



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

# INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA DO PNEU INSERVÍVEL COMO COMBUSTÍVEL EM FORNOS DE CIMENTEIRAS, SOB A ÓTICA DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Marina Santa Rosa Rocha e Rafael Freitas Funcia Lemme

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Márcio Almeida D'Agosto

Coorientador: Ilton Curty Leal Júnior

Rio de Janeiro

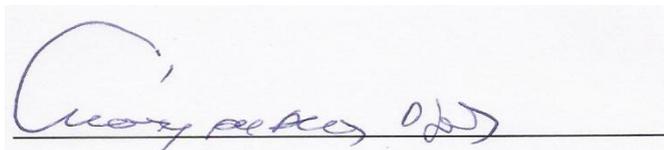
Agosto de 2013

INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA DO PNEU INSERVÍVEL COMO COMBUSTÍVEL EM  
FORNOS DE CIMENTEIRAS, SOB A ÓTICA DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Marina Santa Rosa Rocha e Rafael Freitas Funcia Lemme

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

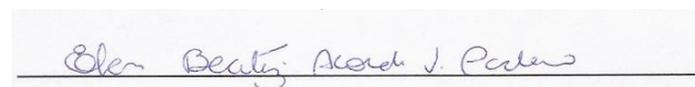
Examinado por:



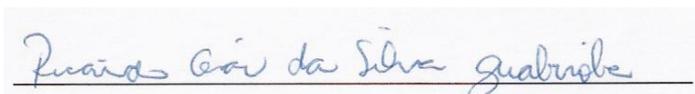
Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D. Sc.



Prof. Ilton Curty Leal Júnior, D. Sc



Profa. Élen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D. Sc.



Ricardo César da Silva Guabiroba, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO de 2013

Rocha, Marina Santa Rosa; Lemme, Rafael Freitas Funcia  
Inventário do Ciclo de Vida do Pneu Inservível como  
Combustível em Fornos de Cimenteiras, sob a Ótica das  
Emissões de CO<sub>2</sub>/ Marina Santa Rosa Rocha e Rafael  
Freitas Funcia Lemme. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola  
Politécnica, 2013.

VIII, 79 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Márcio de Almeida D'Agosto e Ilton Curty  
Leal Júnior

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de  
Engenharia Ambiental, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 72-79.

1. Pneu Inservível. 2. Inventário de Ciclo de Vida. 3.  
Mudanças climáticas. 4. Coprocessamento. I. D'Agosto,  
Márcio de Almeida *et al.* II. Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia  
Ambiental. III. Título.

"Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido,  
mas aquele que vai acompanhado com certeza vai mais longe."  
(Clarice Lispector)

Nossos sinceros agradecimentos,

Aos Professores Márcio D'Agosto e Ilton Curty, por todo conhecimento transmitido, pela paciência em nos auxiliar e pelas incontáveis contribuições a este trabalho. Foi uma alegria e uma honra termos sido orientados por vocês.

A todos os pesquisadores do LTC, que nos acolheram no laboratório e buscaram nos ajudar sempre que possível. Em especial, agradecemos à Yuka Akasaka, que tanto nos ajudou permitindo o contato com a Lafarge Brasil S.A. e contribuindo imensamente para a execução e evolução do trabalho, e ao Vito Longhi, que com muita paciência e atenção nos transmitiu conhecimentos valiosos sobre a dinâmica do transporte marítimo e nos possibilitou a obtenção de dados junto à Vale S.A.

À Mariana Lazarini e ao Roberto Mendes, que muito enriqueceram este trabalho, dedicando parte do seu tempo para transmitir conhecimentos inestimáveis sobre a logística do coque de petróleo e sobre o coprocessamento, respectivamente, possibilitando a execução do estudo de caso proposto.

Aos caminhoneiros Odair José da Silva e Eduardo Ferreira Mendes, que em 30 minutos nos ensinaram muito mais do que poderíamos aprender em 30 horas de pesquisa bibliográfica, com ricos conhecimentos sobre a logística rodoviária.

Ao Celso Lemme, pela incansável disponibilidade em nos ajudar a construir um trabalho melhor, contribuindo imensamente para elaboração do texto e para o nosso crescimento profissional.

Às nossas famílias, em especial aos nossos pais, pela paciência durante esses meses e por toda dedicação ao longo dos anos para que realizássemos nossos sonhos e alcançássemos nossos objetivos. Este trabalho representa mais um objetivo que alcançamos e o dedicamos a vocês.

À Camila, minha namorada, que além do papel de amiga aguentou junto comigo os meses de falta de tempo e atenção, com paciência e compreensão quase infinitas de uma companheira perfeita, sendo um grande legado que a UFRJ me deixou (Rafael). Ao Alan, que me apoio durante todo esse período, aguentou meus surtos de estresse repentinos e me impulsionou a sempre ir mais longe e dar o melhor de mim (Marina).

A toda a galera maneira do B.D.: Ágatha, Bel, Bia, Camila, Diego, Fê, Friba, Isa, Juan, Lulu, Mini, Nanda, Paulo, Peixoto, Rodrigo Niterói e Zero, que fizeram nossos anos de faculdade os melhores de nossas vidas.

A todos que de alguma forma contribuíram para que chegássemos até aqui, nosso muito obrigado!

Resumo de Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Inventário de Ciclo de Vida do Pneu Inservível como Combustível em Fornos de Cimenteiras, sob a Ótica das Emissões de CO<sub>2</sub>.

Marina Santa Rosa Rocha e Rafael Freitas Funcia Lemme

Agosto/2013

Orientadores: Márcio Almeida D'Agosto e Ilton Curty Leal Júnior

Curso: Engenharia Ambiental

A geração de pneus inservíveis vem crescendo no mundo, necessitando de uma adequada disposição final por representar sérios riscos ao meio ambiente. Neste sentido, o coprocessamento de pneus inservíveis em fornos de clínquer de cimenteiras apresenta-se como uma forma de disposição relevante. Um dos principais impactos ambientais da atualidade está atrelado ao aumento da concentração de gases do efeito estufa, o que contribui para o aquecimento global. Tendo isto em vista, realizou-se neste projeto de graduação um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) das emissões de CO<sub>2</sub> do pneu inservível, considerando sua disposição final como combustível para os fornos de cimenteiras. Para proceder com a análise, foi necessário mapear também a cadeia do coque de petróleo, já que este é o combustível atualmente utilizado nos fornos de cimenteiras. Estas cadeias foram baseadas no estudo de caso da unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A., localizada no estado do Rio de Janeiro. Os resultados encontrados apontaram para uma vantagem competitiva do pneu inservível se comparado ao coque de petróleo.

*Palavras-chave:* pneu inservível; Inventário de Ciclo de Vida; mudanças climáticas; coprocessamento.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

LIFE CYCLE INVENTORY OF WASTE TYRE AS A FUEL ON CEMENT KILNS UNDER  
CO<sub>2</sub> EMISSIONS PERSPECTIVE

Marina Santa Rosa Rocha e Rafael Freitas Funcia Lemme

August/2013

Advisors: Márcio Almeida D'Agosto e Ilton Curty Leal Júnior

Course: Environmental Engineering

The generation of waste tyres has been rising in the world, which poses serious risks to the environment and therefore requires an adequate disposal method. In this regard, co-processing of waste tyres in cement kilns presents itself as a relevant disposal method. One of the main current environmental impacts is linked to increasing concentrations of greenhouse gases, which contributes to global warming. With this in mind, in this undergraduate project it was carried out a Life Cycle Inventory (LCI) of waste tyres' CO<sub>2</sub> emissions, considering its final disposal as fuel for cement kilns. In order to proceed with the aforementioned analysis, mapping the petroleum coke chain was necessary as well, as it is currently the fuel used in cement kilns. These chain mappings were based on the case study of the Cantagalo unit of Lafarge Brasil S.A., located in the state of Rio de Janeiro. The results pointed to a competitive advantage of waste tyres compared to petroleum coke.

*Keywords:* waste tyre; Life Cycle Analysis; climate change; co-processing.

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos do Estudo.....	4
1.2. Motivação .....	4
1.3. Delimitação.....	5
1.4. Estrutura do Projeto de Graduação.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Pneu Inservível .....	6
2.2. A Produção de Cimento.....	9
2.3. Coprocessamento em Fornos de Cimenteiras .....	14
2.4. Cadeia Logística Reversa do Pneu.....	18
3. METODOLOGIA .....	21
3.1. Classificação da Pesquisa .....	21
3.2. Metodologia Aplicada de ICV .....	22
3.3. Metodologia Aplicada para a Estimativa das Emissões de CO <sub>2</sub> .....	23
3.4. Fontes de Dados para o Estudo de Caso .....	23
4. APLICAÇÃO E RESULTADOS.....	24
4.1. Estudo de Caso .....	25
4.2. Aplicação da Metodologia de ICV .....	26
4.2.1. Fase 1: Escopo.....	27
4.2.1.1. Etapa 1: Abrangência .....	27
4.2.1.2. Etapa 2: Dimensões .....	28
4.2.2. Fase 2: Análise do inventário.....	28
4.2.2.1. Ciclo de Vida do Pneu Inservível.....	30
4.2.2.2. Emissões do Ciclo de Vida do Pneu Inservível.....	33
4.2.2.3. Ciclo de Vida do Coque de Petróleo.....	41
4.2.2.4. Emissões do Ciclo de Vida do Coque de Petróleo.....	44
4.2.3. Fase 3: Avaliação dos Dados .....	58
4.2.4. Fase 4: Comparação dos Resultados .....	60
4.3. Análise de sensibilidade .....	62
4.3.1. Cenário 1: Adoção do poder calorífico de fontes bibliográficas .....	62
4.3.2. Cenário 2: Carbono de biomassa.....	66
4.3.3. Cenário 3: Mudança no tipo do navio.....	67
5. CONCLUSÃO, LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	68
6. BIBLIOGRAFIA.....	72

## 1. INTRODUÇÃO

O pneu é composto por borracha natural e borracha sintética, elaborada a partir do petróleo, além de negro fumo, arame de aço, tecido de nylon, óxido de zinco, enxofre e aditivos. Este produto tornou-se um artefato imprescindível e fundamental na sociedade moderna agilizando e dando comodidade e segurança ao transporte de cargas e passageiros (SOUZA, 2011).

Nas últimas décadas, a demanda mundial por pneumáticos vem crescendo vertiginosamente (ANDRADE, 2007). No entanto, o pneu possui uma vida útil limitada, tornando-se, após determinado período de uso, inservível para desempenhar com qualidade e segurança suas funções.

Contudo, a destinação correta deste resíduo nem sempre é feita, contribuindo para a geração de impactos negativos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana. Muitas vezes, os pneus são dispostos em terrenos a céu aberto, sem qualquer controle ou fiscalização, acumulando-se em pilhas. Desta prática surge diretamente um problema de saúde pública: o acúmulo de água da chuva pode servir de criadouro para micro (larvas de mosquitos *Aedes Egypt*, por exemplo) e macro vetores (ratos, entre outros) (RODRIGUES JORGE *et al.*, 2004 *apud* MOTTA, 2008)

Além disso, os pneus possuem alto poder calorífico, cerca de 31,4 MJ/kg (GIUGLIANO *et al.*, 1999). Assim, as pilhas de pneu acumuladas no ambiente podem provocar incêndios de grandes dimensões e difíceis de controlar. Segundo LEMIEUX *et al.* (2004) alguns desses incêndios, dependendo da dimensão das pilhas de pneus, podem durar meses sem cessar, como foi o caso do ocorrido na cidade de Winchester, no estado de Virginia, nos EUA, com duração de 9 meses.

Adicionalmente à devastação potencial de um incêndio, a queima a céu aberto de pneus contamina o ar com uma fumaça tóxica composta de carbono, dióxido de enxofre e outros poluentes atmosféricos. Também polui o solo por liberar para cada pneu queimado em torno de dez litros de óleo, conhecido como óleo pirolítico, que se infiltra e contamina o lençol freático da região (CIMINO e ZANTA, 2005).

De acordo com NOHARA *et al.* (2006) *apud* SOUZA (2011), o volume e a forma do pneu não permitem sua compactação, dificultando e encarecendo o transporte e o armazenamento do mesmo. Além disso, sua composição é baseada em materiais que podem levar cerca de 600 anos para serem completamente decompostos. Estas características tornam inadequada a destinação de pneus inservíveis em depósitos de lixo e aterros sanitários.

Neste sentido, Estados membros da União Europeia foram proibidos de depositar pneus inteiros em aterros sanitários desde 2003 e pneus picados depois de 2006, com

exceção de pneus de bicicleta e pneus com diâmetro externo maior de 1400 mm (SIENKIEWICZ et al., 2012).

No Brasil, a Resolução CONAMA 258 de 1999 proibiu a destinação final em locais como aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e queima a céu aberto. Além disso, determinou a responsabilidade quanto ao adequado descarte aos produtores e importadores para o caso dos pneus inservíveis. Foi estabelecido um cronograma que determinou que, a partir de 2002, para cada quatro pneus novos, o fabricante ou importador precisaria dar destino final de forma ambientalmente correta para um pneu inservível. Este cronograma foi previsto de forma progressiva, como pode ser visto na Tabela 1 (CAPONERO et al., 2003).

**Tabela 1:** Prazos e proporção entre produção e destinação adequada dos pneus inservíveis, baseado na CONAMA 258/99.

Prazos a partir de	Pneus novos		Pneus inservíveis
	Nacionais	Importados	
Jan/2002	4 unidades	4 unidades*	1 unidade
Jan/2003	2 unidades	2 unidades*	1 unidade
Jan/2004	1 unidade	1 unidade	1 unidade
Jan/2005	4 unidades	4 unidades	5 unidades

\*Quantidade válida para pneus novos ou reformados  
(Fonte: (CIMINO e ZANTA, 2005)

Tendo isso em vista, percebe-se a necessidade da reinserção do pneu inservível em novos ciclos produtivos de modo a viabilizar a sua logística reversa, tanto econômica quanto ambientalmente.

De acordo com a European Tyre and Rubber Manufacturers' Association (ETRMA, 2011), na Europa (UE27, Noruega e Suíça), 42,5% das aproximadamente 2,7 milhões de toneladas de pneus inservíveis gerados em 2010 tiveram como destinação final o coprocessamento em fornos de cimenteira, 39,8% foram encaminhadas à reciclagem de materiais (utilização de granulado e pó de pneu em diversas aplicações), 9,0% foram utilizadas em obras de engenharia civil e obras públicas, 5,8% foram encaminhadas a aterros e destinos desconhecidos e 3,7% tiveram como destino a recuperação energética.

No Brasil, segundo LAGARINHOS e TENÓRIO (2008), em 2006, os principais destinos finais dos pneus inservíveis eram: as atividades de laminação, trituração e fabricação de artefatos de borracha, representando 50,02% do total de pneus destinados, o coprocessamento na indústria do cimento (35,73%), a regeneração de borracha sintética (13,22%) e a extração e tratamento de minerais (1,03%).

Sendo assim, percebe-se a importância do coprocessamento de pneus inservíveis em fornos de cimenteiras. Esta alternativa é interessante do ponto de vista ambiental, por reduzir o acúmulo deste resíduo no meio ambiente. No entanto, a fim de determinar que uma alternativa produtiva é ambientalmente adequada, é necessário fazer uma análise sistêmica, avaliando outros aspectos em todo seu ciclo de vida.

Para este fim, é recomendável a realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta técnica estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto (isto é, do “berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição (ABNT, 2001). Algumas vezes se observa o emprego parcial desta técnica, obtendo-se um Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Nestas duas técnicas, os aspectos ambientais a serem avaliados devem estar relacionados aos principais impactos ambientais do processo estudado, assim como às demandas da sociedade.

