Obra: Confeção da viga. Engloba o concreto que foi produzido na concreteira (região 2), o transporte do aço para as armaduras e o transporte da madeira para a confeção das fôrmas.

### 6.1.3 Definição da Unidade Funcional

A unidade funcional utilizada para a análise será o 1m<sup>3</sup>, ou seja, será analisado o ciclo de vida para produção de 1m<sup>3</sup> das vigas de concreto. Para isto os insumos utilizados, como agregados e cimento serão empregados em massa, ou seja, em kg.

### 6.1.4 Análise dos Impactos Ambientais

Os impactos analisados dependem das informações disponíveis para o cálculo do desempenho ambiental.

Para fins do trabalho os impactos foram divididos em globais, regionais e locais, conforme indicado na tabela 6.6. Esta diferenciação não está relacionada a graus de importância, mas na necessidade de caracterização dos diferentes meios e receptores atingidos.

Na tabela 6.6 podem ser vistos os fluxos analisados em cada impacto e as unidades utilizadas na formação do inventário.

Tabela 6.6: Impactos Ambientais Avaliados.

Impactos		Fluxos	Unidade
Global	Aquecimento Global	CO <sub>2</sub>	gramas
		NO <sub>x</sub>	gramas
Regional	Acidificação	SO <sub>x</sub>	gramas
		NO <sub>x</sub>	gramas
	Consumo de Água	Consumo de água	litros
Local	Nutrição (eutrofização)	NO <sub>x</sub>	gramas
	Poluição do Ar	NO <sub>x</sub>	gramas
		SO <sub>x</sub>	gramas
		Material Particulado	gramas

## 6.2 INVENTÁRIO DO 1º CENÁRIO

Como já foi visto neste trabalho, uma característica positiva da ACV reside na possibilidade de realização de uma análise abrangente de todas as etapas do ciclo de vida de determinado material. Infelizmente, é comum a seleção de materiais, ou até mesmo edifícios, através de análises que se baseiam somente na avaliação dos aspectos ambientais de uma única fase do ciclo de vida. Kronka (2001) enfatiza que muitas vezes produtos acabam sendo classificados como ambientalmente corretos, só por terem um componente reciclável. Segundo Kuhn (2006) esta abordagem ignora os impactos que podem ser causados em outras etapas do ciclo de vida.

De acordo com a metodologia proposta por EPA (1993, apud Carvalho, 2002) podem ser identificadas as seguintes fases do ciclo de vida do cimento portland: extração de matéria prima, produção, transporte, uso, reciclagem ou gerenciamento dos resíduos.

Algumas vezes a ACV acaba tendo limitações devido à falta de dados ou a inacessibilidade dos dados sobre os impactos que efetivamente acontecem em cada uma destas fases. Isto dificulta a aplicação da ACV e limita a aplicação de seus resíduos, mas não inviabiliza sua utilidade como ferramenta de mapeamento de impactos ambientais.

A produção de vigas de concreto envolve a utilização de vários materiais, cada um com o seu ciclo de vida em particular, que interagem. Para facilitar o desenvolvimento da ACV a delimitação da pesquisa foi dividida em 4 regiões de estudo, como discutido no item anterior. Para manter a consistência, o inventário foi desenvolvido também desta mesma forma.

### 6.2.1 Inventário 1º Cenário – Região de estudo 1

Na região de estudo de estudo 1 foram contabilizados os fluxos relativos ao transporte da matéria-prima até a cimenteira e à produção do cimento. Dada a escassez de dados, foi necessário utilizar índices aproximados, que possuem imprecisões intrínsecas. Infelizmente, no estágio de desenvolvimento atual desta área no nosso país, esta imprecisão é praticamente inerente a este tipo de análise.

O índice de fluxos derivados do transporte de matéria-prima foi retirado de Kuhn (2006), e expressa o consumo genérico de energia para o transporte de cargas, por quilômetro rodado.

O valor adotado foi de **0,00078 MJ/kg.km**. Para calcular o fluxo de geração de CO<sub>2</sub> por tonelada de matéria-prima transportada foi utilizado o índice **74gCO<sub>2</sub>/MJ**. Cabe salientar que estes índices foram desenvolvidos considerando alta eficiência no processo de transporte. Isto implica que os caminhões sejam operados a 100% da sua capacidade de carga e, no retorno, que os mesmos retornem cheios, levando outras cargas. Como destaca Kuhn (2006), essas práticas não são verificadas para todos os materiais, o que poderia acarretar distorções nos valores adotados.

Os índices de fluxos da produção do clínquer foram retirados de Carvalho (2002). Estes podem conter imprecisões devido às variações nas plantas das fábricas de cimento e nível tecnológico utilizado. Baseado nesta referência foram adotados os seguintes valores de fluxos de poluentes derivados da produção de 1 tonelada de clínquer:

- **1,95 kgNO<sub>x</sub>/t clínquer,**
- **0,32 kgSO<sub>x</sub>/t clínquer,**
- **900 kgCO<sub>2</sub>/t clínquer,**
- **0,21 kg material particulado/t clínquer.**

Após as conversões necessárias das unidades chegou-se aos valores apresentados na tabela 6.7 e 6.8. No caso da tabela 6.7, que apresenta os fluxos associados ao transporte de matéria-prima, considerou-se que a cimenteira retira calcário das proximidades, o que é comum em muitas fábricas de cimento. Com isto, os fluxos relativos ao transporte de calcário até a cimenteira foram descartados. Com o objetivo de simplificar o cálculo, foi também desconsiderado o impacto do transporte de gesso até a fábrica de cimento.

Tabela 6.7: Fluxos de CO<sub>2</sub> derivados do transporte de matéria-prima – Região de estudo 1

<b>Matéria-prima</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>Emissões kg CO<sub>2</sub>/t</b>
Calcário	0	0
Cinza volante	86,7	5,004
Gesso	0	0

Tabela 6.8: Fluxos de poluentes derivados da produção de cimento – Região de estudo 1

<b>Fluxos</b>	<b>kg/t de cimento produzido</b>
NO <sub>x</sub>	1,326
SO <sub>x</sub>	0,218
CO <sub>2</sub>	612,0
Material Particulado	0,143

No caso da tabela 6.8, os índices associados à produção de clínquer foram multiplicados pela quantidade de clínquer presente no cimento considerado (CP-IV com 68% de clínquer), para gerar índices relativos à produção de 1 tonelada de cimento.

Os totais dos fluxos associados com a Região de Estudo 1 podem ser vistos na tabela 6.9, em gramas por kg de cimento CPI V-32 produzido. Considerou-se, para compor os fluxos de CO<sub>2</sub>, que em cada tonelada de cimento produzido, se utiliza 29% de cinza volante. O restante do material (3%) foi assumido como sendo composto de gipsita, de acordo com as informações do fabricante.

Tabela 6.9: Total de fluxos da Região de Estudo 1 – 1° Cenário

Fluxos	g/kg de cimento produzido
NO <sub>x</sub>	1,326
SO <sub>x</sub>	0,218
CO <sub>2</sub>	613,451
MP	0,143

## 6.2.2 Inventário 1° Cenário – Região de estudo 2

A região de estudo 2 se foca nas atividades referentes à concreteira, e inclui os fluxos de poluentes derivados do transporte dos materiais necessários para a produção do concreto. Foram calculados os fluxos para cada um dos três concretos estudados.

Para o consumo de energia foi utilizado o mesmo índice **0,00078 MJ/kg.km**, adotado na quantificação dos fluxos de poluentes associados ao transporte na Região de Estudo 1.

Para calcular o fluxo de CO<sub>2</sub>/t de matéria-prima transportada foi utilizado o índice **74gCO<sub>2</sub>/MJ**, como no item anterior.

Os índices foram multiplicados pela massa de cada material (vide tabela 6.1) necessária para a produção de cada um dos três concretos e as distâncias percorridas. Após as conversões necessárias das unidades chegaram-se aos valores das tabelas 6.10, 6.11 e 6.12.

Tabela 6.10: Fluxos de CO<sub>2</sub> na produção do concreto A ( $m = 5 / c = 369 \text{ kg/m}^3$ ) – 1º Cenário

Concreto A	Distância (km)	Energia consumida (MJ/kg)	Emissões (gCO <sub>2</sub> /kg)	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	32,4	0,025	1,870	690,077
Areia	80	0,062	4,618	3407,789
Brita	80	0,062	4,618	5111,683
<b>Total</b>				<b>9209,549</b>

Tabela 6.11: Fluxos de CO<sub>2</sub> na produção do concreto B ( $m = 4 / c = 459 \text{ kg/m}^3$ ) – 1º Cenário

Concreto B	Distância (km)	Energia consumida (MJ/kg)	Emissões (gCO <sub>2</sub> /kg)	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	32,4	0,025	1,870	858,389
Areia	80	0,062	4,618	3179,218
Brita	80	0,062	4,618	5298,696
<b>Total</b>				<b>9336,302</b>

Tabela 6.12: Fluxos de CO<sub>2</sub> na produção do concreto C ( $m = 6 / c = 341 \text{ kg/m}^3$ ) – 1º Cenário

Concreto C	Distância (km)	Energia consumida (MJ/kg)	Emissões (gCO <sub>2</sub> /kg)	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	32,4	0,025	1,870	600,27
Areia	80	0,062	4,618	3705,945
Brita	80	0,062	4,618	5188,323
<b>Total</b>				<b>9494,538</b>

Neste caso, foi considerado o consumo de água, fluxo que não havia sido incorporado no item anterior. O consumo de água foi calculado apenas a partir da quantidade de água em litros exigida pelo traço de cada concreto, isto por que não foi possível identificar e quantificar o consumo de água em outra etapa do ciclo de vida do concreto. Os valores de fluxos de água na produção dos concretos são apresentados na tabela 6.13.

Tabela 6.13: Fluxos de água na produção dos concretos – 1º Cenário

Concretos	Consumo de água (litros por m <sup>3</sup> de concreto)
A	184,5
B	160,7
C	208,65

### 6.2.3 Inventário 1º Cenário – Região de estudo 3

A Região de Estudo 3 engloba as atividades na siderúrgica, onde é produzido o aço para a armadura das vigas. Os fluxos desta região de estudo foram calculados a partir de índices retirados de Grigoletti e Sattler (2004), que são: **1,4kg NO<sub>x</sub>/t, 6,1kg CO<sub>2</sub>/t, 15,6kg CO/t, 3,3kg SO<sub>x</sub>/t e 18kg material particulado/t (MP/t)**.

Para os três concretos utilizou-se a mesma quantidade de ferro para a armadura (conforme tabela 6.4)<sup>2</sup>. Por isso, para determinação dos fluxos, simplesmente multiplicou-se a massa total de ferro (kg por m<sup>3</sup> de concreto) pelos índices acima. Com as conversões de unidades necessárias chegou-se aos resultados da tabela 6.14, que são iguais para os três tipos de concretos.

Tabela 6.14: Total de fluxos na Região de Estudo 3 – 1º Cenário

Fluxos	g/ m <sup>3</sup> de concreto
NO <sub>x</sub>	119,70
CO <sub>2</sub>	521,55
CO	1333,80
SO <sub>x</sub>	282,15
MP	1539,00

### 6.2.4 Inventário 1º Cenário – Região de estudo 4

A região de estudo 4 consiste no local onde a viga foi construída. Nesta região considerou-se o transporte da madeira para as fôrmas, do aço para a armadura e o do concreto até o local. Como a quantidade de concreto capaz de ser transportado por um caminhão betoneira é igual, independentemente do tipo de concreto, os fluxos são similares.