Um dos impactos considerados mais relevantes na atualidade refere-se ao aumento do efeito estufa na Terra. A importância do tema vem do fato de que a concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera está crescendo muito desde eras pré-industriais. Essa tendência pode ser atribuída a atividades antrópicas, notadamente ao uso de combustíveis fósseis, mudanças no uso da terra e agricultura (IPCC, 1995).

Esse aumento leva a um aquecimento adicional da Terra, contribuindo para o fenômeno conhecido como mudanças climáticas. Este fenômeno impacta na dinâmica natural do planeta, podendo ter consequências o aumento do nível d'água dos oceanos, aumento da ocorrência de eventos extremos em diversas regiões, como enchentes e secas, e aumento da vulnerabilidade das espécies.

. Tendo isto em vista, diversas iniciativas de âmbito global foram desencadeadas. Dentre elas, destaca-se o Protocolo de Quioto, acordo internacional ligado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC, na sigla em inglês). Este acordo definiu metas internacionais de redução de emissões de GEE, aplicando maiores metas para os países desenvolvidos, de acordo com o princípio de “responsabilidades comuns, mas diferenciadas”.

Como consequência, em abril de 2012 foi lançado, no Brasil, o Plano Setorial de Mitigação da Mudança Climática para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação, sob coordenação do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). Este Plano propôs que, inicialmente, o foco das ações setoriais deveria recair sobre os setores responsáveis

pela maior parte das emissões, isto é: a indústria de Alumínio, de Cimento, de Papel e Celulose e Química.

Segundo o relatório “Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima”, no setor de processos industriais as emissões mais relevantes de GEE, em 2000, foram devido ao CO<sub>2</sub>, com 63 Tg, basicamente devido à produção de ferro-gusa e aço (56%), de cimento (25%) e de cal (8%) (MCT, 2010a).

Apenas a indústria do cimento responde, em todo o mundo, por aproximadamente 5% do total de CO<sub>2</sub> emitido pelo homem (SNIC, 2008). No Brasil, onde as queimadas florestais são as principais emissoras de CO<sub>2</sub>, o Segundo Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa classificou a participação do setor como 2,9% do total das emissões nacionais (MCT, 2010b).

Em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção de clínquer, seja na calcinação/descarbonatação da matéria-prima, seja com a queima de combustíveis no interior do forno. A parcela restante resulta do transporte de matérias-primas e das emissões pelo consumo de energia elétrica na fábrica (MCT, 2010a).

O coprocessamento de resíduos nos fornos rotativos das cimenteiras substitui parcialmente combustíveis fósseis tradicionais, como o coque de petróleo e o carvão mineral. Conforme visto, o pneu inservível é um resíduo largamente utilizado neste processo. Sendo assim, considerou-se relevante a análise das emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida tanto do pneu inservível quanto do coque de petróleo.

### **1.1. Objetivos do Estudo**

Como objetivo principal tem-se a ampliação da análise do coprocessamento como disposição final dos pneus inservíveis, sob a ótica das emissões de CO<sub>2</sub>. Com isso, pretende-se avaliar se, além do benefício obtido com a retirada deste resíduo do ambiente, também há o benefício de redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Ademais, tem-se como objetivo secundário a determinação, sob o aspecto das emissões de CO<sub>2</sub>, de qual combustível é mais adequado para o uso nos fornos de clínquer, o pneu inservível ou o coque de petróleo.

### **1.2. Motivação**

De forma ampla, é uma motivação deste trabalho a busca por métodos produtivos mais sustentáveis, levando em conta diferentes aspectos ambientais. Esta busca

mostra-se relevante na medida em que a determinação de que uma forma produtiva é mais sustentável que outra requer uma análise sistêmica e, portanto, complexa. Assim, acredita-se que a discussão sobre como avaliar e quais aspectos considerar para esta análise é de grande valia para a tomada de decisão, tanto para a indústria, avaliando o seu perfil de emissões e a sua cadeia de produção, quanto para o poder público, no incentivo a políticas ambientais consistentes.

Além disso, o objetivo geral de um projeto de graduação é proporcionar ao aluno a oportunidade de aprofundamento em temas relevantes para o seu curso. Neste sentido, mostra-se relevante, no caso do curso de Engenharia Ambiental, o aprofundamento em temas como disposição adequada de resíduos sólidos, mudanças climáticas e mitigação de impactos ambientais. Adicionalmente, a experiência prática de aplicação da metodologia de um ICV é de grande relevância para a formação de engenheiros ambientais.

### **1.3. Delimitação**

O presente trabalho limita-se a aplicação de um ICV para o cenário brasileiro de reaproveitamento de pneu inservíveis, considerando o período de 2012/2013. Ademais, a profundidade do ICV considerou apenas um aspecto ambiental, sendo este as emissões de CO<sub>2</sub>.

### **1.4. Estrutura do Projeto de Graduação**

Para que fosse possível desenvolver o estudo proposto, considerou-se uma estrutura com cinco Capítulos. O presente capítulo apresenta uma breve introdução, os objetivos do estudo, a motivação e a delimitação adotada para a elaboração deste projeto de graduação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica e documental realizada por meio de pesquisa em livros e periódicos com abrangência nacional e internacional sobre o pneu inservível, a produção do cimento, o coprocessamento e a cadeia logística do pneu. Esta pesquisa teve como objetivo de embasar o estudo do ciclo de vida do pneu inservível tendo como uso final o coprocessamento em fornos de clínquer.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia adotada, abordando a sua classificação, o procedimento utilizado para aplicação do ICV e o procedimento genérico para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>.

O Capítulo 4 detalha a aplicação do método para o estudo de caso, com o objetivo de estimar as emissões de CO<sub>2</sub> ao longo dos ciclos de vida do pneu inservível e do

coque de petróleo. Após a aplicação do método, realizou-se uma análise de sensibilidade para verificar o comportamento dos resultados obtidos.

No último Capítulo são apresentadas conclusões, limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A presente revisão bibliográfica tem como objetivo fundamentar o referencial teórico necessário para a determinação do ciclo de vida do pneu inservível, tendo como uso final o coprocessamento em fornos de clínquer.

Para isso, foram desenvolvidos quatro itens considerados importantes. O primeiro, 2.1, dá uma visão mais ampla do pneu inservível, abordando o panorama regulatório e as principais formas de disposição final. Esta abordagem é importante para a compreensão do contexto do fim de vida útil deste artefato.

O item 2.2 apresenta uma visão geral do cimento, abordando o seu processo produtivo e a representatividade desta indústria no que tange às emissões de GEE. Com esta seção, buscou-se mostrar a relevância do forno de clínquer na produção do cimento, sendo um processo que apresenta oportunidades para redução das emissões.

Já a seção 2.3 buscou apresentar os principais aspectos do coprocessamento de pneus inservíveis, além de abordar os aspectos ambientais relacionados a este processo. Este item aponta para a relevância da discussão acerca da necessidade de análise de diversos parâmetros quando da escolha de uma opção produtiva.

O último item, 2.4, apresenta a cadeia logística reversa genérica do pneu, sendo importante para entender o processo que ocorre no seu fim de vida, quando passa a ser denominado de inservível.

### **2.1. Pneu Inservível**

A preocupação com a disposição final de pneus vem crescendo ano a ano. As primeiras regulamentações brasileiras neste sentido surgiram nos anos 90, com normas voltadas para a prevenção da geração de resíduos de pneus. Em 1996, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) proibiram a importação de pneus usados, buscando com isso reduzir a velocidade de geração de pneus inservíveis. Somente em 1999 foi publicada a Resolução CONAMA 258, que introduziu o princípio da responsabilidade do produtor

e do importador pela destinação final ambientalmente adequada de pneus (MOTTA, 2008).

No ano de 2000, a Portaria 8 da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX) proibiu a concessão de licenças para a importação de pneus recauchutados (reformados) e usados como bem de consumo ou matéria-prima. Esta Portaria foi alterada em 2002 para permitir as importações de pneus remoldados provenientes dos países do Mercosul (MOTTA, 2008). No entanto, em 2008, o artigo 70 do Decreto nº 6.514, de 22 de julho 2008, passou a impor pena de multa por unidade de pneu usado ou reformado importado.

A regulamentação mais recente é a Resolução CONAMA 416 de 2009 que define que o pneu inservível corresponde a um pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma. Ainda de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2009), para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível.

Com isso, é preciso compreender o cenário de produção e importação de pneus no país. A Tabela 2 expõe os dados considerando as dez empresas associadas à Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), de 2007 a 2012. Estas empresas estão entre as mais importantes no mercado brasileiro de pneumáticos.

**Tabela 2:** Volume de produção, vendas e exportação nacional anual de pneus

<b>Ano</b>	<b>Volume de produção (em milhões de unidades de pneus)</b>	<b>Volume de vendas (produção e importação em milhões de unidades de pneus)</b>	<b>Volume de exportação (em milhões de unidades de pneus)</b>
2007	57,3	63,1	19,8
2008	59,7	64,3	17,8
2009	54,1	60,2	14,5
2010	67,3	73,0	18,1
2011	66,9	72,9	17,4
2012	62,7	67,9	13,2

(Fonte: ANIP, 2013)

Analisando a Tabela 2, nota-se um incremento anual de, em média, 66,9 milhões de unidades de pneus circulando no Brasil. Desta forma, torna-se imprescindível em um contexto nacional a busca por alternativas de destinação adequadas e que não prejudiquem o meio ambiente nem a saúde pública, devendo estar alinhadas com as tendências globais de desenvolvimento sustentável em toda a cadeia de valor.

No Brasil, os processos de recapagem, recauchutagem e remoldagem não são considerados formas de disposição final de pneus inservíveis uma vez que, se o pneu usado ainda pode ser reformado, significa que ele se encontra dentro do seu período de vida útil. Além disso, o processo de reforma dos pneus pode ser repetido uma única vez para pneus de automóveis de passeio e até três vezes para caminhões de carga (MOTTA, 2008). Após este estágio, o pneu não poderá mais ser reformado, sendo classificado como pneu inservível. A destinação final deste resíduo inclui técnicas em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outras técnicas.

Uma importante técnica de reciclagem corresponde ao processo de trituração de pneu inservível. O processo mais utilizado no Brasil é aquele à temperatura ambiente. Neste processo, há a retirada do nylon e do aço do pneu, sendo a borracha reduzida a partículas de tamanhos finais de até 0,2 mm (LAGARINHOS e TENÓRIO, 2008). Desta forma, o granulado ou pó de borracha de pneu podem ser usados em diversos processos como confecção de pisos de borracha para *playgrounds* e práticas esportivas, tapetes de absorção de impacto para escolas e produção de asfalto-borracha.

Esta última aplicação é vantajosa na medida em que se aproveitam as propriedades físicas e químicas da borracha contribuindo para o aumento da elasticidade do asfalto e conseqüentemente diminuição do desgaste e aparecimento de trincas que reduzem a vida útil deste material. Além disso, há aumento da resistência à derrapagem e à abrasão, redução do ruído provocado pelo contato pneu-asfalto e melhoria da aderência dos pneus em tempos chuvosos e frios (SIENKIEWICZ *et al.*, 2012).

A utilização de pneus inservíveis em obras de engenharia civil também aproveita as propriedades físicas dos mesmos. A construção de contenção de encostas, muros de arrimo, proteções de cais, criação de recifes artificiais, entre outros, exige pouca transformação na preparação do pneu, utilizando, ao máximo, a resistência dos diferentes componentes, visto que os pneus são constituídos de borracha, reforçados com fibras têxteis ou metálicas, atribuindo-lhes elevada resistência a tensões radiais (GOBBI, 2002).

Já a regeneração de borracha sintética é um processo no qual os pneus, depois de triturados, são submetidos a temperatura, pressão e produtos químicos, como álcalis e óleos minerais, podendo ser realizada dentro de uma autoclave rotativa. Neste processo ocorre o rompimento das pontes de [enxofre-enxofre] e [carbono-enxofre] entre as cadeias poliméricas. Assim, a borracha é transformada em material

passível de novas formulações, tais como saltos e solados de sapatos, colas e adesivos, câmaras de ar utilizado em pneus convencionais ou diagonais, rodos metálicos, tiras para indústrias de estofados, entre outras aplicações (MORANDI, 1992 *apud* LAGARINHOS e TENÓRIO, 2008).

Segundo SOUZA e D'AGOSTO (2010), a desvulcanização apresenta-se como o tipo de reciclagem que recupera de forma mais adequada às propriedades da borracha e que permite que esta seja reintroduzida no próprio ciclo produtivo de um novo pneu. Contudo, possui um alto custo e, conseqüentemente, uma baixa utilização.

Por fim, merece destaque a recuperação energética de pneus. Pneus inservíveis tem um poder calorífico de 32 MJ/kg o que os torna competitivos em relação a outros combustíveis, especialmente o carvão (GIERÉA *et al.*, 2006 *apud* SIENKIEWICZ *et al.*, 2012). Este último combustível possui um poder calorífico menor, de 28,2 MJ/kg (EGGLESTON, BUENDIA *et al.*, 2006a). O combustível derivado de pneu (*tyre derived fuel*, TDF, na sigla em inglês) pode ser utilizado em indústrias cimenteiras, usinas termelétricas, caldeiras, fábricas de celulose e papel etc.

Dentre estas, a principal aplicação da técnica de reciclagem energética atualmente é a utilização de pneus inservíveis como combustível suplementar em fornos de cimenteiras. Tendo isto em vista e seguindo o objetivo deste trabalho, o processo de produção de cimento é detalhado na Seção 2.2.

## **2.2. A Produção de Cimento**

O cimento é constituído de um pó fino, de tamanho aproximado de 50 µm, resultante de uma mistura formada pelo clínquer (96%) e outras substâncias, tais como, gesso (4%) e escórias de silício (MONTEIRO e MAINIER, 2008).