A tabela 6.15 mostra as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no transporte para fabricação das vigas. Os índices de fluxos no transporte considerados foram **0,00078 MJ/kg.km e 74gCO<sub>2</sub>/MJ**. É possível que ocorram imprecisões nos fluxos do transporte do concreto, visto que este é transportado em caminhão betoneira, com consumo de energia diferenciado dos

<sup>2</sup> Esta hipótese simplificadora, obviamente, pode penalizar os concretos mais resistentes. Todavia, como o interesse é comparar os custos ambientais de produção de cada um destes tipos de concreto, sem fazer uma análise custo-benefício global (o que demandaria a consideração das resistências dos materiais e cargas admissíveis), considera-se que, para os fins da pesquisa, a hipótese é razoável. No caso de utilização da técnica para tomada de decisões efetivas, porém, este tipo de consideração seria necessário.

caminhões comumente encontrados. Considerando que o fluxo na cidade causa um aumento do consumo de combustível, decidiu-se majorar os valores em 20%.

Tabela 6.15: Total de fluxos na Região de estudo 4 – 1º Cenário

Vigas	Distância (km)	Massa (kg)	Energia consumida (MJ/m <sup>3</sup> )	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Madeira	80,00	299,43	18,684	1382,616
Ferro	39,20	85,50	2,614	193,436
Concreto	14,40	2455,7	33,099 (1,2 * 0,00078 * 2455,7 * 14,40)	2449,326
<b>Total</b>				<b>4025,378</b>

## 6.2.5 Inventário Final do 1º Cenário

Somando os fluxos em todas as regiões de estudo, que compreendem as várias etapas do ciclo de vida analisado, chegou-se ao inventário total mostrado na tabela 6.16.

Tabela 6.16: Inventário final do 1º Cenário

Viga	Fluxo	Região de estudo 1	Região de estudo 2	Região de estudo 3	Região de estudo 4	Total
A	NO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	489,294	-	119,700	-	608,994
	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>3</sup> )	226.363,4	9.209,549	521,550	4.025,378	240.119,900
	CO (g/m <sup>3</sup> )	-	-	1333,800	-	1.333,800
	SO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	80,442	-	282,150	-	362,592
	MP (g/m <sup>3</sup> )	52,767	-	1539,000	-	1.591,767
	Água (L/m <sup>3</sup> )	-	184,5	-	-	184,500
B	NO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	608,634	-	119,700	-	728,334
	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>3</sup> )	281.574,0	9.336,302	521,550	4.025,378	295.457,200
	CO (g/m <sup>3</sup> )	-	-	1333,800	-	1.333,800
	SO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	100,062	-	282,150	-	382,212
	MP (g/m <sup>3</sup> )	65,637	-	1539,000	-	1.604,637
	Água (L/m <sup>3</sup> )	-	160,7	-	-	160,7
C	NO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	425,646	-	119,700	-	545,346
	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>3</sup> )	196.917,8	9.494,538	521,550	4.025,378	210.959,300
	CO (g/m <sup>3</sup> )	-	-	1333,800	-	1.333,800
	SO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	69,978	-	282,150	-	352,128
	MP (g/m <sup>3</sup> )	45,903	-	1539,000	-	1.584,903
	Água (L/m <sup>3</sup> )	-	208,65	-	-	208,65

O inventário dos fluxos da produção do cimento (Região de estudo 1) foi desenvolvido na unidade gramas / kg de cimento. Com isso, foi necessário fazer o produto entre os resultados apresentados na tabela 6.9 e a quantidade utilizada de cimento em cada tipo de concreto (tabela 6.1). As outras colunas da tabela 6.16 foram preenchidas com os resultados já apresentados neste capítulo.

## 6.3 ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NO 1º CENÁRIO

Neste trabalho são avaliados os diferentes impactos ambientais a partir de fatores potenciais de equivalência, apresentados em Lippiatti (2002), e os fluxos do inventário de cada uma das três vigas (tabela 6.16).

### 6.3.1 Impacto Ambiental Global

Dentre os impactos ambientais globais significativos associados à produção de concreto se encontra a contribuição ao aquecimento global derivada do lançamento de gases que contribuem para o efeito estufa. Este efeito é analisado a seguir.

#### a) Contribuição ao Aquecimento global

Dos fluxos encontrados no ciclo de vida das vigas de concreto armado estudados, modelados com todas as dificuldades salientadas, apenas o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) contribuem para o aquecimento global.

Realizando a equivalência entre os impactos ambientais de ambos, é possível determinar o Potencial de Aquecimento Global, ou GWP (sigla em inglês), em gramas de dióxido de carbono por unidade funcional.

A equivalência entre os fluxos foi retirada de Carvalho (2002), sendo adotados os valores mostrados na tabela 6.17. A equação 1, apresentada a seguir, é utilizada para calcular o GWP total, conforme os dados apresentados a seguir.

$$GWP_{total} = \sum_i w_i \times GWP_i \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:  $w_i$  = massa dos aspectos ambientais determinados no inventário

$GWP_i$  = fator de equivalência dos aspectos ambientais

Tabela 6.17: Fator de equivalência para aquecimento global

Fluxo do inventário $i$	$GWP_i$
Dióxido de carbono	1
Óxidos de nitrogênio	320

Considerando estes dados, a tabela 6.18 apresenta o potencial de contribuição ao aquecimento global derivado da emissão de gases de efeito estufa, de cada uma das três vigas analisadas neste trabalho, sendo adotada a unidade padronizada de gramas de CO<sub>2</sub> por unidade funcional de trabalho (1m<sup>3</sup>).

Tabela 6.18: Potencial de aquecimento global das vigas – 1º Cenário

Viga	CO <sub>2</sub> (GWP)	NO <sub>x</sub> (GWP)	GWP total (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
A	240.119,900	194.878,08	434.997,98
B	295.457,200	233.066,88	528.524,08
C	210.959,300	174.510,72	385.470,02

A partir dos resultados da tabela 6.18 foi desenvolvido um gráfico comparativo do potencial de aquecimento global para cada viga, em função de seu consumo de cimento, como mostrado na figura 6.3. Verifica-se que, como os impactos considerados estavam diretamente associados ao consumo de cimento, existe uma tendência a um comportamento linear, que pode ser modelado adequadamente através de uma regressão, como indicado na figura 6.3.

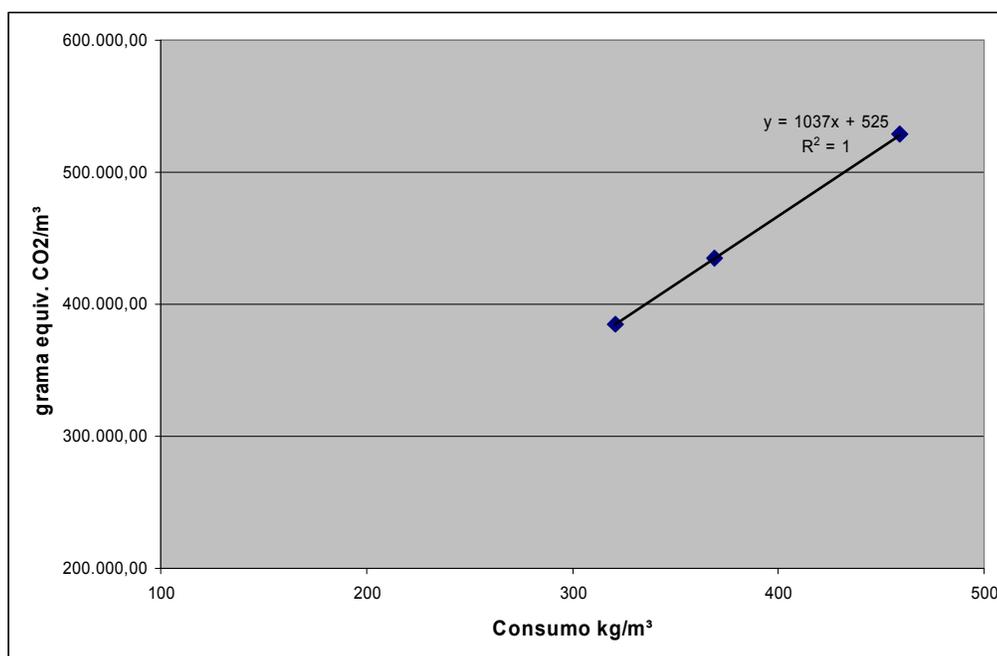


Figura 6.3: Variação de emissão de CO<sub>2</sub> de cada viga em função de seu consumo de cimento.

Na figura 6.4 pode-se observar, percentualmente, de que região de estudo se originam os impactos ambientais relativos ao aquecimento global na viga A. Constata-se que os fluxos associados ao transporte de materiais (regiões de estudo 2 e 4), somam somente 3% das

emissões, sendo bem inferiores aos fluxos das regiões 1 e 3, relativas à produção de cimento e aço, respectivamente. Apesar da produção de aço ser bastante agressiva, a pequena quantidade de material usado para construir 1 m<sup>3</sup> de viga reduz seu impacto.

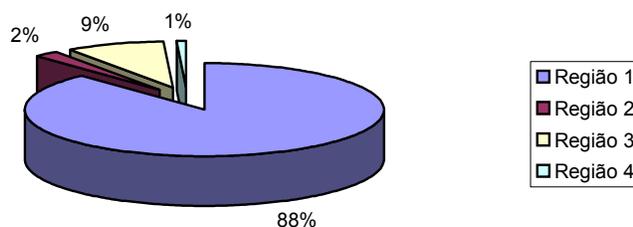


Figura 6.4: Distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo.

Para efeitos de comparação, se considerarmos que a madeira utilizada nas formas vem da região norte, percorrendo 2000 km de caminhão, os custos já se alteram significativamente, com a parcela referente à região de estudo 4 subindo de 1 para 8%, como se vê na figura 6.5, e os impactos em termos de emissões derivados de transporte de materiais subindo para 10%.

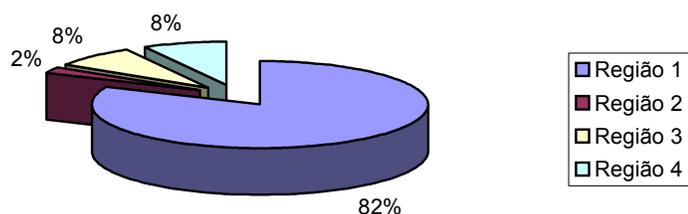


Figura 6.5: Distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo considerando transporte de madeira por 2.000 km.

### 6.3.2 Impacto Ambiental Regional

Como visto anteriormente, os principais impactos ambientais regionais são a acidificação e o consumo de água. A seguir discute-se cada um deles.

#### a) Impacto devido à Acidificação

De acordo com Lippiatti (2002), oito tipos de emissões são consideradas como sendo causadoras de aumentos no potencial de acidificação. Duas destas encontradas na ACV das vigas objeto deste trabalho. São eles: óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

O potencial de acidificação é calculado transformando as quantidades de substâncias estimadas pela ACV em quantidade equivalente de íon hidrogênio, usando os fatores de equivalência indicados na tabela 6.19. O somatório das massas de cada substância agressiva multiplicado pelo fator de equivalência determinam o potencial de acidificação total, como indicado na equação 2:

$$AP_{total} = \sum_i w_i \times AP_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:  $w_i$  = massa dos aspectos ambientais determinados no inventário

$AP_i$  = fator de equivalência dos aspectos ambientais

Tabela 6.19: Fator de equivalência para acidificação

Fluxo do inventário $i$	$AP_i$
Íon hidrogênio	1
Óxidos de enxofre	50,79
Óxidos de nitrogênio	40,04

Os resultados do potencial de acidificação para as três vigas podem ser vistos na tabela 6.20.