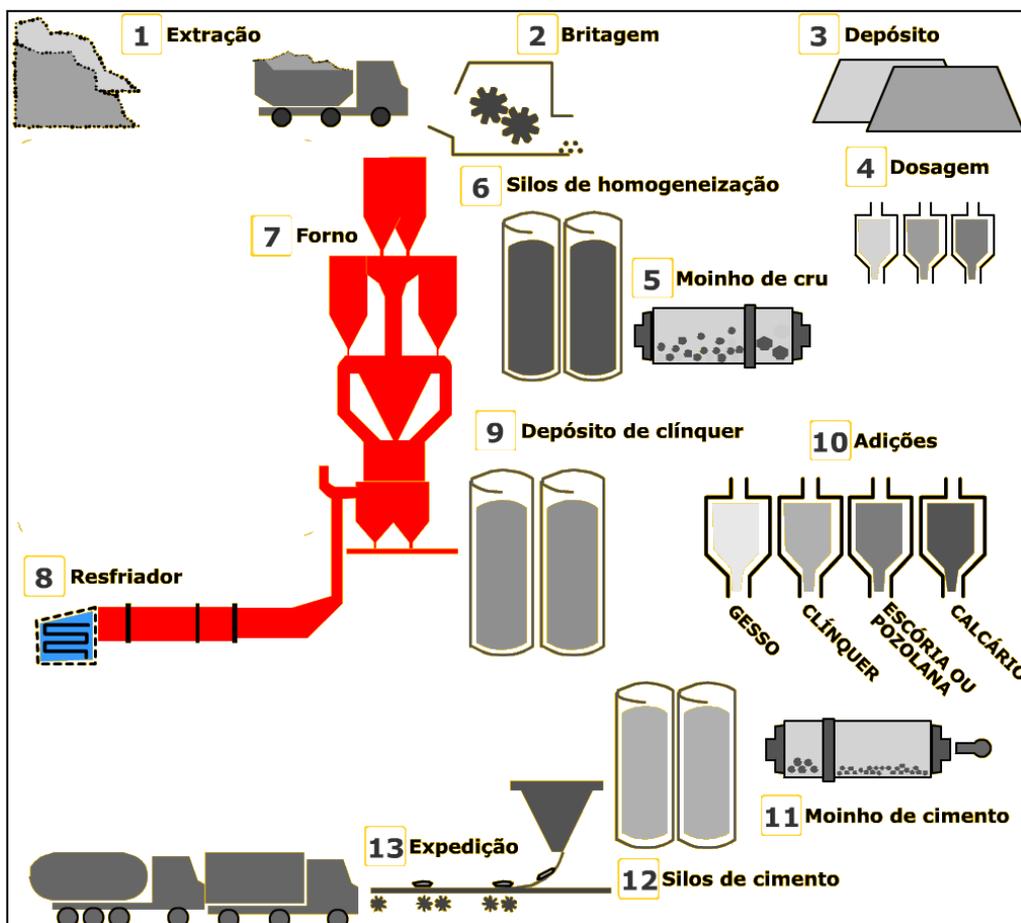
No Brasil, segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC, 2012), a demanda e a produção de cimento se ampliaram de forma acelerada desde 2004. A produção atingiu 60 milhões de toneladas em 2010, fazendo do país o 7º maior produtor e 4º maior consumidor de cimento do mundo. Os anúncios de investimento no setor sugerem que a capacidade de produção anual aumentará em mais de 50% até 2016, comparativamente aos níveis de 2010.

Neste sentido e tendo em vista a presença relevante das indústrias cimenteiras nas emissões de GEE industriais brasileiros, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e seus grupos associados criaram, em 2008, um Comitê de Mudanças Climáticas, reunindo especialistas em meio ambiente do setor. No âmbito internacional, a indústria do

cimento criou a CSI (*Cement Sustainability Initiative*), vinculada ao WBCSD (*World Business Council for Sustainable Development*), com o objetivo de estimular práticas sustentáveis na indústria, dentre elas o monitoramento, controle e redução de suas emissões de CO<sub>2</sub> (SNIC, 2008).

Assim, nota-se um movimento nacional e internacional dentro da indústria cimenteira no sentido de controlar e mitigar o seu impacto no aumento do efeito estufa. Para tal, é necessário uma maior compreensão sobre as principais fontes de emissão de GEE nesta indústria. Através do conhecimento dessas fontes é possível que se modifique e adapte processos de modo a contribuir para a mitigação dessas emissões.

Há dois processos possíveis para fabricação do cimento: via seca ou via úmida. No Brasil, praticamente todo o cimento é produzido por via seca, processo industrial que garante a diminuição do uso de combustíveis em até 50% em relação a outros processos (MCT, 2010b). Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2009), o processo de fabricação do cimento por via seca pode ser dividido em 13 etapas representadas na Figura 1 e descritas a seguir:



**Figura 1:** Processo de fabricação do cimento. (Fonte: ABCP, 2009)

Na primeira etapa ocorre a mineração para extração de calcário e argila. Em seguida, realiza-se a britagem, etapa em que o calcário é transportado até o local de realização do processo para ser dimensionado de forma adequada ao processamento industrial. Com isto também é eliminada uma parte das impurezas presentes. A argila não passa por essa etapa, por ser um material mole, seguindo direto da primeira para terceira fase.

A terceira fase é o depósito, na qual os dois minerais são estocados separadamente. Na baía de cada um há um equipamento responsável por misturar as cargas, realizando, assim uma pré-homogeneização. Além disso, nesta fase são realizados diversos ensaios para determinação da porcentagem de cada matéria-prima na mistura.

Neste ponto, o composto de calcário (90%) e argila (10%) é dosado para ser triturado no moinho de cru, numa quarta etapa chamada de “dosagem”. Ela é realizada com base em parâmetros químicos pré-estabelecidos, os chamados “módulos químicos”, que dependem das características composicionais dos materiais estocados e são controlados por balanças dosadoras.

A quinta etapa, o moinho de cru, recebe a farinha crua formada pela mistura dos minerais e faz a moagem. Com isso, as partículas são reduzidas, em média a 0,05 milímetros.

Nos silos de homogeneização ocorre a sexta etapa. A mistura crua, devidamente dosada e com a finura adequada, deve ter sua homogeneização assegurada para permitir uma perfeita combinação dos elementos formadores do clínquer. O processo ocorre em silos verticais de grande porte através de processos pneumáticos e por gravidade.

A etapa seguinte compreende uma fase importante para o processo. É aqui que a “farinha” vai para o forno, passando antes por pré-aquecedores ou pré-calcinadores, para o pré-aquecimento, chamado também de “clínquerização”. No forno em si, a mistura é calcinada até 1450°C, resultando no clínquer.

A partir daí, o resfriador promove a redução da temperatura a 80°C, aproximadamente, sendo a oitava etapa. Aqui é completada a clínquerização, ocorrendo uma série de reações químicas que influenciarão futuramente na resistência mecânica do concreto em diversos aspectos.

A nona etapa consiste em armazenar o clínquer produzido em silos, para aguardar a seguinte, de adições. Junto com o clínquer, adições de gesso, de escória de alto forno, de pozolana e do próprio calcário compõem os diversos tipos de cimento

portland. Cada uma dessas substâncias é estocada separadamente antes de entrar no moinho de cimento, que é a décima primeira etapa.

Neste ponto ocorre a moagem final, em que o clínquer adicionado aos outros componentes resulta no cimento que é comercializado no mercado. Aqui o cimento já está pronto e passa apenas por um transporte mecânico ou pneumático até os silos, onde será estocado e, após ensaios finais de qualidade, enviado para expedição, décima terceira e última etapa.

De acordo com o que foi exposto no capítulo anterior, sabe-se que a produção de clínquer é o processo com maior representatividade no total de dióxido de carbono emitido pelas cimenteiras. Assim, é necessário compreender melhor como ocorre a etapa de clinquerização.

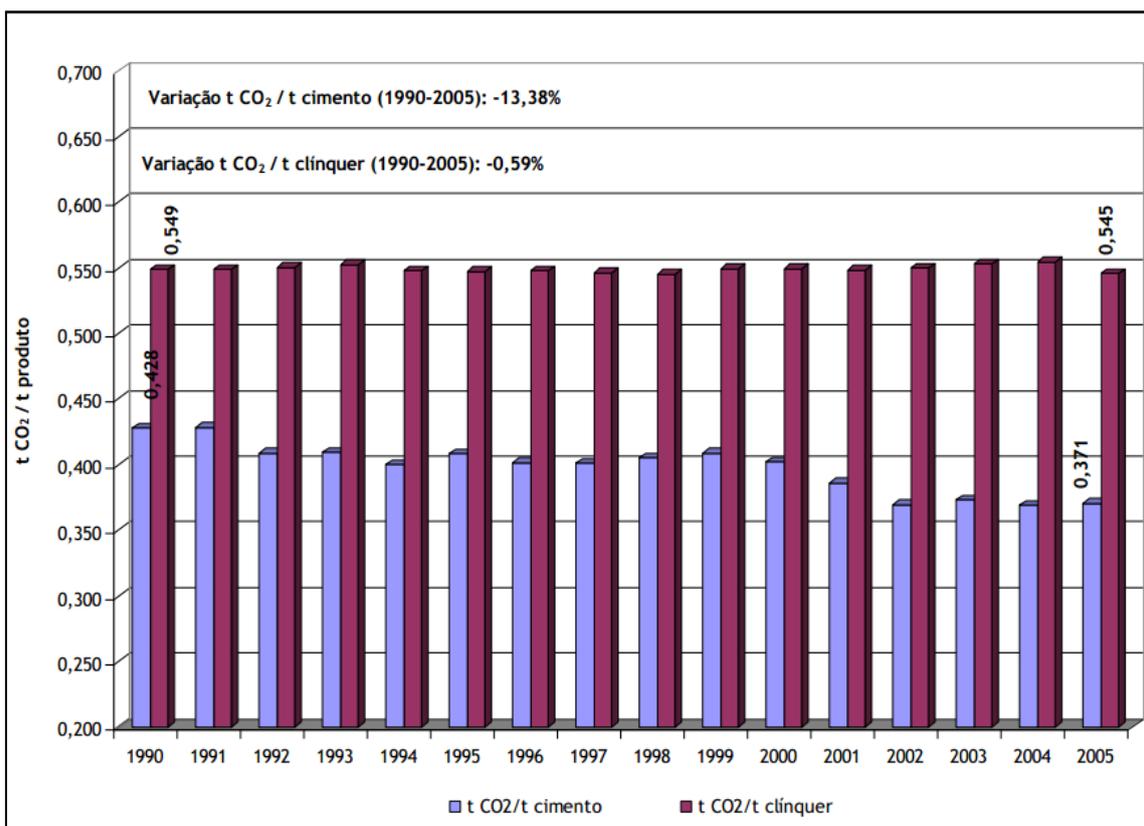
Existem várias configurações possíveis para a clinquerização no processo via seca (SMIDTH, 1999b apud MARINGOLO, 2001). No sistema com pré-aquecedor, a farinha é introduzida no sistema de forma pulverulenta, sendo pré-aquecida pelos gases provenientes do forno rotativo até a temperatura de calcinação em uma torre de ciclones, no interior da qual a descarbonatação do calcário pode alcançar 50%. Em uma outra configuração, com pré-aquecedor e pré-calcinador, 90 a 95% da calcinação ocorre separadamente no pré-calcinador fixo, construído dentro do tubo de ascensão do forno, com um queimador que pode ser dimensionado para todos os tipos de combustíveis (MARINGOLO, 2001).

O restante da calcinação da farinha, assim como o aquecimento final e o processo de clinquerização, é realizado no forno rotativo, revestidos com tijolos refratários resistentes ao calor, o qual não possui subdivisões interiores. Estes apresentam inclinação de 2 a 6% com relação à horizontal de modo a permitir a circulação de gases de aquecimento resultantes da queima de combustível em contracorrente (MARINGOLO, 2001).

A principal reação química para produção do clínquer é a descarbonatação do calcário ( $\text{CaCO}_3$ ). O  $\text{CaCO}_3$  é calcinado e como resultado produz cal ( $\text{CaO}$ ) e como sub-produto o  $\text{CO}_2$ . Depois de produzida, a cal ( $\text{CaO}$ ) reage com a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) formando o clínquer, um produto nodular intermediário, que é moído com uma porção de gesso para fabricação do cimento Portland. Entretanto, existem outros carbonatos presentes na matéria-prima, em menor escala, que não o  $\text{CaCO}_3$ . Calcários magnesianos [ $\text{MgCO}_3$ ] e dolomíticos [ $\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$ ] possuem magnésio em sua composição. Quando submetidos à elevada temperatura, estes carbonatos fracionam-se também liberando  $\text{CO}_2$  (MCT, 2010b). O processo de calcinação representa um percentual de quase 50% das

emissões de CO<sub>2</sub> na produção do cimento (MAHASENAN et al., 2002 apud BENHELAL et al., 2012).

De acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT, 2010b), as emissões oriundas da calcinação se mantiveram relativamente constantes na produção de clínquer no período de 1990 a 2005, uma vez que os teores médios de CaO e MgO na matéria-prima não mudaram substancialmente ao longo do tempo. No entanto, conforme pode ser visto na Figura 2, comprova-se uma significativa diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento.



**Figura 2:** Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> específicas por cimento e por clínquer. (Fonte: MCT, 2010b)

O resultado mostrado na Figura 2 acima deve-se, em grande parte, ao pioneirismo brasileiro no uso de aditivos para o clínquer. São utilizados como aditivos materiais como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, pozolanas artificiais e fíler calcário. Esta prática além de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que diminui a produção de clínquer e, conseqüentemente, a queima de combustíveis e a emissão por calcinação, diversifica as aplicações e características específicas do cimento (MCT, 2010b).

Além disso, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2008), a indústria do cimento no Brasil possui um parque industrial moderno e opera com altos níveis de eficiência energética quando comparados aos de outros países, o que resulta em redução da queima de combustíveis e, conseqüentemente, na liberação de menos CO<sub>2</sub>. Isso ocorre porque 99% do cimento brasileiro é produzido por via seca, processo industrial que garante a diminuição do uso de combustíveis em até 50%. Além disso, torres com pré-aquecedores e pré-calcinadores reaproveitam os gases quentes da saída do forno para pré-aquecer a matéria-prima previamente à entrada do forno, diminuindo ainda mais o consumo de combustíveis.

Mesmo com altos níveis de eficiência na queima de combustíveis, ainda existe espaço para a exploração de novas soluções ambientalmente adequadas neste aspecto, como, por exemplo, o uso de fontes alternativas de energia nos fornos de clínquer. Isto é possível pelo coprocessamento de resíduos (como pneus, óleos usados, plásticos, tintas etc.) e/ou pelo uso de biomassa (moinha de carvão vegetal, casca de arroz, bagaço de cana etc.), que emitem, muitas vezes, menor quantidade líquida de CO<sub>2</sub> que os combustíveis tradicionais utilizados (SNIC, 2008). Com isso, optou-se por aprofundar as discussões sobre este tema na seção a seguir.

### **2.3. Coprocessamento em Fornos de Cimenteiras**

Em 2008, havia no Brasil 35 fábricas com fornos licenciados pelos órgãos ambientais para coprocessar resíduos, possuindo uma capacidade potencial de processamento de 2,5 milhões de toneladas. Só nesse ano, a indústria cimenteira nacional deu destinação a cerca de um milhão de toneladas de resíduos (incluindo aproximadamente 33 milhões de pneus inservíveis). Esta técnica permite, ainda que parcialmente, reduzir o uso de combustíveis tradicionais não-renováveis, como o coque de petróleo, o óleo combustível e o carvão mineral (SNIC, 2008).

A legislação brasileira (Resolução 264 do CONAMA, 1999) estabelece duas classes de resíduos que podem ser coprocessados em processos industriais: os resíduos que podem substituir, em parte, a matéria-prima, caso tenham características similares a esta; e os resíduos com alto poder energético que podem ser usados como combustíveis secundários. Geralmente, ambos os tipos de resíduos são tratados em fornos rotativos de clínquer, devido às características do processo, tais como o longo tempo de residência e as altas temperaturas alcançadas que garantem a destruição dos resíduos e permitem que alguns metais pesados se incorporem à estrutura do clínquer (ROCHA, LINS e ESPÍRITO SANTO, 2011).

Neste contexto, o coprocessamento de pneus inservíveis em fornos de cimenteira é uma opção interessante na medida em que o aço e outros produtos de combustão são absorvidos pelo processo, devido à temperatura extremamente elevada do forno. Além disso, pesquisas indicam que o uso de pneus em fornos de cimenteira não produz qualquer efeito negativo sobre a qualidade do clínquer. As únicas propriedades alteradas são uma cor mais escura e uma melhor granulação (SILVESTRAVICIUTE e KARALIUNAITE, 2006).

De maneira geral, existem duas formas de utilização de pneus inservíveis em fornos de cimenteiras: 1) pneus picados são colocados diretamente na zona de queima do forno, e 2) pneus inteiros são introduzidos na zona de calcinação. A queima de pneus inteiros pode aumentar as emissões de CO, um gás poluente deletério à saúde humana. Para prevenir este aumento, o forno deve ser equipado por um ventilador adicional para o suprimento de oxigênio (SILVESTRAVICIUTE e KARALIUNAITE, 2006).