Tabela 6.20: Potencial de acidificação – 1º Cenário

Viga	NO <sub>x</sub> (AP)	SO <sub>x</sub> (AP)	AP total (H)
A	24.384,12	18.416,04	42.800,16
B	29.162,49	19.412,54	48.575,04
C	21.835,65	17.884,58	39.720,23

A partir dos resultados da tabela 6.20 foi desenvolvido um gráfico comparativo do potencial de acidificação das vigas, mostrado na figura 6.6. Como esperado, sendo este impacto associado somente à produção dos materiais, a viga com maior consumo de cimento tem o maior impacto.

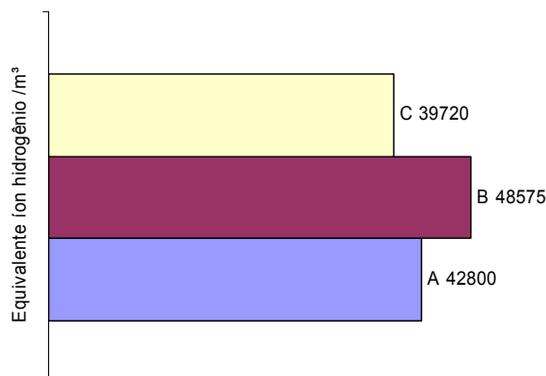


Figura 6.6: Gráfico de Potencial de Acidificação das Vigas.

### b) Impacto Relativo ao Consumo de Água

A depleção dos recursos hídricos não acontece apenas no consumo deste recurso, mas também no lançamento de nutrientes pela agricultura ou pela manufatura de materiais. Neste trabalho, assim como na ferramenta BEES 3.0, a depleção de recursos hídricos é tratada em dois impactos separados, que são: consumo de água e nutrição.

O consumo de água, como já foi dito, foi considerado apenas no momento da mistura do concreto (concreteira). Sem qualquer utilização de equações ou conversões de unidades os resultados são transferidos do inventário para a tabela 6.21, em litros por unidade funcional.

Tabela 6.21: Potencial de consumo de água – 1º cenário

Viga	Consumo de água (litros)
A	184,5
B	160,7
C	208,6

Para melhor consideração deste impacto seria necessário analisar o consumo de água para produção do aço, lavagem dos caminhões betoneira, limpeza das fôrmas e cura do concreto, entre outros. A contaminação da água por resíduos também deveria ser analisada e seu efeito

internalizado. Infelizmente, a escassez de dados confiáveis impede a realização de análises mais sofisticadas.

### 6.3.3 Impacto Ambiental Local

Os impactos ambientais locais importantes no caso da produção de concreto, que foram analisados neste trabalho, são a nutrição (eutrofização) e a poluição do ar.

#### a) Impacto de Nutrição

De acordo com Lippiatti (2002) treze fluxos podem ser utilizados para calcular o potencial de nutrição. Os principais nutrientes liberados no processo de produção de concreto, que podem vir a contribuir para a nutrição de corpos de água e desenvolvimento de algas são o nitrogênio e o fósforo.

Na tabela 6.22 pode-se ver o fator de equivalência entre os óxidos de nitrogênio (NOx) e o Nitrogênio (N). O potencial de nutrição total (NP total) é dado em gramas de nitrogênio por unidade funcional.

Tabela 6.22: Fator de Equivalência de Nutrição

Fluxo do inventário $i$	$NP_i$
nitrogênio	1
Óxidos de nitrogênio	0,04

A tabela 6.23 mostra os cálculos realizados para este fim, com os resultados sendo apresentados em termos de gramas de nitrogênio equivalente por metro cúbico de concreto produzido.

Tabela 6.23: Determinação do Potencial de Nutrição Total das Vigas – 1º Cenário.

Viga	NO <sub>x</sub> (NP)	NP total (g Neq. /m <sup>3</sup> )
A	24,360	24,360
B	29,133	29,133
C	21,814	21,814

### b) Poluição do Ar

Contaminantes aéreos são partículas sólidas e líquidas, comumente encontradas no ar. Estas partículas são provenientes de atividades, como combustão, operação de veículos, geração de energia, operações de manuseio e quebra de materiais. Incluem partículas grossas que causam problemas respiratórios como asma, e partículas finas que podem levar a problemas respiratórios mais sérios.

O impacto poluição do ar, ou poluição atmosférica, é medido em DALYs (sigla em inglês). Segundo a Organização Mundial de Saúde (2007), um DALY representa um ano de vida saudável perdido, somando-se a perda de capacidade e mortalidade.

Neste trabalho o potencial em termos de poluição do ar (CP, sigla em inglês utilizada pelo BEES 3.0), da produção de concreto, será medido em *microDALYs*, conforme a equação 3.

$$CP_{total} = \sum_i w_i \times CP_i \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:  $w_i$  = massa dos aspectos ambientais determinados no inventário em gramas

$CP_i$  = fator de equivalência dos aspectos ambientais

Na tabela 6.24 pode-se ver o fator de equivalência entre as unidades básicas das substâncias consideradas como potencialmente impactantes durante a análise de ciclo de vida das vigas e a unidade *microDALY*. Com estes fatores foi calculado o potencial de poluição do ar para as vigas (tabela 6.25).

Tabela 6.24: Fator de equivalência para poluição do ar

Fluxo do inventário $i$	$CP_i$
<i>microDALY</i>	1
Óxidos de enxofre	0,014
Óxidos de nitrogênio	0,002
Material Particulado	0,046

Tabela 6.25: Potencial de poluição do ar – 1º Cenário

Viga	SO <sub>x</sub> (CP)	NO <sub>x</sub> (CP)	MP (CP)	CP total ( <i>microDALYs</i> )
A	5,076	1,218	73,221	79,515
B	5,351	1,457	73,813	80,621
C	4,991	1,144	73,037	79,172

Os resultados mostraram pouca diferença no potencial de poluição do ar das vigas, com uma pequena diferença de 1,8% os resultados das vigas B e C. A partir dos resultados da tabela 6.25 foi desenvolvido um gráfico comparativo do potencial de poluição do ar em *microDALYs* por unidade funcional, mostrado na figura 6.7.

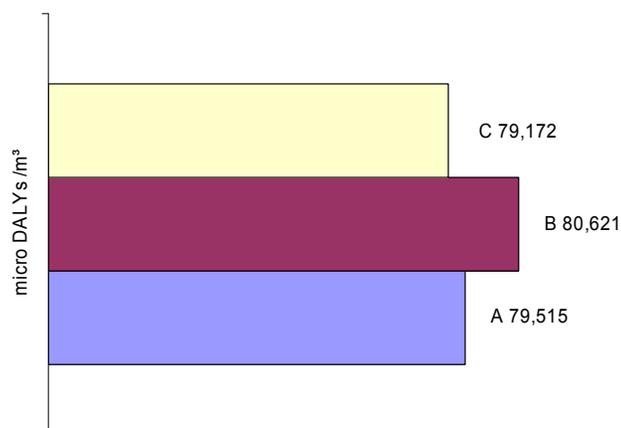


Figura 6.7: Gráfico do potencial de poluição do ar

## 6.4 INVENTÁRIO DO 2º CENÁRIO

Nesta etapa foi feito o cálculo dos fluxos do 2º cenário. Situação em que a fábrica de cimento está localizada na cidade de Pinheiro Machado e o fornecedor de cinza volante na cidade de Candiota. O método utilizado é o mesmo do 1º cenário, só havendo diferença na distância considerada para o transporte entre o fornecedor de cinza volante e a indústria de cimento, e entre a fábrica de cimento e a concreteira.

Este cenário foi montado para verificar o quanto mudanças logísticas de uma empresa, que muitas vezes é incentivada por objetivos econômicas, podem modificar o potencial de impacto ambiental de um produto.

### 6.4.1 Inventário 2° Cenário – Região de estudo 1

Na região de estudo de estudo 1 foram contabilizados os fluxos relativos ao transporte da matéria-prima até a cimenteira e à produção do cimento.

O índice de fluxos derivados do transporte de matéria-prima foi retirado de Kuhn (2006), e expressa o consumo genérico de energia para o transporte de cargas, por quilômetro rodado. O valor adotado foi de **0,00078 MJ/kg.km**. Para calcular o fluxo de geração de CO<sub>2</sub> por tonelada de matéria-prima transportada foi utilizado o índice **74gCO<sub>2</sub>/MJ**.

Os índices de fluxos da produção do clínquer foram retirados de Carvalho (2002). Baseados nesta referência foram adotados os seguintes valores de fluxos de poluentes derivados da produção de 1 tonelada de clínquer:

- **1,95 kgNO<sub>x</sub>/t clínquer,**
- **0,32 kgSO<sub>x</sub>/t clínquer,**
- **900 kgCO<sub>2</sub>/t clínquer,**
- **0,21 kg material particulado/t clínquer.**

Após as conversões necessárias das unidades chegou-se aos valores apresentados na tabela 6.26 e 6.27. No caso da tabela 6.26, que apresenta os fluxos associados ao transporte de matéria-prima, considerou-se que a cimenteira retira calcário das proximidades, o que é comum em muitas fábricas de cimento. Com isto, os fluxos relativos ao transporte de calcário até a cimenteira foram descartados. Com o objetivo de simplificar o cálculo, foi também desconsiderado o impacto do transporte de gesso até a fábrica de cimento.

Tabela 6.26: Fluxos de CO<sub>2</sub> derivados do transporte de matéria-prima – Região de estudo 1

<b>Matéria-prima</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>Emissões kg CO<sub>2</sub>/t</b>
Calcário	0	0
Cinza volante	24,40	1,410
Gesso	0	0

Tabela 6.27: Fluxos de poluentes derivados da produção de cimento – Região de estudo 1

<b>Fluxos</b>	<b>kg/t de cimento produzido</b>
NO <sub>x</sub>	1,326
SO <sub>x</sub>	0,218
CO <sub>2</sub>	612,0
MP	0,143

No caso da tabela 6.27, os índices associados à produção de clínquer foram multiplicados pela quantidade de clínquer presente no cimento considerado (CP-IV com 68% de clínquer), para gerar índices relativos à produção de 1 tonelada de cimento.

Os totais dos fluxos associados com a Região de Estudo 1 podem ser vistos na tabela 6.28, em gramas por kg de cimento CPI V-32 produzido. Considerou-se, para compor os fluxos de CO<sub>2</sub>, que em cada tonelada de cimento produzido, se utiliza 29% de cinza volante. O restante do material (3%) foi assumido como sendo composto de gipsita, de acordo com as informações do fabricante.

Tabela 6.28: Total de fluxos da Região de Estudo 1 – 2º Cenário

Fluxos	g/kg de cimento produzido
NO <sub>x</sub>	1,326
SO <sub>x</sub>	0,218
CO <sub>2</sub>	612,409
MP	0,143

#### 6.4.2 Inventário 2º Cenário – Região de estudo 2

A região de estudo 2 se foca nas atividades referentes à concreteira, e inclui os fluxos de poluentes derivados do transporte dos materiais necessários para a produção do concreto.

Para o consumo de energia e liberação de CO<sub>2</sub> por tonelada transportada foram utilizados os mesmos índices do item anterior.

Os índices foram multiplicados pela massa de cada material (vide tabela 6.1) necessária para a produção de cada um dos três concretos e as distâncias percorridas. Após as conversões necessárias das unidades chegaram-se aos valores das tabelas 6.29, 6.30 e 6.31.

Tabela 6.29: Fluxos de CO<sub>2</sub> na produção do concreto A ( $m = 5 / c = 369 \text{ kg/m}^3$ ) – 2º Cenário

Concreto A	Distância (km)	Energia consumida (MJ/kg)	Emissões (gCO <sub>2</sub> /kg)	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	383	0,299	22,107	8157,394
Areia	80	0,062	4,618	3407,789
Brita	80	0,062	4,618	5111,683
<b>Total</b>				<b>16676,866</b>

Tabela 6.30: Fluxos de CO<sub>2</sub> na produção do concreto B ( $m = 4 / c = 459 \text{ kg/m}^3$ ) – 2º Cenário

Concreto B	Distância (km)	Energia consumida (MJ/kg)	Emissões (gCO <sub>2</sub> /kg)	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	383	0,299	22,107	10147,003
Areia	80	0,062	4,618	3179,218
Brita	80	0,062	4,618	5298,696
<b>Total</b>				<b>18624,917</b>

Tabela 6.31: Fluxos de CO<sub>2</sub> na produção do concreto C ( $m = 6 / c = 341 \text{ kg/m}^3$ ) – 2º Cenário

Concreto C	Distância (km)	Energia consumida (MJ/kg)	Emissões (gCO <sub>2</sub> /kg)	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Cimento	383	0,299	22,107	7538,405
Areia	80	0,062	4,618	3936,504
Brita	80	0,062	4,618	5511,106
<b>Total</b>				<b>16986,015</b>

Assim como no 1º Cenário, o consumo de água foi calculado apenas a partir da quantidade de água em litros exigida pelo traço de cada concreto. Os valores de fluxos de água na produção dos concretos são apresentados na tabela 6.32.

Tabela 6.32: Fluxos de água na produção dos concretos – 2º Cenário

Concretos	Consumo de água (litros por m <sup>3</sup> de concreto)
A	184,5
B	160,7
C	208,65

#### 6.4.3 Inventário 2º Cenário – Região de estudo 3

A Região de Estudo 3 engloba as atividades na siderúrgica, onde é produzido o aço para a armadura das vigas. Os fluxos desta região no 2º cenário são iguais ao do 1º cenário, que já foi apresentado neste trabalho.

Os fluxos desta região de estudo foram calculados a partir de índices retirados de Grigoletti e Sattler (2004), que são: **1,4kg NO<sub>x</sub>/t**, **6,1kg CO<sub>2</sub>/t**, **15,6kg CO/t**, **3,3kg SO<sub>x</sub>/t** e **18kg material particulado/t (MP/t)**. Os resultados estão apresentados na tabela 6.33.

Tabela 6.33: Total de fluxos na Região de Estudo 3 – 2º Cenário

Fluxos	g/ m <sup>3</sup> de concreto
NO <sub>x</sub>	119,70
CO <sub>2</sub>	521,55
CO	1333,80
SO <sub>x</sub>	282,15
MP	1539,00

#### 6.4.4 Inventário 2º Cenário – Região de estudo 4

A região de estudo 4 consiste no local onde a viga foi construída. Nesta região considerou-se o transporte da madeira para as fôrmas, do aço para a armadura e o do concreto até o local. Como a quantidade de concreto capaz de ser transportado por um caminhão betoneira é igual, independentemente do tipo de concreto, os fluxos são similares.

Os fluxos da região 4 são iguais nos dois cenários estudados, onde foram utilizados os mesmos índices descritos anteriormente para o transporte dos materiais, inclusive a majoração em 20% no consumo de combustível do caminhão betoneira. Na tabela 6.34 estão apresentados os fluxos na região 4 do 2º cenário estudado.

Tabela 6.34: Total de fluxos na Região de estudo 4 – 2º Cenário

Vigas	Distância (km)	Massa (kg)	Energia consumida (MJ/m <sup>3</sup> )	Emissões do concreto (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Madeira	80,00	299,43	18,684	1382,616
Ferro	39,20	85,50	2,614	193,436
Concreto	14,40	2455,7	33,099 (1,2 * 0,00078 * 2455,7 * 14,40)	2449,326
<b>Total</b>				<b>4025,378</b>

#### 6.4.5 Inventário Final do 2º Cenário

Somando os fluxos em todas as regiões de estudo, que compreendem as várias etapas do ciclo de vida analisado, chegou-se ao inventário total mostrado na tabela 6.35.

Tabela 6.35: Inventário final do 2° Cenário

Viga	Fluxo	Região de estudo 1	Região de estudo 2	Região de estudo 3	Região de estudo 4	Total
A	NO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	489,294	-	119,700	-	608,994
	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>3</sup> )	225.978,709	16676,866	521,550	4.025,378	247.202,503
	CO (g/m <sup>3</sup> )	-	-	1333,800	-	1.333,800
	SO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	80,442	-	282,150	-	362,592
	MP (g/m <sup>3</sup> )	52,767	-	1539,000	-	1.591,767
	Água (L/m <sup>3</sup> )	-	184,5	-	-	184,500
B	NO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	608,634	-	119,700	-	728,334
	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>3</sup> )	281.095,468	18.624,917	521,550	4.025,378	304.267,313
	CO (g/m <sup>3</sup> )	-	-	1333,800	-	1.333,800
	SO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	100,062	-	282,150	-	382,212
	MP (g/m <sup>3</sup> )	65,637	-	1539,000	-	1.604,637
	Água (L/m <sup>3</sup> )	-	160,7	-	-	160,7
C	NO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	425,646	-	119,700	-	545,346
	CO <sub>2</sub> (g/m <sup>3</sup> )	208.831,274	16.986,015	521,550	4.025,378	230.364,217
	CO (g/m <sup>3</sup> )	-	-	1333,800	-	1.333,800
	SO <sub>x</sub> (g/m <sup>3</sup> )	69,978	-	282,150	-	352,128
	MP (g/m <sup>3</sup> )	45,903	-	1539,000	-	1.584,903
	Água (L/m <sup>3</sup> )	-	208,65	-	-	208,65

O inventário dos fluxos da produção do cimento (Região de estudo 1) foi desenvolvido na unidade gramas / kg de cimento. Com isso, foi necessário fazer o produto entre os resultados apresentados na tabela 6.28 e a quantidade utilizada de cimento em cada tipo de concreto (vide tabela 6.1).

O 1° e 2° cenários se diferenciam apenas nos fluxos relativos ao transporte nas regiões 1 e 2, causando diferenças nos totais de CO<sub>2</sub>. Como pode ser visto na tabela 6.6, o único impacto ambiental que utiliza o CO<sub>2</sub> nos cálculos é o aquecimento global, desta forma foi necessário apenas calcular para o 2° cenário o potencial ao aquecimento global, que pode ser visto no item 6.5.

## 6.5 ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NO 2° CENÁRIO

Da mesma forma que no 1° cenário estudado, aqui foi avaliado o impacto ambiental aquecimento global a partir de fatores potenciais de equivalência.

### 6.5.1 Impacto Ambiental Global

A seguir está a análise do efeito do aquecimento global a partir do lançamento de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

### Contribuição ao Aquecimento global

Realizando a equivalência entre os impactos ambientais de ambos, é possível determinar o Potencial de Aquecimento Global, ou GWP (sigla em inglês), em gramas de dióxido de carbono por unidade funcional.

A equivalência entre os fluxos foi retirada de Carvalho (2002), sendo adotados os valores mostrados na tabela 6.36. A equação 4, apresentada a seguir, é utilizada para calcular o GWP total, conforme os dados apresentados a seguir.

$$GWP_{total} = \sum_i w_i \times GWP_i \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:  $w_i$  = massa dos aspectos ambientais determinados no inventário

$GWP_i$  = fator de equivalência dos aspectos ambientais

Tabela 6.36: Fator de equivalência para aquecimento global

Fluxo do inventário $i$	$GWP_i$
Dióxido de carbono	1
Óxidos de nitrogênio	320

Considerando estes dados, a tabela 6.37 apresenta o potencial de contribuição ao aquecimento global derivado da emissão de gases de efeito estufa, de cada uma das três vigas analisadas neste trabalho, sendo adotada a unidade padronizada de gramas de CO<sub>2</sub> por unidade funcional.

Tabela 6.37: Potencial de aquecimento global das vigas – 2º Cenário

Viga	CO <sub>2</sub> (GWP)	NO <sub>x</sub> (GWP)	GWP total (gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
A	247.202,503	194.878,08	442.080,583
B	304.267,313	233.066,88	537.334,193
C	230.364,217	174.510,72	404.874,937

A partir dos resultados da tabela 6.37 foi desenvolvido um gráfico comparativo do potencial de aquecimento global para cada viga, em função de seu consumo de cimento, como mostrado na figura 6.8. Verifica-se que, existe uma tendência a um comportamento linear, que pode ser modelado adequadamente através de uma regressão, como indicado na figura.

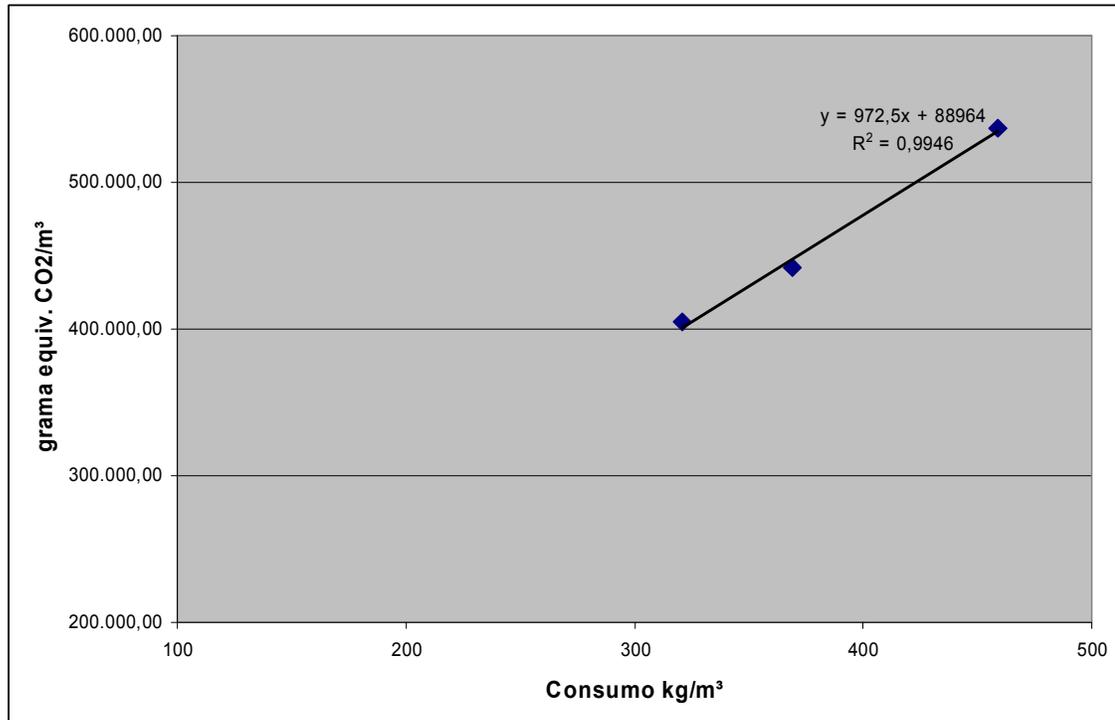


Figura 6.8: Variação de emissão de CO<sub>2</sub> de cada viga em função de seu consumo de cimento.

Na figura 6.9 pode-se observar, percentualmente, de que região de estudo se originam os impactos ambientais relativos ao aquecimento global da viga A. Consta-se que os fluxos associados ao transporte de materiais (regiões de estudo 2 e 4), somam somente 5% das emissões, sendo bem inferiores aos fluxos das regiões 1 e 3, relativas à produção de cimento e aço, respectivamente.