É importante destacar que a combustão é um processo extremamente complexo, envolvendo interações físicas e reações químicas, cinética de reações, catálise, aerodinâmica e transferência de calor, tornando-se ainda mais complicado com a introdução no processo de resíduos de natureza heterogênea (DEMPSEY e OPPELT, 1993 apud MARINGOLO, 2001). Neste sentido, o pneu picado mostra-se mais adequado na medida em que o poder calorífico deste é mais alto por conter menos nylon, talão e cinta (PIPILIKAKI et al., 2005).

Ademais, o uso de pneus inteiros requer, normalmente, modificações mais onerosas, tanto no seu manuseio como na alimentação do forno, enquanto o uso de pneus picados requer um pré-tratamento (LAGARINHOS, 2004).

Apesar de vastamente empregado em todo o mundo, o coprocessamento de pneus inservíveis ainda gera incertezas quanto à garantia da qualidade ambiental na região do entorno das fábricas de cimento. Essas incertezas se dão principalmente devido a complexidade envolvida na combustão de vários resíduos (com diversos níveis de toxicidade) em fornos de cimento (MARINGOLO, 2001).

Além disso, há falta de confiança na capacidade das agências governamentais conseguirem regulamentar a atividade. No caso brasileiro, por exemplo, segundo MILANEZ (2007) há brechas na legislação que possibilitam que empresas, mesmo estando em conformidade com a lei, realizem práticas que podem colocar em risco a saúde de seus trabalhadores e da sociedade.

MILANEZ (2007) realizou a comparação entre alguns limites para emissão definidos pelo governo federal brasileiro e aqueles estabelecidos pela União Europeia.

Percebe-se que os limites praticados no Brasil são menos restritivos do que os previstos na Europa, permitindo que sejam adotadas tecnologias de coprocessamento que já são obsoletas nos países dos blocos econômicos mais ricos. Um exemplo é o material particulado, cujo limite é de 30 mg/Nm<sup>3</sup> na Europa, enquanto no Brasil é de 77 mg/Nm<sup>3</sup>. Dessa forma, do ponto de vista legal existem algumas falhas que não favorecem a correta prática do coprocessamento no Brasil.

Nessa linha, SANTI e SEVÁ (2004) argumentam que outro aspecto a ser considerado nas discussões e, principalmente, nas decisões sobre a escolha dos combustíveis e sobre os riscos aceitáveis na fabricação de cimento com emprego de resíduos é o Princípio da Precaução. Os autores pontuam que pode ser observada uma postura atrasada dos entes públicos em relação aos riscos e sua disseminação em larga escala, além de uma falta de compromisso pelas consequências indesejadas que deles possam advir.

No entanto é preciso ter cautela ao se utilizar do Princípio da Precaução para invalidar a aplicação de novas tecnologias de produção ou mesmo tecnologias não usuais. Conforme observaram COOK e KEMM (2004), durante a realização de uma Avaliação de Impacto na Saúde (HIA, na sigla em inglês) sobre a utilização de pneus picados no forno de cimenteira em uma cidade inglesa, a população local que era contra o uso dos pneumáticos alegava ser a contrária por considerar o Princípio da Precaução, optando por manter o status quo mesmo desconhecendo os reais benefícios/impactos do novo processo. Esta é uma visão unilateral do risco, não olhando para a questão de forma sistêmica, já que não foram levados em conta riscos, por exemplo, associados à permanência das pilhas de pneus inservíveis no meio ambiente.

Desta forma, é preciso avaliar tanto os impactos ambientais provenientes do coprocessamento de pneus inservíveis quanto da não utilização dos mesmos neste processo. No entanto, para fins desta seção, foi realizado um levantamento bibliográfico apenas sobre possíveis impactos ambientais provocados pela queima de pneus inservíveis em fornos de cimenteira.

No que se refere às emissões atmosféricas, GIUGLIANO et. al. (1999) realizaram testes experimentais em uma cimenteira em Barletta, Itália, utilizando uma mistura de coque de petróleo com pneus inservíveis. A porcentagem de mistura foi de 36%, em termos de calor total, de pneus inservíveis picados. Os pneus picados foram introduzidos no pré-calcinador através de uma unidade para alimentação especialmente instalada. A comparação das emissões foi feita com relação à utilização

exclusiva de coque. Assim, com relação aos poluentes convencionais, os autores obtiveram os resultados apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Concentração de poluentes convencionais na chaminé (dados referentes a 0 °C, 1 atm, 11% O<sub>2</sub>).

Poluente	Teste Apenas com Coque de Petróleo	Teste com Pneu Picado (considerando 36% de substituição em relação ao calor total)
Material particulado (mg/m <sup>3</sup> )	2,1	2,2
SO <sub>2</sub> (ppm)	15	não detectado
NOx (ppm)	360	210
CO (ppm)	138	168
COVs (ppm as C)	2,2	< 0,1
O <sub>2</sub> (%)	15,4	15,5

(Fonte: GIUGLIANO *et al.*, 1999).

Analisando os dados obtidos, nota-se que houve uma redução considerável de emissões de SO<sub>2</sub> e, principalmente, NOx, quando utilizado o pneu. Segundo os autores, a redução na produção de óxidos de nitrogênio deve-se ao baixo conteúdo de nitrogênio nos pneus quando comparados com o coque (0,7% contra 2%, em peso) além da melhor eficácia como combustível no pré-calcinador.

Ademais, as variações de material particulado e compostos orgânicos voláteis (COVs) não se mostraram fora da faixa normal de condições operacionais. O pequeno aumento na concentração de CO é praticamente negligenciável por não ter afetado significativamente as emissões medidas pelos autores após o precipitador eletrostático (GIUGLIANO *et al.*, 1999).

Segundo ROCHA *et al.* (2011), um dos grandes problemas do coprocessamento de pneus deve-se à presença do enxofre na estrutura da borracha. Quando o enxofre utilizado na vulcanização da borracha é proveniente de minérios sulfetados, pode ocorrer a contaminação por arsênio, que se volatilizaria na temperatura do forno, causando sérios problemas ambientais (SANTI, 2003; MOORE, 1995; MAINIER; ROCHA, 2003). O sulfeto arsenioso (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) associado ao minério de zinco pode reagir, formando o arsênio e incorporando-se ao enxofre produzido. A contaminação é aleatória, pois depende do teor de arsênio existente no minério.

Por outro lado, é pouco provável a contaminação com arsênio quando o enxofre é obtido partir de depósitos geológicos ou quando é produzido a partir de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) existente no gás natural. Por motivos técnicos, o enxofre contaminado com arsênio não pode ser empregado na fabricação de ácido sulfúrico, fertilizantes e outros compostos químicos de indústria de base. Entretanto, na

vulcanização de borracha para pneus não foi encontrada nenhuma restrição ao seu uso (MONTEIRO e MAINIER, 2008).

Apesar dessas ressalvas, não foi observado um aumento na emissão de arsênio no experimento conduzido por GIUGLIANO *et. al.* (1999) no qual foi feita a medição de poluentes-traço. Os resultados obtidos pelos autores mostram que a emissão de arsênio com o uso do pneu picado foi similar àquela do coque. Ademais, os autores afirmaram que as emissões de metais em geral não pareciam correlacionadas com a substituição de combustíveis, evidenciando a capacidade de captura de metais durante a formação do clínquer em plantas de cimenteira no estado-da-arte.

Mesmo sem aumentar significativamente as emissões, podem haver consequências para as propriedades do clínquer. De acordo com PIPILIKAKI *et. al.* (2005), a presença de zinco na cinta e no talão do pneu inservível pode contribuir negativamente para o processo de hidratação e endurecimento do cimento.

Neste sentido, os autores realizaram testes experimentais para comparar os efeitos do uso de carvão mineral e coque de petróleo (12% deste no pré-calcinador e 88% daquele no forno principal) e da mistura de 6% de pneus inservíveis substituindo o carvão no pré-calcinador nas propriedades do cimento (CEM I-52.5<sup>1</sup>). Os resultados obtidos da amostra de clínquer indicaram não haver problema na concentração de zinco presente (0,08% com o uso de pneus contra 0,04% somente com combustíveis tradicionais). Contudo, os autores afirmaram que o uso de pneus picados poderia ser inviável se quantidades maiores deste combustível fossem utilizadas.

De maneira geral, segundo PIPILIKAKI *et. al.* (2005) todos os componentes de pneus são destruídos ou incorporados ao clínquer ou capturados pelo sistema de controle de emissões, não havendo necessidade de dispor as cinzas. Ademais, componentes como zinco e cromo, uma vez combinados ao clínquer, não poderão mais ser lixiviados.

## **2.4. Cadeia Logística Reversa do Pneu**

Para que ocorra o coprocessamento de pneus inservíveis em fornos de cimenteiras não é suficiente ter apenas uma planta industrial adaptada para receber este resíduo como combustível. É preciso que exista uma cadeia logística reversa bem delimitada de modo a suprir este insumo para a indústria. A estruturação da cadeia logística do pneu inservível é complexa, já que este resíduo não se encontra

---

<sup>1</sup> Classificação, segundo a Norma Europeia, de um tipo de cimento composto por 95-100% de clínquer e 0-5% de componentes auxiliares.

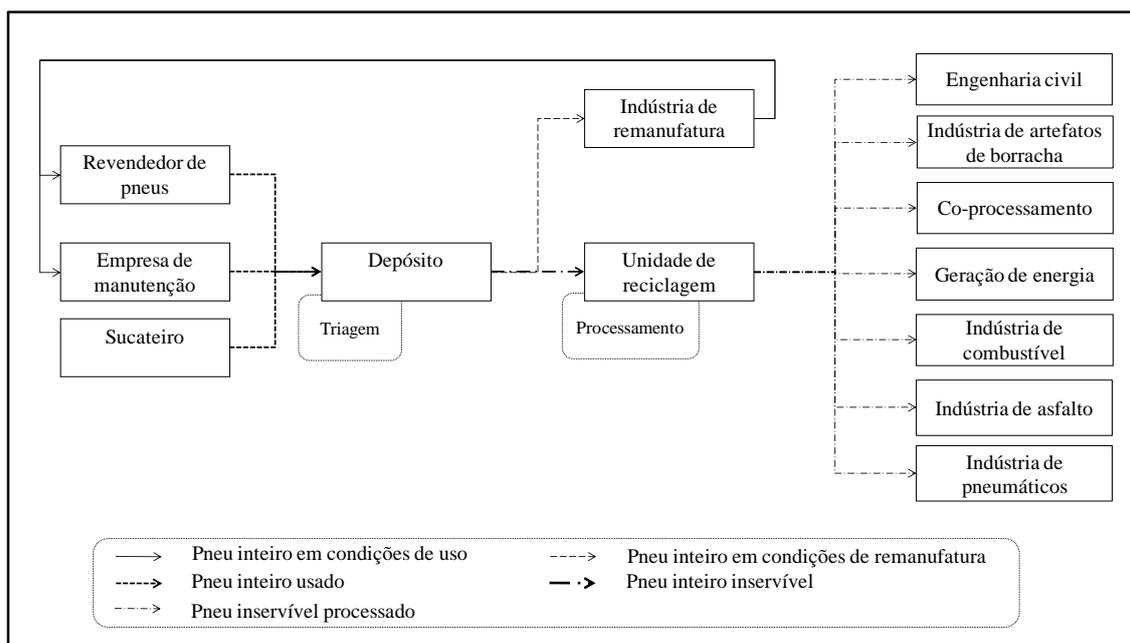
concentrado em apenas um gerador. Ao contrário, o pneu inservível é encontrado de forma dispersa, em diversos geradores, devendo passar por destinos intermediários para chegar ao seu destino final.

Mundialmente, observa-se um avanço da legislação que regulamenta a coleta e a destinação de pneus inservíveis, incentivando o surgimento de iniciativas de gerenciamento da cadeia logística reversa (SOUZA e D'AGOSTO, 2010). De acordo com ETRMA (2011), na União Europeia há três sistemas distintos para gerenciamento de pneus inservíveis, sendo estes: responsabilidade do produtor e do importador, responsabilidade do governo (com cobrança de impostos para este fim) e mercado livre.

A maioria dos países europeus instituiu o sistema de responsabilidade do produtor e do importador. Segundo SIENKIEWICZ et. al. (2012), este método mostra-se como o de maior sucesso tendo como principal vantagem a transparência das organizações, que tem como objetivo cumprir o estipulado pelas normas. Contudo, os dois países europeus com maior de pneus inservíveis, Alemanha e Reino Unido, contam com o mercado livre para gerenciar o correto descarte deste resíduo.

No Brasil, somente a partir de 1999, com a publicação da Resolução CONAMA 258, os produtores e importadores foram obrigados a coletar e dar destinação ambientalmente adequada a pneus inservíveis.

Neste sentido, SOUZA e D'AGOSTO (2010) propuseram um modelo conceitual para a cadeia logística reversa do pneu inservível. O modelo (Figura 3) busca ser flexível e aderente a diferentes realidades.



**Figura 3:** Modelo conceitual da cadeia logística reversa de pneus inservíveis (Fonte: SOUZA e D'AGOSTO, 2011).

A cadeia de destinação dos pneus usados inicia-se com a necessidade do consumidor de reposição dos pneus de veículos motorizados e bicicletas. A partir disso, o pneu pode percorrer diversos caminhos até sua disposição final (MOTTA, 2008). O usuário do pneu, quando da substituição deste por um novo ou reformado, deixa o pneu usado sob responsabilidade do revendedor ou da empresa de manutenção. Já o sucateiro recolhe ou recebe pneus aleatoriamente.

Entretanto, o modelo (Figura 3) apresentado acima não inclui este primeiro elo da cadeia devido a restrições adotadas por SOUZA e D'AGOSTO (2010), começando a análise quando o pneu já encontra-se em seu destino intermediário (revendedor de pneu, empresa de manutenção ou sucateiro). As figuras do revendedor de pneus, da empresa de manutenção e do sucateiro tornam-se, então, os geradores dos pneus usados. Estes foram os três elementos mais observados na pesquisa sobre as experiências nacionais e internacionais analisadas por SOUZA e D'AGOSTO (2010). Dentro desse contexto, o pneu usado existente no gerador deve ser encaminhado a um depósito, que pode estar localizado junto ao gerador, à unidade de reciclagem, ao usuário final ou em um local estratégico separado dos demais elementos da cadeia.

Nesse depósito deve-se realizar uma triagem dos pneus, separando-os em: em condições de uso, em condições de remanufatura e inservíveis, que devem ser encaminhados para o mercado secundário, para a indústria de remanufatura e para a unidade de reciclagem, respectivamente. Tal triagem tem por objetivo evitar que os

pneus que ainda possuam condições de rodagem sejam destinados à reciclagem (SOUZA, 2011).

Após realizar a triagem, os pneus destinados à unidade de reciclagem podem, caso necessário, ser submetidos a um pré-tratamento (processamento), que tem por objetivo viabilizar a reciclagem do pneu. Este pré-tratamento ocorre em uma unidade de reciclagem que pode ou não, estar localizada junto ao usuário final (SOUZA, 2011). O uso final irá variar de acordo com a disponibilidade de tecnologia, viabilidade econômico-financeira, incentivos fiscais, dentre outras variáveis.

O pneu inservível é largamente utilizado como combustível alternativo em fornos de clínquer e substitui parcialmente combustíveis fósseis, como o coque de petróleo e o carvão mineral. Atualmente, devido ao preço mais competitivo, o coque de petróleo tem sido o principal combustível utilizado nas cimenteiras brasileiras. Para o presente trabalho considera-se como uso final apenas o coprocessamento em fornos de clínquer. O método para detalhamento do ciclo de vida é apresentado e desenvolvido no próximo capítulo.