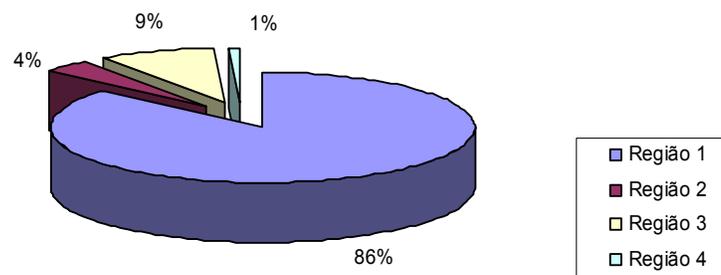


Figura 6.9: Distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo.

Para efeitos de comparação, se considerarmos que a madeira utilizada nas formas vem da região norte, percorrendo 2000 km de caminhão, os custos já se alteram significativamente, com a parcela referente à região de estudo 4 subindo de 1 para 8%, como se vê na figura 6.10, e os impactos em termos de emissões derivadas de transporte de materiais subindo para 12%.

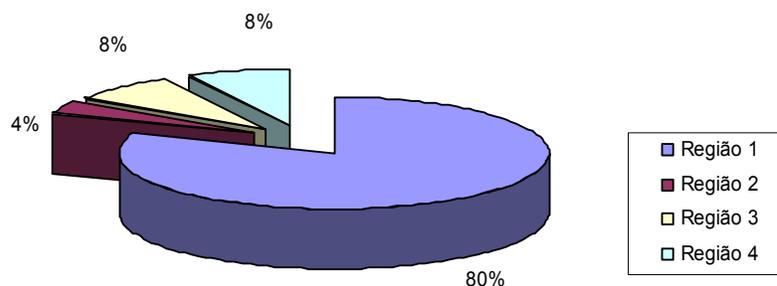


Figura 6.10: Distribuição do impacto de emissão de gases de aquecimento global nas regiões de estudo considerando transporte de madeira por 2.000 km.

Como já foi dito anteriormente os outros impactos referentes ao 2º cenário possuem os mesmos valores do 1º cenário, devido a isto não foram calculados neste item.

## 6.6 INTERPRETAÇÃO

Neste capítulo efetuou-se uma análise de ciclo de vida de três tipos de vigas de concreto armado a serem construídas na cidade de Porto Alegre. Cada uma possui um tipo diferente de concreto, ou seja, os materiais utilizados nos concretos são os mesmos, mas os traços são diferentes. Com isto, as quantidades necessárias de materiais em cada viga são diferentes, resultando em inventários também diferentes.

A partir destes quantitativos e considerando alguns modelos e dados de emissão de poluentes associados à produção e transportes de materiais de construção civil, se determinaram os impactos potenciais, em termos de liberação de gases com efeito estufa, acidificação, consumo de água, nutrição e poluição do ar.

Com os gráficos gerados é possível verificar algumas tendências de comportamento. A produção de cimento e aço gera mais impactos que o transporte, para distâncias pequenas. Quando as distâncias se incrementam, o impacto relativo ao transporte começa a ser mais considerável.

No gráfico da figura 6.11 é feita uma comparação entre potencial de aquecimento global das três vigas nos dois cenários estudados. É possível observar que no 2º cenário os concretos apresentam maior impacto ao aquecimento global causado pela maior distância de transporte no ciclo de vida do cimento.

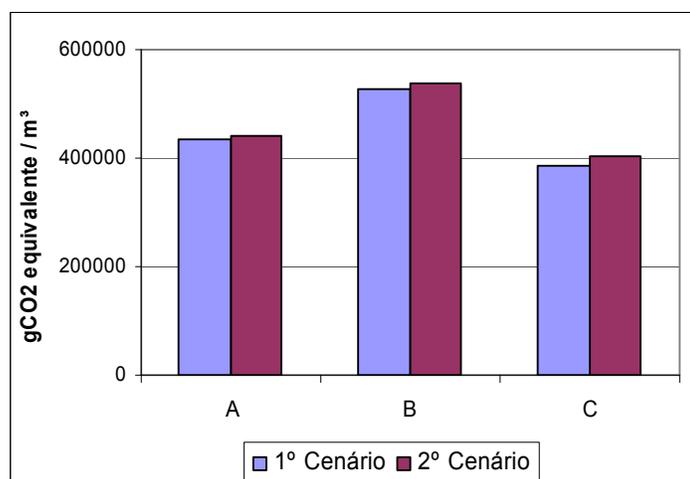


Figura 6.11: Gráfico do potencial de aquecimento global dos dois cenários estudados

A produção de cimento é a principal atividade geradora de impactos dentro do ciclo de produção do concreto. A maioria dos impactos está diretamente associada ao conteúdo de cimento. Como demonstrado no capítulo anterior, os impactos estão diretamente associados à produção de clínquer. Desta forma, as políticas de redução de cimento ou uso de cimentos com altos teores de adição, defendidas por vários pesquisadores, são plenamente justificadas.

De todos os impactos analisados, apenas no consumo de água a viga com maior conteúdo de cimento não se mostrou potencialmente mais impactante que as demais. Neste caso, todavia, a análise apresenta sérias limitações, pois só considera a quantidade de água para mistura.

O gráfico da figura 6.12 apresenta as quantidades de materiais utilizados nos concretos das vigas A, B e C, em kg por unidade funcional (vide tabela 6.1). No mesmo gráfico foi colocado

o potencial de aquecimento global encontrado na ACV em gramas de CO<sub>2</sub> por unidade funcional encontrado no 1º cenário estudado.

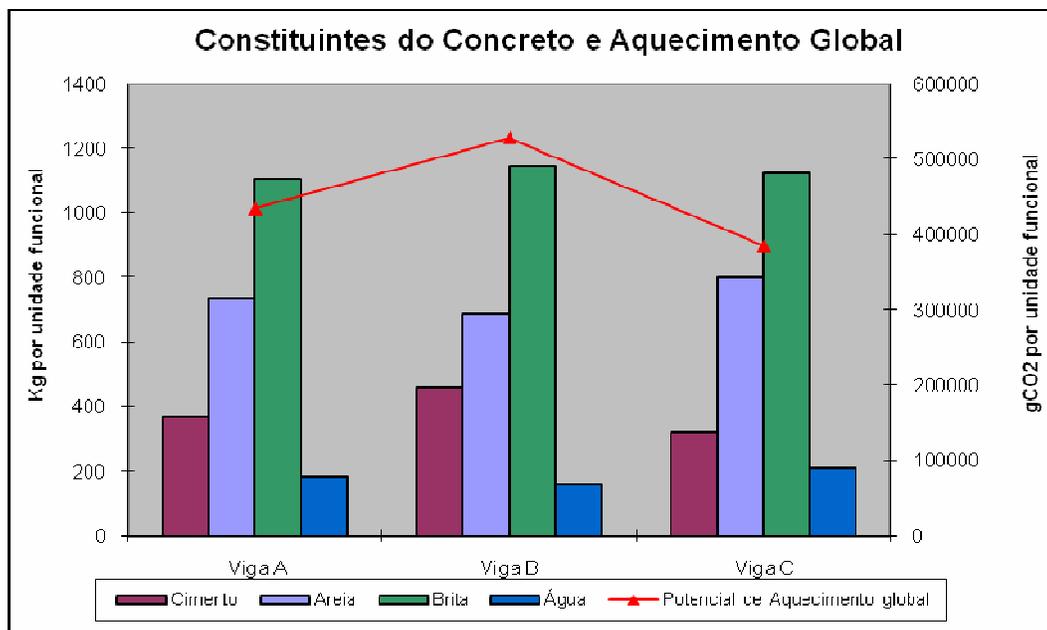


Figura 6.12: Gráfico constituintes do concreto e o aquecimento global.

No gráfico da figura 6.12 nota-se que a viga B, que possui maior quantidade de cimento, é a que possui o maior potencial de aquecimento global. O fluxo mais representativo no fenômeno do aquecimento global é o CO<sub>2</sub>, encontrado em todas as 5 regiões do estudo, mas encontrado em maior quantidade durante a produção do cimento (região de estudo 1). Isto mostra que o clínquer, principal material que forma o cimento, contribui significativamente ao aquecimento global e é muito representativo dentro de uma ACV de estruturas de concreto.

O gráfico da figura 6.13 foi desenvolvido entre os materiais que constituem os concretos das vigas e o potencial de acidificação encontrado na ACV. Observa-se que a viga B apresentou o maior potencial de acidificação. Esta é a viga que possui maior quantidade de cimento e menor quantidade de areia. No ciclo de vida analisando o transporte de agregados possui emissões de óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre. Estes fluxos são utilizados no cálculo do potencial de acidificação. Mas, este fato não influenciou muito nos resultados, visto que a quantidade de agregado graúdo (brita) tem uma pequena variação entre as vigas (40,5 kg/unid. funcional entre as vigas B e C). A viga C, que possui maior quantidade de agregados e menor porcentagem de cimento, obteve menor potencial de acidificação, mostrando que vale a pena trocar pasta por agregados.

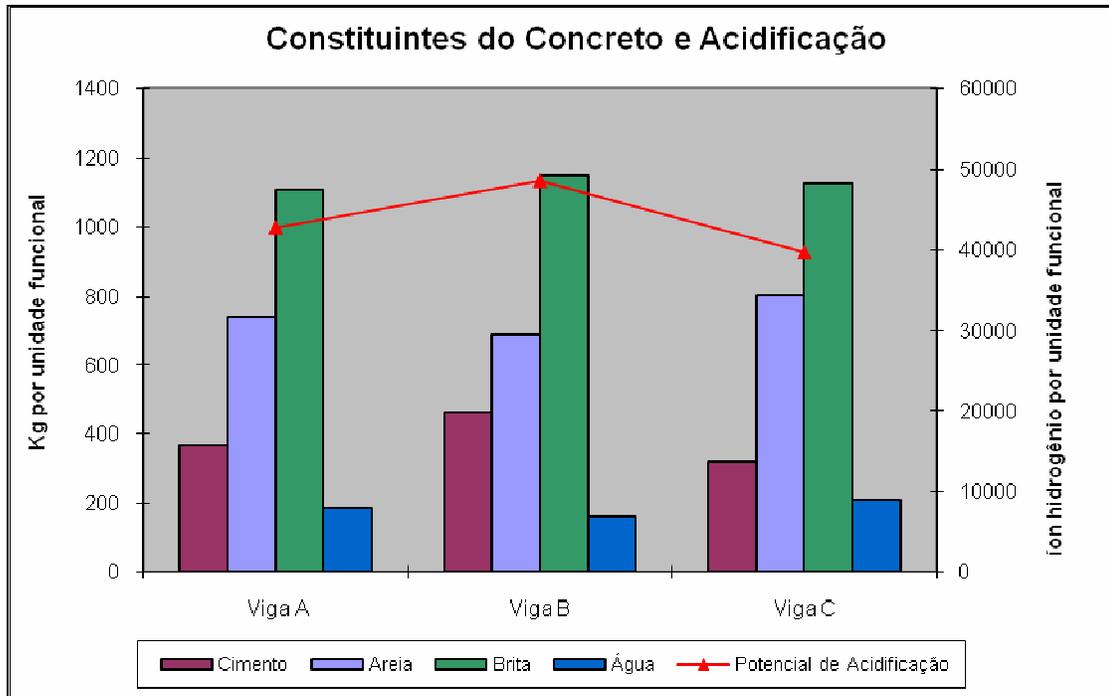


Figura 6.13: Gráfico constituintes do concreto e acidificação.

Durante os ciclos de vida das vigas A, B e C, só foi encontrado consumo de água durante a etapa de produção do concreto na concreteira, que corresponde à quantidade de água utilizada na mistura do concreto. Com isso, como pode ser visto na figura 6.14, a viga B obteve melhor desempenho ao consumo de água.