### **3. METODOLOGIA**

Dando continuidade ao trabalho, este capítulo apresenta a metodologia utilizada para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida do pneu inservível e do coque de petróleo.

Desta forma, o item 3.1 aborda a classificação da pesquisa desenvolvida. A seção 3.2 apresenta o procedimento metodológico que foi adotado para a elaboração do ICV. O item 3.3, expõe de forma genérica as técnicas adotadas para realização das estimativas das emissões de CO<sub>2</sub> nos diversos processos dos ciclos de vida do pneu inservível e do coque de petróleo. Por fim, o último item deste capítulo, 3.4, descreve as fontes de dados utilizadas para o detalhamento do estudo de caso desenvolvido neste trabalho.

#### **3.1. Classificação da Pesquisa**

Segundo a classificação de DA SILVA e MENEZES (2001), a metodologia deste trabalho é de natureza aplicada e de abordagem quantitativa, sendo, no seu objetivo, uma pesquisa exploratória. Com relação aos procedimentos, o trabalho pode ser dividido em três grupos: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental e estudo de caso.

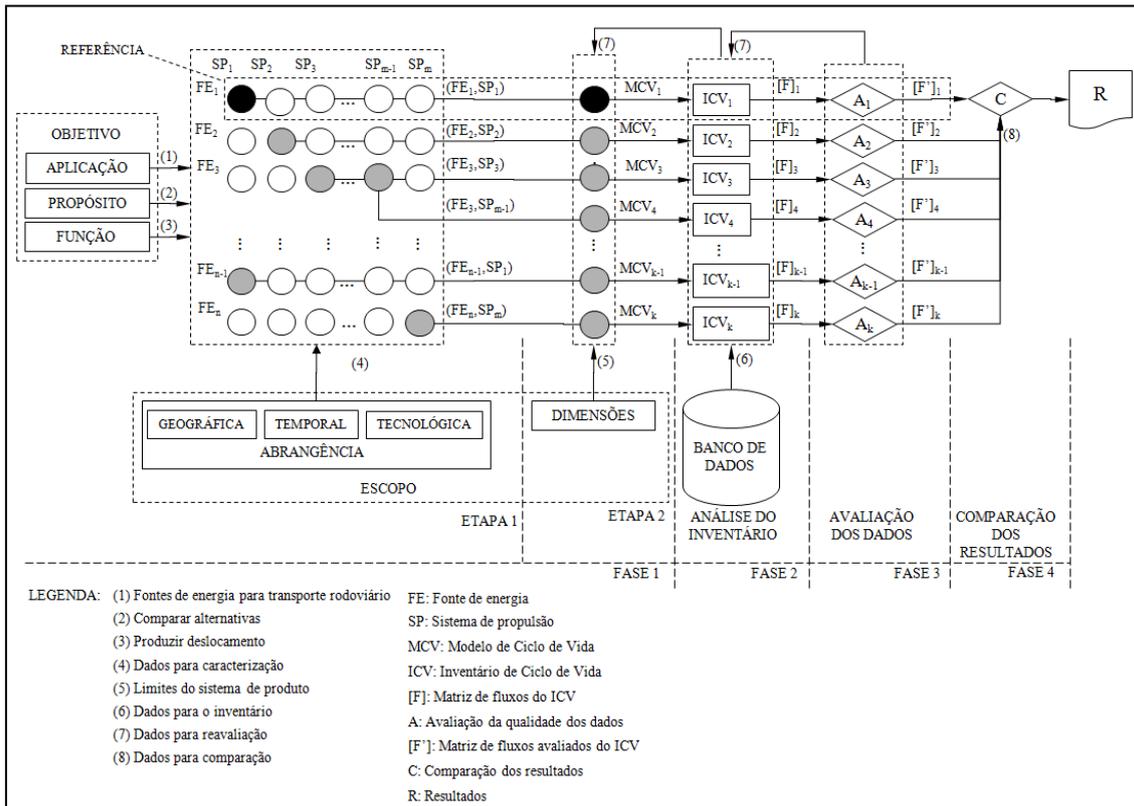
### 3.2. Metodologia Aplicada de ICV

Para que se tenha uma visão sistêmica dos impactos ambientais provocados por determinados métodos produtivos é recomendável a realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta técnica é normatizada internacionalmente pela ISO 14.040, que já possui similar nacional, a NBR ISO 14.040 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura, publicada em 2011 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Esta técnica possui quatro etapas: objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados.

Na prática, é comum a aplicação da ACV de forma parcial, optando-se pela realização de um Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Um ICV é composto pelas duas primeiras etapas de uma ACV: definição de objetivo e escopo e análise do inventário. Usualmente esta técnica é utilizada para analisar as cadeias de produção e consumo, desde a extração de recursos até a disposição final do resíduo associado. Algumas vezes, contudo, um ICV pode ser restrito ao processo dentro das companhias, realizando um estudo “do berço ao portão da indústria” (VERSCHOOR e REIJNDERS, 1999).

Tendo isto em vista, mostrou-se adequada a realização de um Inventário de Ciclo de Vida do pneu inservível tendo como destino final a queima em fornos de clínquer. Além disso, para fins de comparação, também foi realizado um ICV do coque de petróleo utilizado para queima em cimenteiras. Para estas análises, foi utilizado o procedimento proposto por D'AGOSTO e RIBEIRO (2009).

O procedimento em questão considera 4 fases para analisar os *inputs* e os aspectos ambientais do ciclo de vida de um produto. A Figura 4 resume o procedimento proposto por D'AGOSTO e RIBEIRO (2009), seguindo a aplicação realizada pelos autores para o caso da cadeia de suprimentos de combustíveis de transporte. A Fase 1 consiste na definição do escopo do trabalho, podendo ser dividida em duas etapas: definição da abrangência e das dimensões. Em seguida, deve-se realizar a coleta de dados, sendo esta a Fase 2 (análise do inventário). Na Fase 3 é realizada a avaliação da qualidade dos dados do ICV. Por fim, realiza-se a comparação dos resultados obtidos (Fase 4).



**Figura 4:** Procedimento adotado para realização do Inventário de Ciclo de Vida aplicado para o caso de combustíveis de transporte. (Fonte: D'AGOSTO e RIBEIRO, 2009)

A aplicação do procedimento descrito na Figura 4 tem como propósito a comparação das emissões de CO<sub>2</sub> dos ciclos de vida do pneu inservível e do coque de petróleo, cuja função é produzir calor para o forno de clínquer.

### 3.3. Metodologia Aplicada para a Estimativa das Emissões de CO<sub>2</sub>

Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> nas diversas etapas dos ciclos de vida, foram utilizadas metodologias diversas, de acordo com as informações disponíveis para cada processo. Deu-se prioridade ao emprego de fatores de emissão consolidados para os combustíveis e ao consumo dos mesmos em cada etapa. No entanto, por causa da especificidade e complexidade de alguns processos, nem sempre foi possível seguir esta linha. Devido às particularidades de cada processo e na ausência de uma metodologia única, as formas como foram feitas as estimativas foram descritas à medida que foram apresentados os resultados, no próximo capítulo, de modo a facilitar a compreensão e a leitura.

### 3.4. Fontes de Dados para o Estudo de Caso

Os dados utilizados para o desenvolvimento do estudo de caso, tanto do ciclo de vida do pneu inservível quanto do coque de petróleo, foram obtidos em relatórios

técnicos e corporativos mencionados na referência bibliográfica e citados ao longo do texto, bem como em entrevistas semi direcionadas com funcionários da Lafarge Brasil S.A., que tinham posições estratégicas e experiência nas suas funções para fornecer dados consistentes.

A primeira entrevista realizada foi com Mariana Lazarini, Especialista de Suprimentos, que contribuiu com informações sobre a cadeia logística do coque. A segunda entrevista foi com Roberto Mendes, Gerente de Processo e Performance Industrial, que por ter grande experiência no setor cimenteiro pode dar informações não só sobre o coprocessamento, mas também sobre outras partes do processo e da indústria.

Além disso, foi proporcionada uma visita de campo à unidade de trituração de pneus da CBL, em Nova Iguaçu. Lá, pode-se vivenciar o processo de descaracterização do pneu. Ainda na unidade, para obtenção dos dados relacionados à logística do pneu picado até a fábrica de Cantagalo e dos processos de descarga no local, foram entrevistados dois motoristas da empresa Del Pozo Transportes Rodoviários, que trabalham exclusivamente nesse trajeto.

Outra contribuição importante veio das entrevistas com Yuka Akasaka, Especialista de Suprimentos, que além de fazer a conexão entre os autores e a Lafarge Brasil S.A., forneceu informações sobre a cadeia logística do coque de petróleo.

Ademais, dados sobre empilhadeiras industriais de garfo movidas a gás liquefeito de petróleo (GLP) foram fornecidos por Maurício Silveira, Diretor Executivo da empresa Atômica Logística.

Por fim, especificamente para os dados sobre o transporte marítimo para importação do coque de petróleo e seu desembarque no terminal portuário de Praia Mole, foi realizada uma entrevista semi direcionada com Vito Longhi Rodrigues, Analista de Soluções Logísticas da Vale S.A.

Tendo isto em vista, foi possível desenvolver o estudo de caso, aplicando as metodologias de ICV e cálculo de emissões de CO<sub>2</sub> proposta, conforme desenvolvido no Capítulo 4 a seguir.

#### **4. APLICAÇÃO E RESULTADOS**

Para aplicação da metodologia proposta, é necessário que se defina em detalhes os ciclos de vida em estudo. Desta forma, optou-se pela realização de um estudo de caso, descrito na seção 4.1. Esta escolha foi motivada pela possibilidade de maior

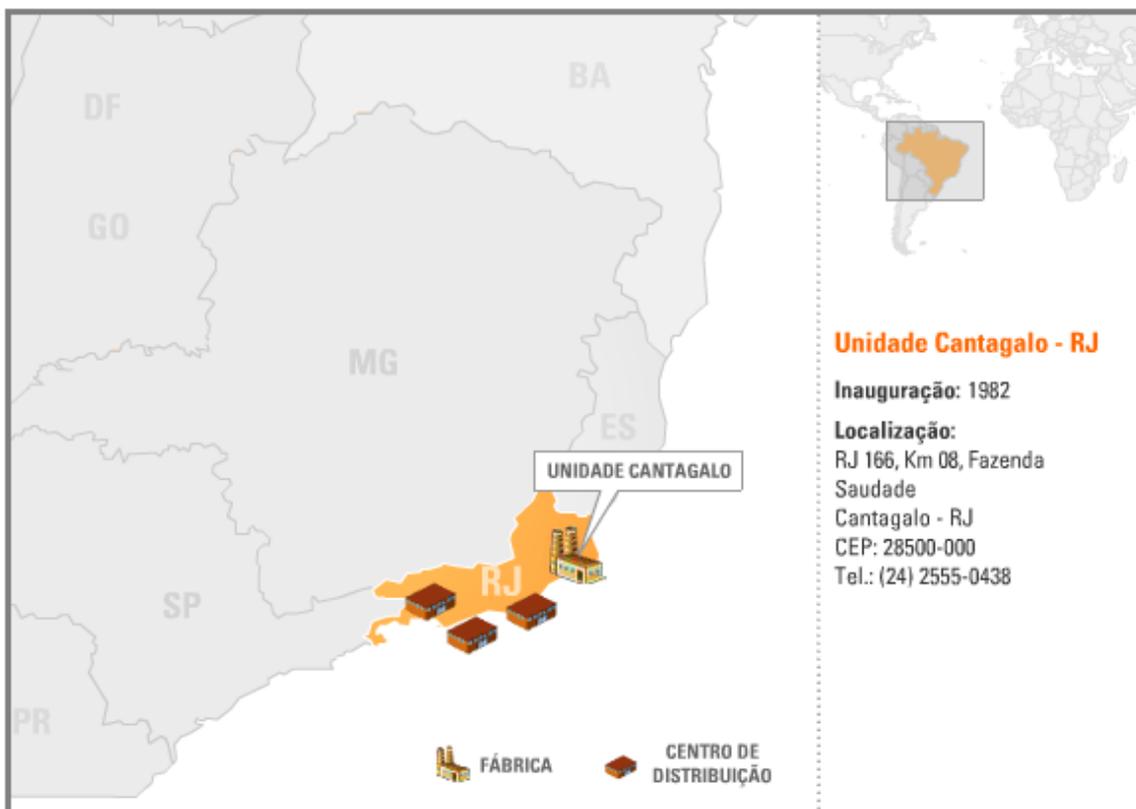
refinamento das cadeias, com disponibilidade de dados, devido à oportunidade de acesso à Lafarge Brasil S.A..

No item 4.2 é aplicado o procedimento para realização do ICV. Neste item, os ciclos de vida do pneu inservível e do coque de petróleo são descritos em detalhes, assim como o cálculo realizado para estimativa das emissões de CO<sub>2</sub>. Devido à sua robustez, esta seção foi dividida em subitens condizentes com as quatro etapas previstas na metodologia de D'AGOSTO e RIBEIRO (2009).

A seção 4.3 realiza, por fim, a análise de sensibilidade com base nos resultados obtidos na seção anterior. Esta análise foi dividida em três cenários que avaliam variáveis distintas, sendo estas o poder calorífico do pneu inservível, o seu fator de emissão e o tipo de navio adotado no transporte marítimo do coque. Com isso, foi possível avaliar a influência dessas variáveis e a consistência dos resultados apresentados no item 4.2.

#### 4.1. Estudo de Caso

O estudo de caso escolhido para este trabalho compreende a fábrica de cimento da Lafarge Brasil S.A., localizada na cidade de Cantagalo, no estado do Rio de Janeiro, conforme pode ser visto no mapa da Figura 5.



**Figura 5:** Mapa de localização da fábrica de cimento da Lafarge Brasil S.A., em Cantagalo - RJ. (Fonte: LAFARGE BRASIL S.A., 2013).

A Lafarge é uma empresa líder mundial em materiais de construção, com desempenho de destaque em todos os seus produtos, sendo estes o cimento, concreto e agregados e o gesso. A empresa registrou um faturamento de 15,9 bilhões de euros em 2012, com 141 milhões de toneladas de cimento vendidas. Em 2010, pelo sexto ano consecutivo, figurou na lista das "100 Empresas mais Sustentáveis do Mundo" pela Coporate Knights, revista canadense dedicada à promoção de práticas que levem a negócios responsáveis e ao avanço da sustentabilidade socioambiental.

Presente no Brasil desde 1959, a Lafarge tem aproximadamente 1,2 mil empregados e um parque industrial distribuído nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Pernambuco. Na divisão Cimento, a empresa conta com fábricas nas cidades de Arcos, Matozinhos, Montes Claros e Santa Luzia, em Minas Gerais, e em Cantagalo, no Rio de Janeiro. Uma de suas marcas mais conhecidas do mercado é o cimento Mauá.

A unidade de Cantagalo foi inaugurada em fevereiro de 1982 com o objetivo de ampliar a produção do cimento Mauá e foi a primeira unidade da Lafarge no Brasil a realizar o co-processamento de resíduos em fornos de cimento, prática desenvolvida desde o primeiro semestre de 2002 (LAFARGE, 2004).

A cadeia logística reversa praticada por esta unidade da Lafarge Brasil S.A. considera o pneu inservível coletado pela RECICLANIP e direcionado para a CBL, empresa que realiza a trituração deste resíduo, localizada no município de Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. Já a cadeia logística do coque considera a produção deste subproduto do petróleo nos Estados Unidos da América, sendo exportado por portos do Golfo do México e importado pelo porto de Praia Mole, em Vitória, no estado do Espírito Santo.

O destino final dos dois insumos é o forno de clínquer da cimenteira localizada em Cantagalo. Segundo levantamento feito por SOUZA (2011), as fábricas de cimento do estado do Rio de Janeiro localizam-se na cidade de Cantagalo, sendo o trabalho, portanto, aderente a diferentes realidades.

#### **4.2. Aplicação da Metodologia de ICV**

Tendo em vista o estudo de caso proposto, faz-se necessário aplicar o procedimento metodológico apresentado no capítulo anterior. Assim, o item 4.2.1 e os subitens 4.2.1.1 e 4.2.1.2 apresentam o escopo do ICV, definindo a abrangência e as dimensões do trabalho, sendo fundamental para o entendimento do que foi considerado no estudo.

Já o item 4.2.2 e seus respectivos subitens apresentam o ciclo de vida detalhado do pneu inservível e do coque de petróleo, assim como todos os cálculos realizados para a obtenção do resultado final de emissão de CO<sub>2</sub>.

A seção 4.2.3 consiste na etapa de avaliação dos dados, que visa dar consistência aos dados utilizados na etapa de análise do inventário. Finalmente, no item 4.2.4 faz-se a comparação dos resultados.

#### 4.2.1. Fase 1: Escopo

A fim de alcançar o objetivo estipulado é necessário definir o escopo da análise, devendo ser determinadas a abrangência, a partir dos limites geográficos, temporais e tecnológicos, e as dimensões do estudo (comprimento, profundidade e largura). Assim, a definição do escopo foi dividida nestas duas etapas, conforme pode ser visto a seguir.

##### 4.2.1.1. Etapa 1: Abrangência

No que se refere à abrangência temporal, geográfica e tecnológica que se pretende dar à análise de cada alternativa, é prática que esta se limite ao estudo de uma região específica, no momento presente, quando se dispõe de tecnologia representativa desta situação (D'AGOSTO, 2004).

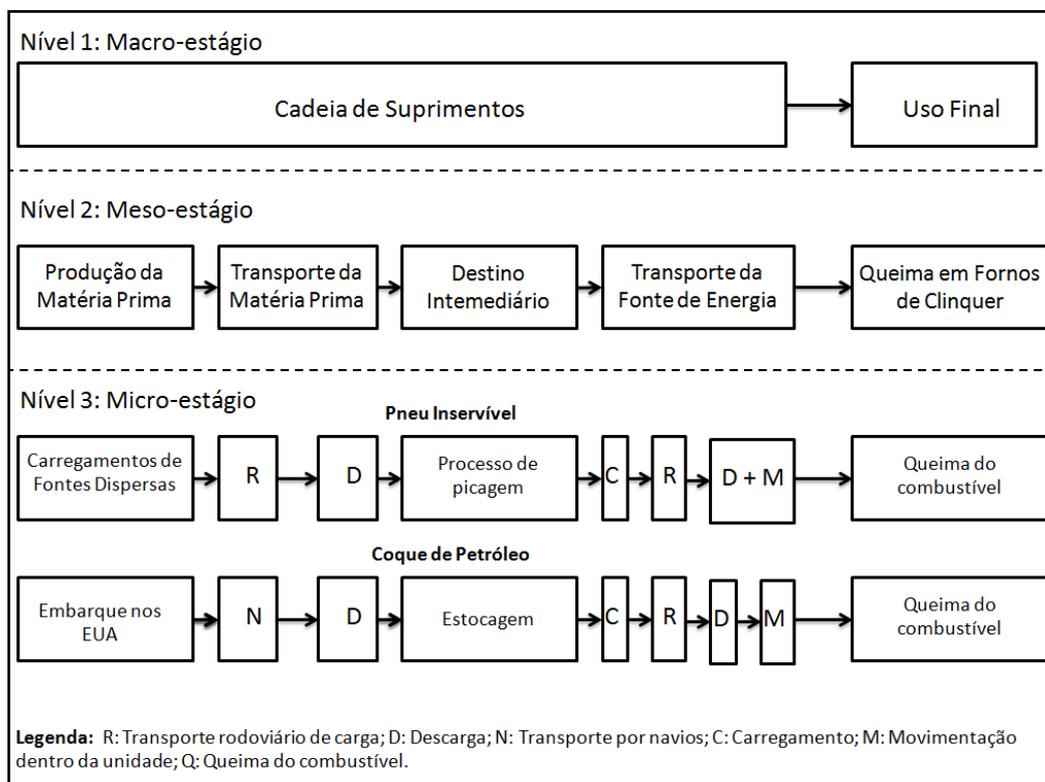
Como as tecnologias de processamento, transporte e produção tanto do coque quanto do pneu inservível não sofreram muitas alterações recentemente, foram considerados dados produzidos nos últimos 20 anos. Isto define tanto os limites temporais quanto tecnológicos do trabalho. A abrangência geográfica é delimitada pelo próprio estudo de caso.

##### 4.2.1.2. Etapa 2: Dimensões

As dimensões do estudo envolvem a definição da largura, profundidade e comprimento que se pretende dar ao Inventário de Ciclo de Vida. O comprimento definido para o ciclo de vida de ambos os produtos foi do “berço ao túmulo”. É recomendável que se defina uma estrutura modular, considerando três níveis de detalhamento para o comprimento, sendo estes macro, meso e micro estágios. Por meio desta abordagem, pode se realizar refinamentos sucessivos à medida que se disponha de um maior detalhamento dos estágios e dos processos (D'AGOSTO e RIBEIRO, 2009).

Assim, os níveis de detalhamento adotados neste estudo podem ser vistos na Figura 6. As comparações entre os ciclos de vida do coque e do pneu inservível,

conforme descritos, foram realizadas por meso-estágio, uma vez que os processos do micro-estágio são específicos para cada ciclo de vida.



**Figura 6:** Níveis de detalhamento do modelo de ciclo de vida. (Fonte: Elaboração Própria)

A largura definida é de nível 2, pois foram computadas as emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes diretamente do processo estudado e as relacionadas à produção da fonte de energia utilizada no processo. Refinamentos podem ser obtidos considerando-se o nível 3 (insumos e cargas ambientais para produção dos insumos de nível 2 e bens de capital) (D'AGOSTO, 2004).

Já em relação à profundidade, o escopo foi limitado à análise de emissões do CO<sub>2</sub>. Este gás foi escolhido por ser o principal contribuinte para a acentuação do efeito estufa na Terra (IPCC, 1995).

#### 4.2.2. Fase 2: Análise do inventário

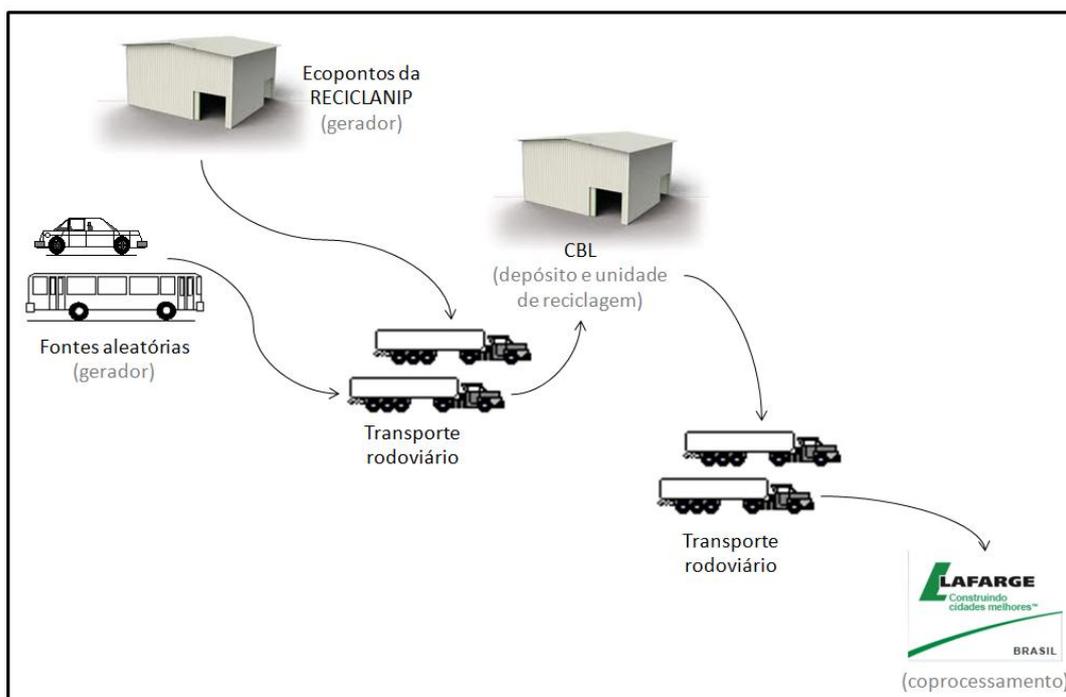
Nesta etapa, faz-se necessário detalhar os ciclos de vida para, em seguida, serem apresentados os dados de emissões de cada etapa. Assim, foi feita uma pesquisa bibliográfica dos fatores de emissão das diversas fontes nas diversas etapas dos processos. Foram priorizados os dados mais próximos possíveis da realidade estudada, seguido por dados consolidados internacionalmente e dados estimados.

Dessa forma, foi possível comparar as emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida dos dois combustíveis estudados.

#### 4.2.2.1. Ciclo de Vida do Pneu Inservível

A Figura 7 mostra o ciclo de vida do pneu inservível para o estudo de caso e as etapas que foram consideradas para o cálculo da emissão final. A nomenclatura adotada entre parênteses faz a correlação entre este caso específico e o modelo conceitual exposto na Figura 3.

É importante ressaltar que o pneu inservível foi considerado como um resíduo que deve ser disposto corretamente, tendo no seu reaproveitamento como combustível um destino mais adequado que o descarte indiscriminado. Por isso, não foram consideradas as emissões provenientes do processo produtivo e logístico do pneu em sua vida útil.



**Figura 7:** Estrutura principal do ciclo de vida do pneu inservível para o estudo de caso (Fonte: Elaboração Própria).

O início da cadeia foi definido como sendo o carregamento, nos “ecopontos” ou nas fontes aleatórias, dos veículos que realizam o transporte dos pneus inservíveis até a unidade de processamento (CBL). Esse processo tem origem em fontes dispersas tendo como principal contribuição os “ecopontos” da RECICLANIP, que são responsáveis por 95% da quantidade total de pneus inservíveis triturados na CBL. Os “ecopontos” são destinos intermediários que armazenam pneus inservíveis

provenientes de diversas fontes, visando a otimização da sua cadeia logística reversa (MENDES, 2013).

Segundo a RECICLANIP (2013), havia 743 pontos de coleta de pneus inservíveis espalhados pelo Brasil em 2012, número que vem aumentando. Os dados disponíveis no site da instituição indicam 33 “ecopontos” localizados no Rio de Janeiro. Segundo MENDES (2013), os “ecopontos” fornecedores da CBL encontram-se a até 70 km de distância da mesma. Assim, apenas os que estavam dentro deste raio foram incluídos no estudo de caso, estando estes listados na Tabela 4. A outra fração de pneus inservíveis que chega à CBL (5%) é proveniente de fontes aleatórias.

**Tabela 4:** Lista dos pontos de coletas que abastecem a unidade de processamento da CBL.

<b>Empresa</b>	<b>Endereço</b>	<b>Município</b>	<b>Distância até a CBL (km)</b>
Della Via	Rodovia Presidente Dutra, 10726	Belford Roxo	17
Pneuac	Avenida Brigadeiro Lima e Silva, 1627 - Jardim 25 De Agosto	Duque de Caxias	32
-	Estrada do Piranema, 131 - Califórnia	Itaguaí	39
Marca Ambiental	Rua Pierre Medavar	Magé	70
-	Avenida Coelho da Rocha, 1426 - Rocha Sobrinho	Mesquita	16
Perfect Pneus	Rua Antonio Jose Bittencourt, 50	Nilópolis	12
	Rua Leonor da Glória S/Nº, Largo Da Batalha	Niterói	64
-	-	Piraí	56
Della Via	Rodovia Presidente Dutra, Km 198,5	Queimados	14
-	Rua Américo de Souza Braga, 647 - Jacarepaguá	Rio de Janeiro	43
-	Avenida Automóvel Clube, 1574	São João de Meriti	20

(Fonte: Adaptado de IBAMA (2011) e RECICLANIP (2013)).

O destino dos pneus inservíveis advindos dessas fontes é a unidade de Nova Iguaçu da CBL, onde o pneu inservível é picado. A CBL é a única recicladora que abastece a fábrica de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A. (MENDES, 2013).

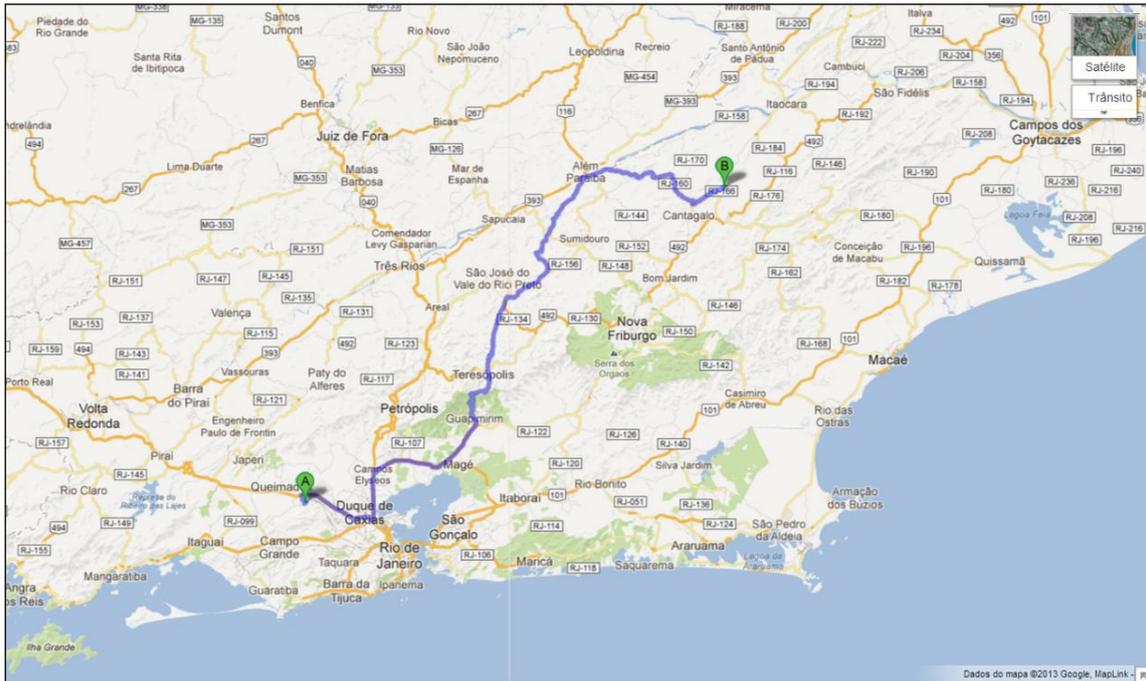
Segundo a LAFARGE (2010), 2,4 milhões de pneus são triturados por ano na unidade de Nova Iguaçu. A quantidade queimada nos fornos de Cantagalo é de 12 mil toneladas por ano (MENDES, 2013). Entretanto, para se chegar aos 2,4 milhões de pneus triturados, deve-se considerar que o pneu utilizado na queima já teve parte do

seu aço retirado durante o processo de trituração. De acordo com NOVICKI e MARTIGNONI (2010) *apud* SOUZA (2011), 11% do peso do pneu é constituído por aço, considerando o existente na banda de rodagem e no talão do pneu. Com isso, a quantidade anual de pneus que chega à CBL tendo como origem os “ecopontos” ou as fontes aleatórias é de 13,5 mil toneladas.