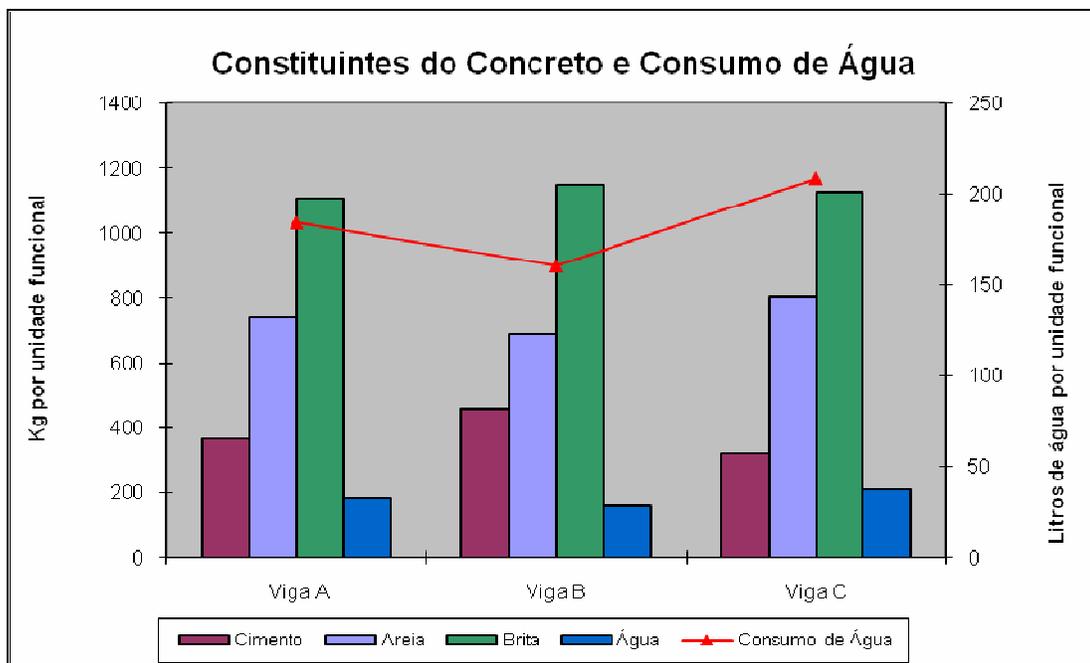


Figura 6.14: Gráfico constituintes do concreto e consumo de água.

Na figura 6.15 pode-se ver o gráfico comparativo entre os constituintes do concreto e o impacto de nutrição.

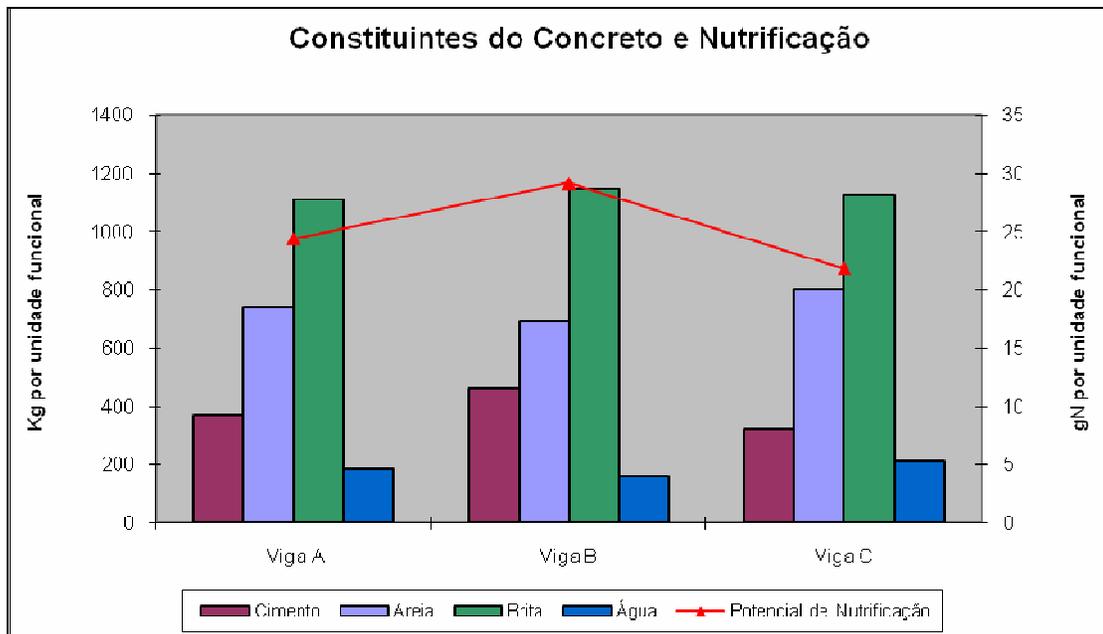


Figura 6.15: Gráfico constituintes do concreto e nutrição.

Na ACV realizada neste trabalho o fluxo  $\text{NO}_x$ , único utilizado para o cálculo do potencial de nutrição, foi encontrado nas regiões de estudo 1 e 3, sendo que na região de estudo 3 todas as vigas tiveram fluxos de  $\text{NO}_x$  na mesma quantidade. Com isso, as emissões responsáveis pela nutrição estão na produção do cimento.

O gráfico da figura 6.16 foi desenvolvido entre os materiais que constituem os concretos das vigas e o potencial de poluição do ar encontrado na ACV.

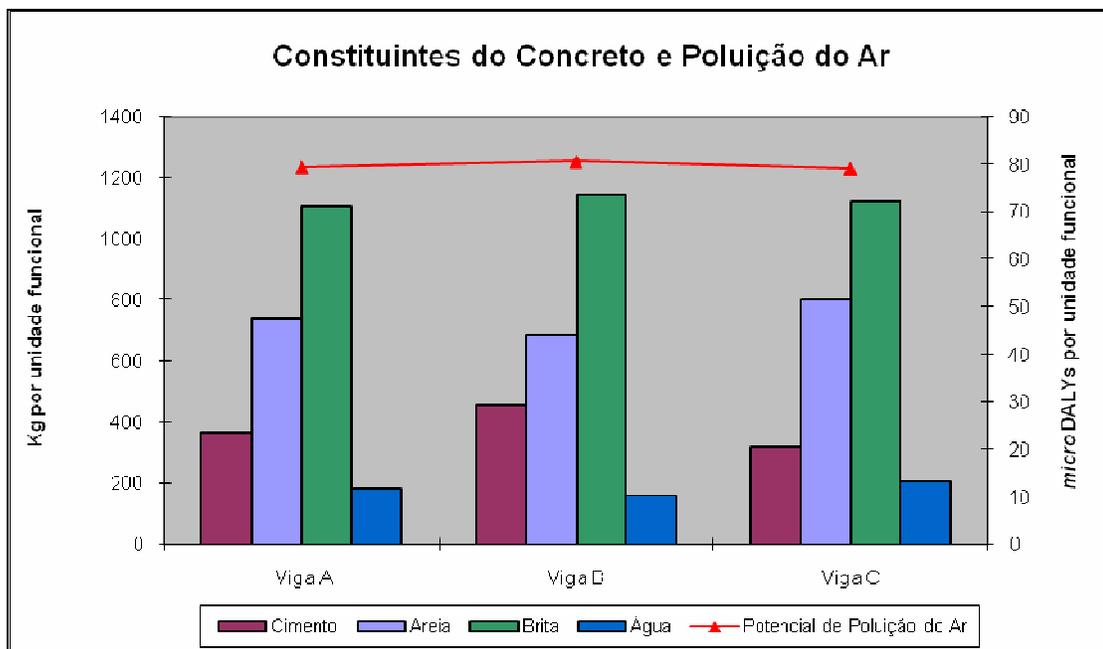


Figura 6.16: Gráfico constituintes do concreto e Poluição do Ar.

A viga B apresentou maior potencial de poluição do ar, mas pequeno em relação às outras duas vigas, visto que é feita com o concreto com maior quantidade de cimento por unidade funcional. Os fluxos que contribuem para este impacto são os óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e o Material Particulado, presentes nas regiões de estudo 1 e 3.

Os fluxos da região de estudo 3 são iguais para todas as vigas, com isso apenas a região de estudo 1, que corresponde à produção do cimento pode influenciar na diferença entre os resultados na análise do potencial de poluição do ar.

## **7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL COM O BEES 3.0**

Este capítulo é sobre a avaliação ambiental de uma viga de concreto armado utilizando como ferramenta o software BEES 3.0. Esta fase da pesquisa tem como objetivo gerar dados com o software que possam ser comparados, de forma qualitativa, com os dados de desempenho ambiental que foram gerados a partir da ACV de vigas de concreto (vide capítulo 6).

### **7.1 SELEÇÃO DE PARÂMETROS E ALTERNATIVAS**

Seguindo os passos de utilização do BEES 3.0, apresentados no terceiro capítulo deste trabalho, foram realizadas as etapas descritas nos itens 7.1.1 a 7.1.3:

#### **7.1.1 Seleção de Parâmetros de Cálculo**

Tendo em vista que o foco desta etapa do trabalho está centrado nas questões relacionadas ao desempenho ambiental de vigas de concreto, foi definido um peso relativo de 100% para desempenho ambiental e 0% para o desempenho econômico. Não será analisado o desempenho ambiental total das vigas, portanto a escolha de uma categoria de pesos não interfere nos resultados a serem gerados.

#### **7.1.2 Escolha de Alternativas**

Como dito anteriormente o elemento escolhido foi vigas de concreto, e para isto foram selecionados o grande grupo envoltória (shell), o grupo superestrutura e o elemento vigas. Escolhido o elemento, o software apresenta os 30 tipos de concretos para vigas que podem ser selecionados e comparados.

Neste caso o software não foi utilizado para comparar as alternativas, mas somente para avaliar o desempenho ambiental de um único tipo de viga de concreto. Para esta situação, apenas uma alternativa foi escolhida.

O tipo de concreto da viga foi selecionado, dentro das opções disponíveis no BEES 3.0, de forma que os dados fossem melhor comparáveis graficamente com aqueles gerados na análise do ciclo de vida. Para isto partiu-se dos seguintes pressupostos:

1. O tipo de cimento utilizado na viga deve ser semelhante ao CP IV-32 Votoran utilizado na análise do ciclo de vida, que possui 29% de cinza volante.
2. A resistência do concreto escolhido para as vigas deve ser semelhante à dos concretos normalmente utilizados no Brasil.
3. A distância entre a manufatura e a utilização do concreto deve ser semelhante à utilizada na análise do ciclo de vida entre a concreteira (região de estudo 2) e a obra (região de estudo 4).

Com isso, a alternativa escolhida foi o concreto com cimento portland com 20% de cinza volante e resistência 4Ksi ou 27,58 Mpa. Entre as três opções disponíveis no software, para distâncias entre a manufatura e a utilização do concreto, a que mais se aproxima da distância de 14,4 km utilizada na análise do ciclo de vida e a de 20 milhas ou 32km.

### 7.1.3 Escolha de Categorias de Impactos Ambientais

As categorias de impactos escolhidas são as mesmas utilizadas na análise do ciclo de vida (capítulo 6), são elas: aquecimento global, acidificação, consumo de água, nutrição e poluição do ar.

Na utilização do programa foram gerados gráficos de desempenho ambiental por fluxos das categorias de impactos citadas anteriormente.