Uma vez dispostos na unidade, os pneus passam por um processo de trituração. O equipamento utilizado nesse processo tritura o pneu, separando boa parte do aço contido em sua estrutura, que é vendido para a indústria siderúrgica. O pneu triturado, que contém um pouco de aço residual, é estocado ao ar livre até ser recolhido por caminhões para ser levado à unidade de Cantagalo.

Esse traslado é feito pela empresa terceirizada Del Pozo Transportes Rodoviários, que o faz com quatro veículos combinados do tipo caminhão trator 6x4 marca Volvo e semi-reboque graneleiros, bitrem, com tampa lateral, que são capazes de transportar 30 toneladas de pneu picado ou 35 de cimento, aproximadamente. Atualmente, dois desses veículos tem potência máxima de 440 hp, enquanto os outros dois tem 400 hp. No entanto, a empresa está renovando a sua frota e, pelo planejamento, todos os caminhões serão de 440 hp em breve (SILVA E MENDES, 2013). Por isso, foram considerados para este estudo de caso os quatro caminhões com esta potência.

O percurso da CBL Nova Iguaçu até a unidade de Cantagalo consiste em aproximadamente 250 quilômetros e está indicado na Figura 8. Não foi considerada a distância percorrida de retorno para CBL desses caminhões, uma vez que os mesmos são utilizados para transportar cimento de Cantagalo para o centro de distribuição da Lafarge Brasil S.A., em Nova Iguaçu. Este centro de distribuição localiza-se a uma distância de menos de 200 metros da CBL. Desta forma, a distância que os caminhões percorrem para chegar à CBL foi desconsiderada deste estudo de caso.



**Figura 8.** Rota utilizada para o trajeto Nova Iguaçu - Cantagalo. (Fonte: *Software Google Maps, 2013*).

Chegando em Cantagalo, o pneu é descarregado com uma pá carregadeira e levado a um *bunker*<sup>2</sup>, de onde vai para o forno, através de um correia transportadora. Finalmente, este pneu triturado é utilizado como combustível para produção do clínquer, substituindo parcialmente o coque (MENDES, 2013).

#### 4.2.2.2. Emissões do Ciclo de Vida do Pneu Inservível

A partir da definição do ciclo de vida do pneu, é realizado, nesta seção, o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> referentes aos processos descritos anteriormente. Para isso, o ciclo de vida foi dividido em oito partes: carregamento dos caminhões, transporte rodoviário até unidade da CBL, descarga dos caminhões, processo de trituração, carregamento dos caminhões, transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo, descarregamento dos caminhões e movimentações dentro da unidade e queima do combustível para fabricação do clínquer.

##### a) Carregamento dos caminhões

O carregamento dos caminhões que fazem o transporte dos pneus inservíveis para a CBL, tanto dos “ecopontos”, quanto das fontes aleatórias, supõe-se ser feito apenas com força humana. Portanto, não há nenhuma emissão atribuída a esta etapa.

<sup>2</sup> Local para armazenamento subterrâneo.

b) Transporte rodoviário até a unidade da CBL

Para o cálculo das emissões veiculares do transporte foi considerado um aporte uniforme de pneus inservíveis inteiros de todas as fontes dispersas que abastecem a unidade de processamento estudada.

Assim, foi adotada a premissa de que os pneus inservíveis inteiros provenientes dos 11 “ecopontos” estão igualmente distribuídos entre eles. A partir disso, fez-se uma média ponderada, pela quantidade de pneus proveniente de cada “ecoponto”, da distância de cada um até a CBL para se obter uma distância equivalente para cálculo, o que resultou em 35 km.

Para o cálculo dos outros 5% de pneus inteiros, advindos da fração aleatória, considerou-se que depositam os pneus inteiros na unidade recicladora apenas aqueles que estiverem mais perto dela do que dos “ecopontos”, isto é, a uma distância de até 17,5 km. Assim, supôs-se que a média da distância entre estes geradores e a CBL é igual à metade da distância máxima, o que concorre para um valor médio percorrido de 8,75 km.

Além disso, deve-se considerar as especificações dos veículos que fazem esse transporte. São utilizados dois tipos: caminhão baú, que transporta até sete toneladas de pneus inteiros, e caminhão gaiola, até oito toneladas (MENDES, 2013). Assim, optou-se por considerar cada um deles como responsável por metade do transporte. Essa aproximação influencia no número de viagens, já que a emissão de CO<sub>2</sub> é praticamente a mesma para os dois modelos de caminhão.

Adicionalmente foram considerados dois fatores: o consumo médio dos veículos utilizados e o fator de emissão do combustível usado para o abastecimento. Para isso, foram utilizadas as informações disponíveis no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2011) e no Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro (D’AGOSTO *et al.*, 2011). A eficiência dos caminhões foi retirada da segunda fonte, por apresentar dados mais adequados à realidade do Rio de Janeiro.

Assim, os veículos descritos para esse transporte são considerados caminhões leves, com uma eficiência média de 3,9 km/l (D’Agosto *et al.*, 2011) e fator de emissão de 2,671 kgCO<sub>2</sub>/l de diesel (MMA, 2011). Utilizando a equação 1 considerando 1710 viagens dos pontos de coleta até a CBL e 90 viagens das fontes aleatórias até este mesmo local, obteve-se uma emissão total de 43,1 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$1) \quad d_1 \times \left( \frac{n_v}{e_{CA}} \right) \times \frac{k_{DIE}}{1000} = E_1$$

Sendo:

$d_1$  = distância média dos ecopontos ou das fontes aleatórias até a CBL (km);

$n_V$  = número de viagens realizadas no trajeto (ano<sup>-1</sup>);

$e_{CA}$  = eficiência dos caminhões (km/l);

$k_{DIE}$  = fator de emissão do diesel (kgCO<sub>2</sub>/l);

$E_1$  = emissões de nível 1 do transporte rodoviário até a CBL (tCO<sub>2</sub>/ano).

Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> de nível 2 do diesel, deve-se considerar também o que foi emitido para sua produção e distribuição. Isto inclui as emissões da extração e produção do petróleo, do seu transporte até a refinaria, do refino e do transporte até o uso final. Baseado em D'AGOSTO (2004), obteve-se que o total emitido por essas quatro etapas é de 396,5 quilogramas de CO<sub>2</sub> por tonelada de diesel consumida (kgCO<sub>2</sub>/t), considerando 50% petróleo importado do Oriente Médio e 50% produzido na bacia de Campos, com ambos refinados na REDUC<sup>3</sup> e adotando sempre os valores médios desta referência.

Portanto, sabendo que a densidade do diesel metropolitano é 0,82 a 0,865 kg/l (D'AGOSTO, 2004) e adotando o valor médio de 0,843 kg/l, pode-se aplicar a equação 2, obtendo-se uma emissão de 5,4 tCO<sub>2</sub>/ano no 2º nível deste elo da cadeia.

$$2) \quad \{[(d_2/e_{CA}) \times (d_{DIE}/1000)] \times (k_{PDIE})\} / 1000 = E_2$$

Sendo:

$d_2$  = distância percorrida total (km/ano);

$e_{CA}$  = eficiência de consumo para caminhões pesados (km/l);

$k_{PDIE}$  = fator de emissão de nível 2 do diesel utilizado no Brasil (kgCO<sub>2</sub>/t);

$d_{DIE}$  = densidade média do diesel metropolitano (kg/l);

$E_2$  = emissões de nível 2 do transporte rodoviário até a CBL (tCO<sub>2</sub>/ano).

Finalmente, somando-se todas as emissões decorrentes deste transporte, obteve-se 48,5 tCO<sub>2</sub>/ano.

### c) Descarregamento na CBL

A partir do momento em que os pneus chegam à unidade de reciclagem são descarregados, demandando apenas força humana. Em seguida é utilizada uma empilhadeira para dispô-los no galpão de estocagem (MENDES, 2013). Com isso, a única fonte de emissão é a empilhadeira.

<sup>3</sup> Refinaria da Petrobras S.A., localizada no município de Duque de Caxias, no estado do Rio de Janeiro.

Para calcular as emissões desta etapa foi considerada uma empilhadeira genérica movida a gás liquefeito de petróleo (GLP). Segundo os dados obtidos, o seu fator de consumo é de 0,06 quilogramas de GLP por tonelada movimentada (SILVEIRA, 2013). Segundo EGGLESTON, BUENDIA *et al* (2006a), o poder calorífico deste combustível é de 47,3 MJ/kg e seu fator de emissão é de 63,1 kgCO<sub>2</sub>/MJ.

Considerando o aporte total de 13.500 toneladas de pneus inservíveis inteiros, obteve-se 2,4 tCO<sub>2</sub>/ano como emissão de nível 1, a partir da aplicação da equação 3.

$$3) \quad C_e \times P_p \times \frac{k_{GLP}}{1000} \times PC_{GLP} = E_3$$

Sendo:

$C_e$  = fator de consumo da empilhadeira (kgGLP/t);

$P_p$  = peso total de pneus movimentados (t/ano);

$k_{GLP}$  = fator de emissão do GLP (kgCO<sub>2</sub>/MJ);

$PC_{GLP}$  = poder calorífico do GLP (MJ/kgGLP);

$E_3$  = emissões de nível 1 do descarregamento na CBL (tCO<sub>2</sub>/ano).

Para calcular as emissões de nível 2 deve-se considerar a produção e distribuição do GLP. Não foram obtidos, entretanto, todos os valores necessários para este cálculo, sendo uma limitação deste trabalho. Com isso, o total de emissões é aquele calculado para o nível 1.

#### *d) Processo de trituração*

O picador utilizado para trituração do pneu inservível foi projetado especificamente para essa unidade da CBL. Ele é composto por duas esteiras, um moinho de facas e um separador magnético. Os pneus inservíveis inteiros, colocados na esteira por operadores, são conduzidos para o moinho de facas, onde são picados. Em seguida, o pneu já triturado passa por um separador magnético, havendo a separação de parte do aço que o compõe. Por fim, os pneus picados são conduzidos por outra esteira para serem lançados, formando uma pilha. Todo este conjunto opera a uma potência de 1 MW (MENDES, 2013).

Por ser um equipamento movido à energia elétrica, não há emissão de CO<sub>2</sub> na sua operação, sendo zero sua emissão de nível 1. Para o cálculo das emissões de nível 2, deve-se considerar a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pela eletricidade utilizada como energia para esse equipamento. Para isto, foram adotados os fatores médios de emissão do *grid* brasileiro, de acordo com MCTI (2008).

Foram utilizados os dados referentes às médias anuais, em kgCO<sub>2</sub>/MWh, de 2006 até 2012, além dos três primeiros meses de 2013, resultando em 53,4 kgCO<sub>2</sub>/MWh. O objetivo desta média foi abranger diferentes cenários da matriz energética brasileira, variando entre períodos nos quais havia grande participação de fontes renováveis na oferta de energia e outros, como o primeiro trimestre de 2013, em que houve grande participação de fontes não renováveis, como as termelétricas.

Além disso, foi considerado como tempo de funcionamento do picador a jornada semanal de trabalho de 40 horas, uma vez que a sua alimentação dá-se a partir da força humana. Com a aplicação das equações 4, obtém-se uma emissão de 111,2 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$4) \quad \frac{k_{GRID}}{1000} \times P_{pic} \times t_{trab} = E_4$$

Sendo:

$P_{pic}$  = potência do picador (MW);

$t_{trab}$  = tempo de funcionamento do picador (h/ano);

$k_{GRID}$  = fator de emissão médio do *grid* brasileiro (kgCO<sub>2</sub>/MWh);

$E_4$  = emissões de nível 2 do processo de trituração (tCO<sub>2</sub>/ano).

#### e) Carregamento dos caminhões

Após a formação das pilhas, os pneus inservíveis triturados precisam ser carregados a fim de serem transportados para Cantagalo. Para o carregamento dos caminhões, usa-se uma pá carregadeira (MENDES, 2013). Devido à ausência de especificações sobre este equipamento, optou-se por calcular as emissões deste processo através de uma estimativa baseada nos dados fornecidos pelo inventário de emissões atmosféricas do porto de Long Beach, na Califórnia.

Esta abordagem foi adotada porque estes dados foram utilizados para o cálculo da pá empilhadeira no ciclo de vida do coque de petróleo, conforme descrito no item 4.2.2.4 letra a).

Neste porto, as emissões de nível 1 das pás carregadeiras movidas a diesel foram de 293,0 tCO<sub>2</sub> ao ano, correspondentes à operação de 15 pás, resultando em 19,5 tCO<sub>2</sub> ao ano para cada uma.

A ausência de emissões de nível 2 no inventário de Long Beach é uma limitação do trabalho. Porém, apesar de não se conhecer o consumo total de diesel do processo, pode-se assumir que, como o abastecimento deste equipamento é feito com

diesel comercializado no Brasil, a proporção entre as emissões de nível 1 e 2 permanece a mesma dos processos anteriores similares.

Assim, analisando os resultados encontrados no item 4.2.2.2.b), obtém-se que as emissões de nível 2 correspondem a 12,5% daquelas de nível 1. Isto concorre para uma emissão de nível 2 de 2,4 tCO<sub>2</sub>/ano emitidas pelas pás carregadeiras no carregamento dos caminhões.

Finalmente, as emissões totais calculadas, somando as de nível 1 com as de nível 2 resultam em 21,9 tCO<sub>2</sub>/ano.

*f) Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo*

São transportadas aproximadamente doze mil toneladas de pneu triturado por ano para Cantagalo. Além disso, os dados coletados em campo indicaram um transporte total de 250 toneladas de pneu triturado nas últimas nove viagens realizadas, resultando em uma média de 27,7 toneladas por viagem (SILVA e MENDES, 2013). Apesar da informação de fábrica do caminhão indicar uma capacidade de carregamento de 30 toneladas por viagem, foi utilizado o valor observado em pesquisa de campo, buscando uma maior aderência ao estudo de caso realizado. Assim, são realizadas 434 viagens por ano.

Devido ao tipo de veículo, de trajeto – predominantemente em active - e devido ao peso quando está totalmente carregado com pneu picado, o consumo médio obtido foi de 1 litro de diesel para, aproximadamente, 2,0 quilômetros percorridos, resultando em um fator de consumo de 0,5 l/km (SILVA e MENDES, 2013). Com esses dados, tem-se um consumo total de 140 litros no trajeto de 250 km entre a CBL e a unidade de Cantagalo.

Conforme apresentado anteriormente, o fator de emissão do diesel é de 2,671 kgCO<sub>2</sub>/l (MMA, 2011). Aplicando a equação 5 e considerando os dados apresentados, tem-se uma emissão anual de 144,9 toneladas de CO<sub>2</sub>.

$$5) \quad d_5 \times n_v \times C_{ca} \times \frac{k_{DIE}}{1000} = E_5$$

Sendo:

$d_5$  = distância da CBL até Cantagalo (km);

$n_v$  = número médio de viagens necessárias para o transporte do pneu picado (ano<sup>-1</sup>);

$C_{ca}$  = fator de consumo do caminhão utilizado (l/km);

$k_{DIE}$  = fator de emissão do diesel (kgCO<sub>2</sub>/l).