## 7.2 RESULTADOS DO BEES 3.0

Na utilização do BEES para avaliar o desempenho ambiental de uma viga de concreto com um concreto de cimento portland com 20% de cinza volante, fck de 27,58 Mpa e distância entre a manufatura e a utilização de 32 km, foram encontrados os resultados que podem ser vistos na tabela 7.1.

Tabela 7.1: Potenciais de poluição pelo BEES 3.0

Impacto Ambiental	Total	unidade
Aquecimento global	244,411 x 10 <sup>3</sup>	gCO <sub>2</sub> /unid.
Acidificação	76,749 x 10 <sup>3</sup>	H/unid.
Consumo de água	1686,04	Litros/ unid.
Nutrição	65,37	gN/unid.
Poluição do ar	323,462	microDALYs/ unid.

Como o objetivo deste capítulo não é de comparar resultados, mas somente gerar dados para serem utilizados na etapa de conclusões, os resultados não foram apresentados em gráficos, como é feito pelo software BEES 3.0.

### 7.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir pode-se ver uma comparação entre os resultados do desempenho ambiental da “Viga C”, feitos com o método da ACV no 1º cenário, e os resultados da avaliação ambiental de uma viga semelhante, feita com a ferramenta BEES 3.0.

O gráfico da figura 7.1 apresenta uma comparação entre os resultados da ACV e da ferramenta BEES 3.0 para o impacto aquecimento global, em gramas de CO<sub>2</sub> por unidade funcional.

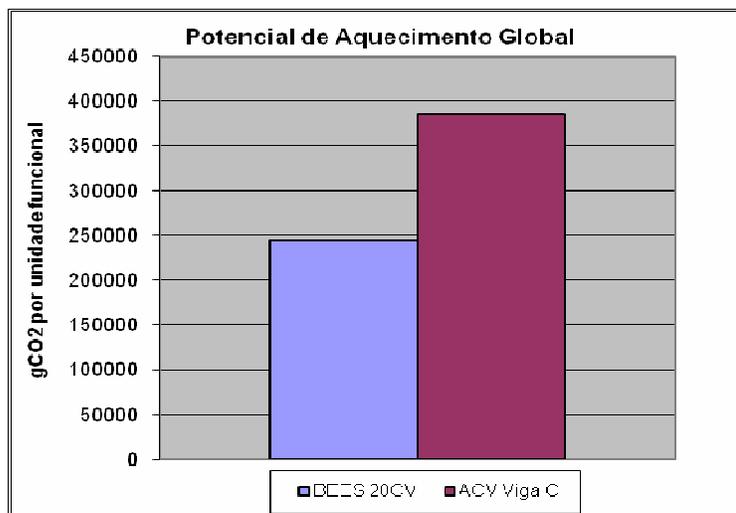


Figura 7.1: Gráfico Comparação do Potencial de Aquecimento Global.

Como pode ser visto no gráfico da figura 7.1 o potencial de aquecimento global encontrado no BEES foi inferior ao total encontrado na ACV. Ou seja, os fluxos encontrados durante a análise do ciclo de vida da viga C resultaram em um potencial de aquecimento global superior ao calculado pelo software (36,6%).

Isto pode ter ocorrido devido à diferença tecnológica entre as fábricas de cimento dos Estados Unidos e as fábricas brasileiras. Já que o BEES foi desenvolvido com dados norte americanos e a ACV realizada neste trabalho baseou-se em referências brasileiras.

Outra justificativa para a diferença nos dois resultados é a delimitação das fronteiras utilizadas pelos dois métodos. O BEES analisa apenas os impactos relacionados ao concreto e os seus insumos, enquanto a ACV englobou ainda a produção e transporte do ferro das armaduras e transporte da madeira para as fôrmas. Com isso, é possível afirmar que a análise do ciclo de vida realizada neste trabalho foi mais abrangente sobre o impacto aquecimento global.

O gráfico da figura 7.2 apresenta uma comparação do potencial de acidificação encontrado na ferramenta BEES e na ACV.

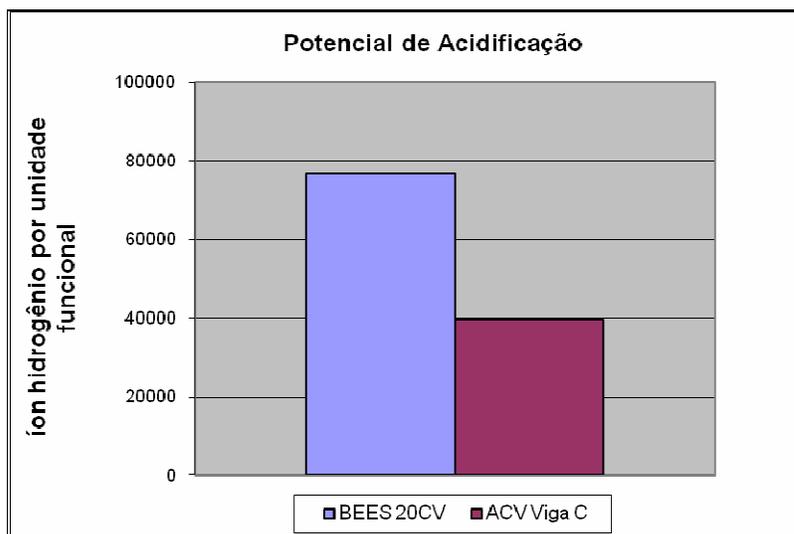


Figura 7.2: Gráfico Comparação do Potencial de Acidificação.

A partir da análise gráfica dos resultados de potencial de acidificação, nota-se que o BEES chegou a um potencial de acidificação superior ao calculado pela ACV (48,25%). Isto ocorreu devido a falta de dados que possibilitem calcular os fluxos existentes no ciclo de vida de uma viga de concreto armado, enquanto o BEES 3.0 calcula oito fluxos que causam acidificação na ACV deste trabalho foi possível calcular apenas os fluxos óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ).

Com relação ao potencial de consumo de água o modelo BEES calculou uma quantidade bem superior ao calculado na ACV, como pode ser visto na figura 7.3. Para calcular o potencial de consumo de água o BEES utiliza os valores de quantidade de litros por unidade funcional disponível no TRACI, desenvolvido pelo Escritório de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA).

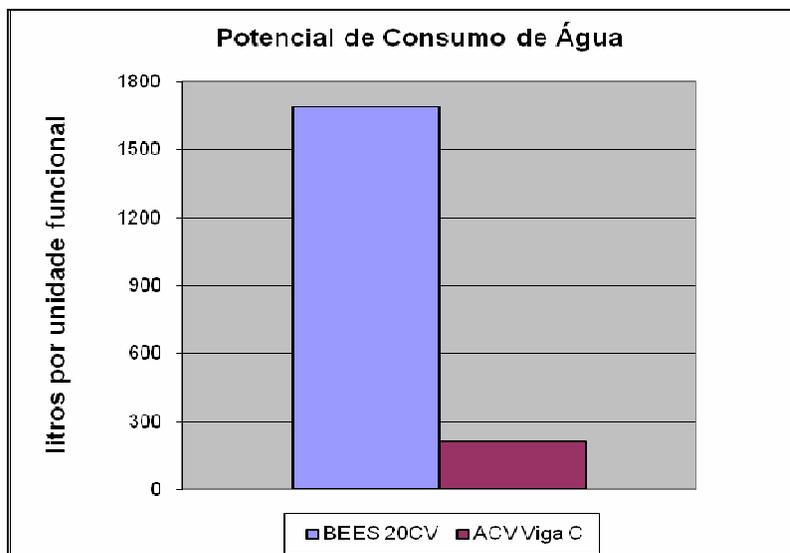


Figura 7.3: Gráfico Comparação do Potencial de Consumo de Água.

Na ACV desenvolvida neste trabalho o consumo de água foi calculado apenas para o momento da mistura do concreto, sendo desconsiderado, por falta de dados, qualquer outro consumo ou impactos causados aos recursos hídricos.

Para o cálculo do potencial de nutrição (eutrofização) o BEES 3.0 utiliza um total de treze fluxos, enquanto na ACV foi encontrado apenas o fluxo óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) como causador do impacto. A falta de dados para mensurar com maior precisão potencial de nutrição causou uma diferença de 66,6% dos resultados gerados pelo BEES 3.0, isto pode ser visto no gráfico da figura 7.4.

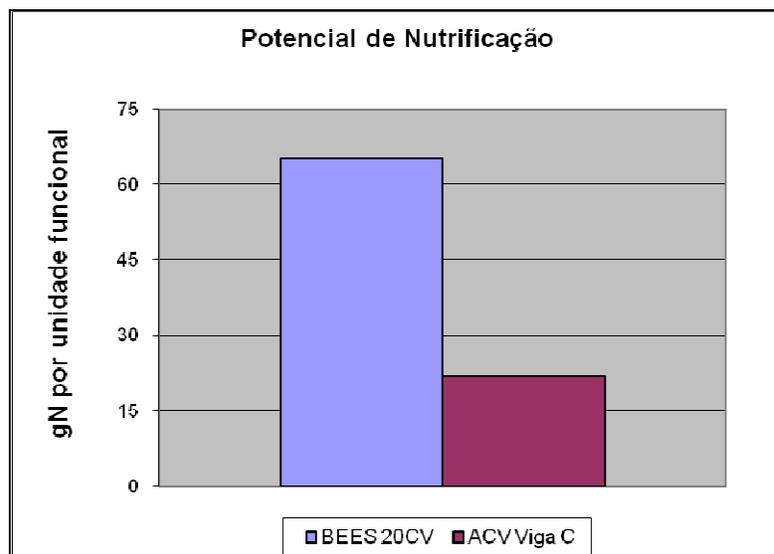


Figura 7.4: Gráfico Comparação do Potencial de Nutrição.

Como já foi dito neste trabalho, o potencial de poluição do ar é calculado em *microDALYs*, a partir dos fluxos de material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). O BEES calcula os materiais particulados dividindo-os em partículas finas, partículas grossas e não-especificadas, enquanto na ACV todas as partículas foram identificadas como não-especificadas devido à falta de dados. Isto deve ter causado distorções, visto que as partículas finas são mais impactantes à saúde humana.

Com isso, houve uma grande diferença entre os resultados calculados pelo BEES e os calculados na ACV, como pode ser visto no gráfico da figura 7.5.

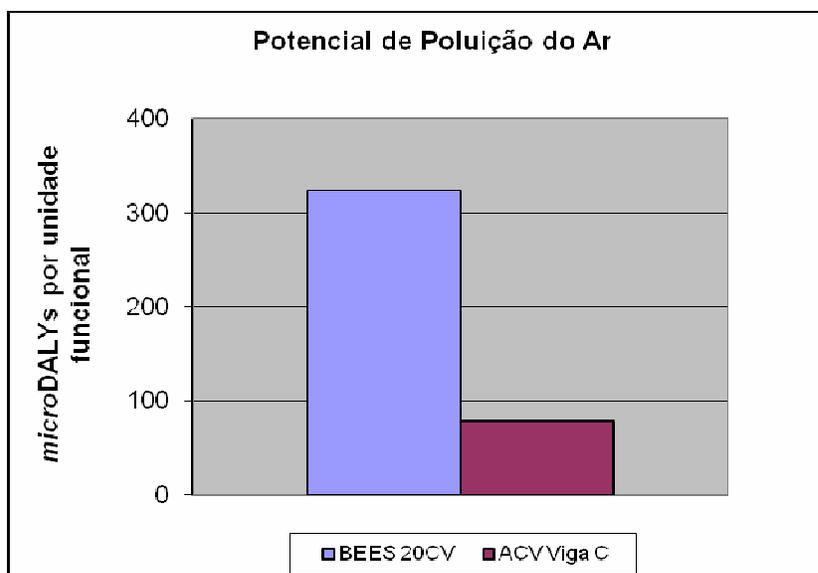


Figura 7.5: Gráfico Comparação do Potencial de Poluição do Ar.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo é subdividido em considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

### 8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira questão a ser abordada diz respeito à situação de degradação atual do planeta, principalmente no que se refere ao fenômeno do aquecimento global. Se não forem tomadas atitudes drásticas a este respeito acontecerão várias alterações climáticas nas próximas décadas, gerando custos incalculáveis principalmente para as próximas gerações. Dentro desta realidade a indústria da construção civil é um dos principais atores, por impactar consideravelmente o meio ambiente e ser muito importante para o desenvolvimento econômico e social de qualquer país.

Outro impacto considerado neste trabalho, que pode trazer conseqüências ambientais e econômicas é o consumo de água. Infelizmente os impactos causados aos recursos hídricos não foram abordados de forma adequada neste trabalho. Mas foi constatado que a utilização de um produto que consume grande quantidade de água e deposita resíduos nos corpos de água durante a sua produção, deve ser visto como inimigo do meio ambiente e da idéia de desenvolvimento sustentável.

A busca por projetos menos impactantes ao meio ambiente deve se tornar uma rotina para os projetistas que pretendem se manter no mercado ou entrar nele. O desenvolvimento de projetos deve se basear também na escolha de produtos cada vez menos agressivos ao meio ambiente. Assim como o desenvolvimento de sistemas de separação e aproveitamento de águas pluvias, geração de energias renováveis e conforto térmico com baixo consumo de energia.

O desenvolvimento e aplicação de produtos de construção menos agressivos ao meio ambiente deve utilizar o método da análise do ciclo de vida para avaliar o desempenho ambiental dos materiais e minimizar os seus impactos. Ferramentas como o BEES são de grande importância dentro deste objetivo, por facilitar o cálculo dos diversos fluxos existentes durante o ciclo de vida dos materiais e convertê-los em uma única unidade.

A maior dificuldade encontrada na aplicação da análise do ciclo de vida no Brasil, de forma que gere resultados confiáveis, é a falta de dados sobre os fluxos existentes durante o ciclo de vida dos produtos. Este problema pode ser resolvido com a exigência, no momento do licenciamento ambiental de indústrias, de informações sobre a geração de resíduos e consumo de materiais na manufatura dos produtos, associado ao desenvolvimento de pesquisas que tenham o objetivo de mensurar os fluxos durante a extração e transporte de materiais.

Neste trabalho foi realizada a ACV de vigas de concreto armado com três tipos diferentes de concreto. Para isto foram utilizados dados nacionais e internacionais disponíveis na bibliografia estudada. Uma análise geral dos resultados obtidos neste trabalho, incluindo o conhecimento adquirido durante o seu desenvolvimento com leitura dos documentos nacionais e internacionais sobre o tema, permite que sejam feitas conclusões e também recomendações para futuros trabalhos.

## 8.2 CONCLUSÕES

Com todas as dificuldades encontradas para analisar o desempenho ambiental de vigas de concreto armado, é possível afirmar que:

- O desenvolvimento e utilização de traços de concreto que utilizem cada vez menos cimento na sua constituição pode contribuir decisivamente para diminuir o impacto ambiental causado pela construção de estruturas de concreto armado;
- o mesmo também pode ser alcançado com a substituição parcial do clínquer, presente nos cimentos, por resíduos como a cinza volante e escória de alto-forno;
- a redução de distâncias de transporte de materiais é outro fator fundamental para diminuir a “pegada ecológica” da construção civil;
- o BEES 3.0 é uma ferramenta com uma metodologia muito bem fundamentada, mas que utiliza um banco de dados com informações de produtos fabricados e utilizados em um país com características muito diferentes do Brasil. Devido a isto seus resultados não podem ser considerados como confiáveis, devendo ser

usados, preferencialmente, de forma comparativa, até que se desenvolva uma base de conhecimento mais amplas com dados nacionais;

- além dos impactos em termos de emissão de CO<sub>2</sub>, é fundamental iniciar levantamentos sobre outros impactos importantes associados a produção de concreto, como a emissão de particulados e substâncias tóxicas, além do consumo de água, buscando verificar se as hipóteses subjacentes ao BEES são válidas para a realidade brasileira e orientando a tomada de decisões para quantificar e minorar estes impactos;
- alterações nos transportes podem alterar significativamente o potencial de impacto de produtos e a ACV pode ser uma ferramenta importante no auxílio da tomada de decisão;
- é premente a realização de mais pesquisas na área de avaliação de impactos ambientais de atividades de construção civil.

### 8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com todas as limitações encontradas nesta pesquisa, apresentadas no decorrer do trabalho, indicam que o tema ainda se encontra em fase inicial de investigação no contexto nacional. A partir das limitações encontradas são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros sobre desempenho ambiental de estruturas de concreto:

- desenvolver e aprimorar índices de fluxos de recursos consumidos e resíduos gerados, na extração de recursos naturais para a fabricação de cimentos, na fabricação de aço e na extração e beneficiamento de madeira para fôrmas;
- desenvolver índices nacionais de fluxos, de consumo de combustíveis e geração de resíduos aéreos, para o transporte dos diferentes materiais existentes no ciclo de vida de uma estrutura de concreto armado;
- estabelecer uma unidade funcional entre diferentes tipos de concretos para vigas, considerando a relação entre a resistência à compressão do concreto e a armadura necessária;

estender este trabalho para os outros elementos das estruturas de concreto armado, ou seja, pilares e lajes.

## BIBLIOGRAFIA

ALLEN, D. T. LCA Overview. 2001. Disponível em: <<http://www.utexas.edu/research/ceer/dfe>> Acesso em 10 de março de 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Boletim Técnico - Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo. 2002. 28p. (BT 106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14.040**. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 7480**. Barras e Fios de Aço Destinados a Armaduras de Concreto. Rio de Janeiro, 1996.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Importância do Setor de Construção Civil na Economia Brasileira**. 2000. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br>> . Acesso em: 10 de outubro de 2007.

CARVALHO, J. **Análise de ciclo de Vida ambiental aplicada a construção civil – Estudo de caso: Comparação entre Cimentos Portland com adição de resíduos**. 2002. 102 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ERLANDSSON, M; BORG, M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practice and development needs. **Building and Environment**. v. 38. n.7. p. 919-938. Julho 2003.

GONDIM, I. A. et al. **Análise da Economia Nacional e a Participação da Indústria da Construção Civil**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo, SP. Disponível em <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 10 de outubro de 2007.

GOOGLE. **Google Maps**. Disponível em: <<http://maps.google.com/>> Acesso em: 10 de outubro de 2007.

GRIGOLETTI, G. C.; SATTler, M. A.. Aplicação da ferramenta BEES 3.0 na avaliação de impactos ambientais da produção de aço no RS. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3., 2003, São Carlos, SP. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>> acesso em: 09 de março de 2006.

Hawkins, D. G.; Lashof, D. L.; Williams, R. H.. Que fazer com o carvão? **Cientific american Brasil**, ano 5, n.53, p. 38-45, out. 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 14040**: Environmental management: life cycle assessment: Principles and framework. Genebra. 1997.

\_\_\_\_\_. **ISO 14041**: Environmental management: life cycle assessment: goal and scope definition and inventory analysis. Genebra,1998.

\_\_\_\_\_. **ISO 14042**: Environmental management: life cycle assessment: life cycle impact assessment. Genebra, 1999a.

\_\_\_\_\_. **ISO 14043**: Environmental management: life cycle assessment: life cycle interpretation. Genebra, 1999b.

\_\_\_\_\_. **ISO 14047**: Environmental management: life cycle assessment: Examples of application of ISO 14042. Genebra, 2003.

\_\_\_\_\_. **ISO 14048**: Environmental management: life cycle assessment: Data documentation format. Genebra, 2002.

\_\_\_\_\_. **ISO 14049**: Environmental management: life cycle assessment: Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis. Genebra, 2000.

\_\_\_\_\_. **ISO 14064-1**: Greenhouse gases - Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals, 2006.

\_\_\_\_\_. **ISO 14064-2**: Greenhouse gases - Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements, 2006.

\_\_\_\_\_. **ISO 14064-3**: Greenhouse gases - Part 3: Specification with guidance for the validation and verification of greenhouse gas assertions, 2006.

IPCC, 2007. **Intergovernmental Panel on Climate Change, 4th Assessment –Working Group I, II and III – Report for Policy Makers**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em 01 de outubro de 2007.

JOHN V. M. Reciclagem de Resíduos na Construção Civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

JOHN, V. M.; SILVA, V. G.; AGOPYAN, V.. Agenda 21: Uma Proposta de Discussão para o Construbusiness Brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2., 2001, Canela, RS. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2001, 1CD.

KAEFER, L. F. **A Evolução do Concreto Armado**. São Paulo. 1998. Disponível em: <<http://www.lem.ep.usp.br/pef605/HistoriadoConcreto.pdf>> Acesso em: 10 de outubro de 2007.

KRONKA, R. C. Desempenho Ambiental dos Materiais Construtivos Aplicação do Software BEES 2.0. In: ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2., 2001, Canela, RS. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2001, 1CD.

KUHN, E. A.. **Avaliação Ambiental do Protótipo de Habitação de Interesse Social Alvorada**. 2006. 186 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

LIPPIATT, B. C.; AHMAD S.. **Measuring the Life – Cycle Environmental and Economic Performance of Concrete: the Bees Approach**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY, 2004, Beijing, China. Disponível em:

<<http://www.pcccenter.iastate.edu/publications/sustainable/lippiattbees.pdf>> acesso em: 09 de março de 2006.

LIPPIATT, B. C.. **BEES 3.0: Building for Environmental for Economic Sustainability Technical Manual e User Guide**. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology. 204p. 2002. Disponível em: <<http://www.bfrl.nist.gov/oa/publications/nistirs/6916.pdf>> acesso em: 09 de março de 2006.

MALHOTRA, V.M. Sustainability and Global Warming Issues, and Their Impact on Cement and Concrete Technology. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49. 2007, São Paulo.

MEHTA, P. K. Roadmaps for Sustainability of the Concrete Industry- What are the Options? In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49. 2007, São Paulo.

Organização Mundial de Saúde. **Disability adjusted life years (DALY)**. 2007 <<http://www.who.int/healthinfo/boddaly/en/index.html>> Acesso em: 10 de outubro de 2007.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. 189p.

RODRIGUES, E. **Agregados**. 2003. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/dau/profs/edmund/>> Acesso em: 10 de outubro de 2007.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Emprego Formal no Brasil**. 2007. Disponível em: <[http://www.sindusconsp.com.br/downloads/Emp\\_br\\_site.pdf](http://www.sindusconsp.com.br/downloads/Emp_br_site.pdf)>. Acesso em: 10 de outubro de 2007.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. In: SATTTLER, M. A.; PEREIRA, F. O. R. (Org.) **Construção e Meio Ambiente** - Coletânea Habitare. Porto Alegre: Editora Habitare, 2006. p. 96-127.

TRUSTY, W. B. Introducing an Assessment Tool Classification System. Advanced Building Newsletter. Ottawa. n. 25. p. 18. jul. 2000. Disponível em: <<http://www.athenasmi.ca/publications/publications.html>>. Acesso em: 10 abril de 2007.

VALVERDE, F. M. **Agregados para Construção Civil**. 2002. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/agregados.pdf>> Acesso em: 10 de outubro de 2007.

WWF – BRASIL, 2007. **Combatendo as Causas das Mudanças Climáticas**. Disponível em: <<http://www.wwf.org.br>>. Acesso em: 01 de outubro de 2007.