$E_5$  = emissões de nível 1 do transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo (tCO<sub>2</sub>/ano).

Para o cálculo das emissões de nível 2 foi utilizado o mesmo método do item b), com aplicação da equação 6. Estes cálculos resultam em 18,1 tCO<sub>2</sub>/ano para o nível 2.

$$6) \quad \{[(d_6/e_{CA}) \times (de_{DIE}/1000)] \times (k_{PDIE})\}/1000 = E_6$$

Sendo:

$d_6$  = distância percorrida total (km/ano);

$e_{CA}$  = eficiência do caminhão utilizado (km/l);

$de_{DIE}$  = densidade média do diesel metropolitano (kg/l);

$k_{PDIE}$  = fator de emissão de nível 2 do diesel utilizado no Brasil (kgCO<sub>2</sub>/t);

$E_6$  = emissões de nível 2 do transporte rodoviário até a CBL (tCO<sub>2</sub>/ano).

Com isso, tem-se uma emissão total de 163,0 tCO<sub>2</sub>/ano para o transporte dos pneus triturados até a unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A., considerando até nível 2.

*g) Descarregamento dos caminhões e movimentações dentro da unidade*

Ao chegar na unidade, os caminhões são descarregados. Os equipamentos que fazem a descarga (pás carregadeiras) e o transporte (correias transportadoras) do pneu triturado dentro da fábrica são elétricos e, por isso, tem apenas emissão de nível 2, que podem ser obtidas segundo a equação 7.

Segundo MENDES (2013), todos os equipamentos utilizados foram considerados como um só conjunto com potência aproximada de 5x10<sup>-3</sup> MW. Como ambos não param de funcionar, já que o abastecimento do forno é automático e constante, a operação desses equipamentos foi considerada ininterrupta. Além disso, para calcular a emissão foi utilizado o mesmo fator médio anual do *grid* brasileiro adotado no item d). Com isso, obteve-se uma emissão total de 2,3 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$7) \quad P_{equip} \times t_{equip} \times \frac{k_{GRID}}{1000} = E_7$$

Sendo:

$P_{equip}$  = potência dos equipamentos utilizados (MW);

$t_{equip}$  = tempo de funcionamento dos equipamentos (h/ano);

$k_{GRID}$  = fator de emissão médio do *grid* brasileiro (kgCO<sub>2</sub>/MWh);

$E_7$  = emissões de nível 2 das movimentações dentro da unidade (tCO<sub>2</sub>/ano).

*h) Queima do combustível*

De acordo com MENDES (2013), obteve-se que o poder calorífico do pneu queimado na unidade de Cantagalo corresponde a 80% do poder calorífico do coque. Esta constatação deve-se a aferições continuadas realizadas pela empresa para medir o poder calorífico dos diversos combustíveis que são utilizados para a fabricação do clínquer.

No entanto, não foi obtido o poder calorífico do coque de petróleo medido na planta de Cantagalo, o que é uma limitação deste trabalho. Assim, utilizou-se o valor fornecido pelo IPCC (2006a) para o poder calorífico líquido do coque de petróleo, que é de 32,5 MJ/kg. Com isso, o poder calorífico do pneu inservível adotado foi de 26 MJ/kg.

Já com relação ao fator de emissão de CO<sub>2</sub> do pneu, foi utilizado o dado consolidado da CSI (2011), sendo este de 85 kgCO<sub>2</sub>/GJ. Considerando a queima de 12 mil toneladas (12 Gg) anuais e aplicando a equação 8, obtém-se uma emissão de 26.520,0 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$8) \quad (PC_{\text{pneu}} \times k_{\text{pneu}} \times n_{\text{pneu}}) / 1000 = E_8$$

Sendo:

$PC_{\text{pneu}}$  = poder calorífico do pneu (MJ/kg);

$k_{\text{pneu}}$  = fator de emissão da queima do pneu picado no forno de clínquer (kgCO<sub>2</sub>/GJ);

$n_{\text{pneu}}$  = quantidade de pneu queimada no forno (t/ano);

$E_8$  = emissões de nível 1 da queima do pneu triturado (tCO<sub>2</sub>/ano).

Como não é considerada a produção do pneu inservível na elaboração deste ciclo de vida, não há emissão de nível 2 neste processo, sendo 26.520,0 tCO<sub>2</sub>/ano o total emitido.

Por fim, a Tabela 5 resume as emissões em cada etapa do ciclo de vida e indica o resultado final das emissões de CO<sub>2</sub> para o pneu inservível, totalizando 26.869,5 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por ano.

**Tabela 5:** Resumo das emissões do ciclo de vida do pneu inservível para o estudo de caso apresentado.

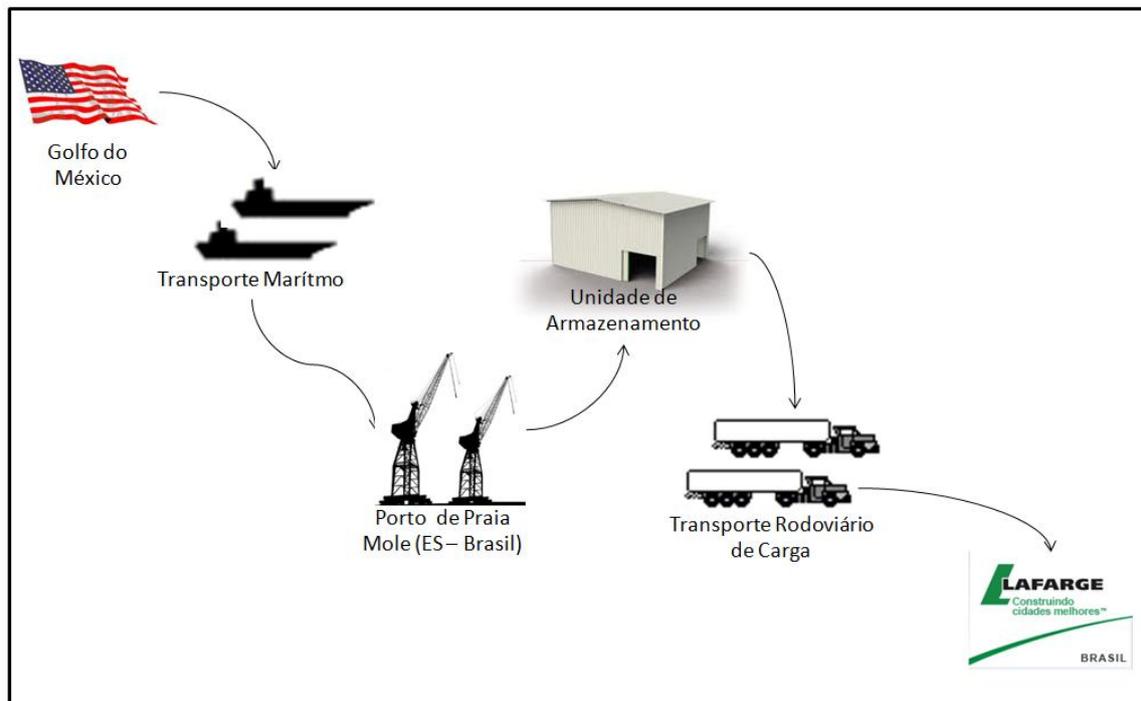
Meso-estágio	Micro-estágio	tCO <sub>2</sub> /ano
Produção da Matéria Prima	Carregamento dos caminhões	0,0
Transporte da Matéria Prima	Transporte rodoviário até a unidade da CBL	48,5
	Descarregamento na CBL	2,4
Destino Intermediário	Trituração e estocagem	111,2
Transporte da Fonte de Energia	Carregamento dos caminhões	21,9
	Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo	163,0
	Descarga dos caminhões e movimentação dentro da unidade	2,3
Queima em Fornos de Clínquer	Queima do combustível	26.520,0
<b>TOTAL</b>		<b>26.869,5</b>

(Fonte: Elaboração Própria)

#### 4.2.2.3. Ciclo de Vida do Coque de Petróleo

A Figura 9 ilustra todas as etapas do ciclo de vida do coque de petróleo para o caso da unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A.

A cadeia começa na importação do coque dos EUA, não tendo sido considerada a produção desta fonte de energia, uma vez que o coque de petróleo é um subproduto indesejado no processo produtivo de combustíveis *premium* (diesel, gasolina e querosene de aviação) e não incentivaria a prospecção e exploração de petróleo por si só. Por isso, muitas vezes suas emissões atmosféricas são computadas na produção dos combustíveis *premium* (UNITED STATES DEPARTMENT OF STATE, 2013).



**Figura 9:** Ciclo de vida do coque de petróleo específica para o estudo de caso. (Fonte: Elaboração Própria)

Segundo a *U.S. Energy Information Administration* (EIA) (2013), foram exportados cerca de 883 mil toneladas de coque de petróleo dos EUA em 2012. Somente a Lafarge Brasil S.A. importa aproximadamente 150 mil toneladas por ano para suas unidades no Sudeste. Em geral, o coque utilizado pelas unidades desta empresa é importado do Texas, nos EUA, através de portos localizados no Golfo do México.

Para importar essas 150 mil toneladas de coque são contratados, em geral, três navios por ano, trazendo 50 mil toneladas de coque cada. Para a unidade de Cantagalo é enviado, em média, 1/3 do montante total, ou seja, o equivalente a um navio por ano (LAZARINI, 2013).

Para realizar a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida deste combustível foi utilizado o montante substituído, em termos energéticos, pelos pneus inservíveis no forno de clínquer, o que equivale a 9.600 toneladas por ano.

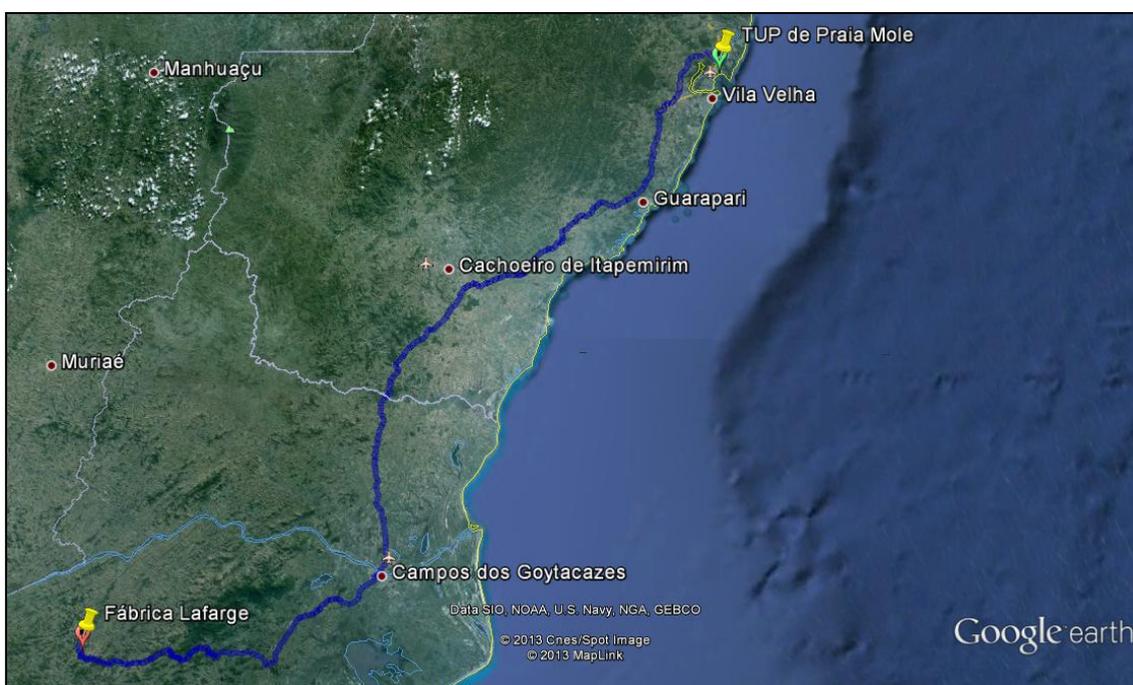
Esta fonte energética é comercializada a granel, não havendo containerização, sendo carregada nos navios com o auxílio de equipamentos como o *Ship Loader*. Assim, são navios graneleiros de grande porte, em geral do tipo *Handymax*, que fazem o transporte deste combustível. Esta carga chega ao Brasil através do terminal de Praia Mole, no Espírito Santo (LAZARINI, 2013). Este terminal é administrado pela Vale S.A., sendo destinado à movimentação de carvão, coque e cargas similares.

Este terminal de uso privativo (TUP) tem uma área de estocagem de aproximadamente um milhão de toneladas, servindo como um entreposto

intermediário entre a chegada do navio e o destino final do coque. Com a chegada e a atracação do navio em Praia Mole, é realizado o descarregamento do coque de petróleo. O terminal conta com quatro descarregadores de navio e três linhas de correias transportadoras, o que contribui para o seu bom desempenho, reduzindo os valores de *demurrage* incidentes sobre os navios (FARIA, 2007).

Esta *commodity* é armazenada no pátio de armazenagem, para depois ser carregada nos caminhões que fazem o trajeto entre Serra (ES) e Cantagalo (RJ). Este carregamento é feito com o uso de maquinário, como a pá carregadeira (RODRIGUES, 2013a).

Após serem carregados, os caminhões seguem para a cidade de Cantagalo fazendo a rota demonstrada na Figura 10. Os veículos que realizam este trajeto são caminhões tratores com semi-reboques equipados com caçambas basculantes, transportando 27 toneladas de coque. A distância percorrida é de 408 quilômetros. Para fins deste trabalho, não foi considerado o retorno dos caminhões de Cantagalo para Praia Mole, uma vez que a Lafarge Brasil S.A. não utiliza frete próprio para realizar o deslocamento, contratando uma empresa transportadora, que aproveita o trajeto de retorno para outros fins (AKASAKA, 2013).



**Figura 10:** Rota realizada pelos caminhões do TUP de Praia Mole até a unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A. (Fonte: *Software GoogleEarth*)

Chegando à unidade fabril, o coque é despejado no pátio de armazenamento, onde é colocado por uma pá carregadeira em uma esteira em direção ao forno (MENDES, 2013). No forno de clínquer o coque é queimado, chegando ao fim do

recorte dado ao ciclo de vida deste produto neste estudo de caso. Dessa forma, é possível estimar as emissões para cada etapa descrita anteriormente.

#### 4.2.2.4. Emissões do Ciclo de Vida do Coque de Petróleo

Com o ciclo de vida do coque de petróleo referente ao estudo de caso delimitado, pode-se estimar as emissões de CO<sub>2</sub>. O primeiro processo a ser abordado é o embarque deste produto no porto estadunidense. Em seguida são explicitados os demais processos na seguinte ordem: transporte marítimo, desembarque no TUP de Praia Mole, estocagem, carregamento dos caminhões, transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo, descarga dos caminhões em Cantagalo, movimentação dentro da cimenteira e queima do combustível. Todas as emissões calculadas tiveram como base o montante anual de 9.600 toneladas de coque de petróleo, que é a parcela substituída pelos pneus inservíveis, em termos energéticos, no forno rotativo de clínquer.

##### a) *Embarque do coque de petróleo nos EUA*

Através de uma consulta realizada com colaboradores do terminal de Praia Mole, obteve-se a origem do último navio que atracou ali trazendo coque para a Lafarge Brasil S.A. Este foi um navio do tipo *Panamax* vindo do porto de Lavaca – Point Comfort (RODRIGUES, 2013a). Dessa forma, foram utilizados dados deste último tipo de embarcação para o cálculo das emissões neste estudo de caso.

Nesta etapa do ciclo de vida do coque de petróleo há emissão de CO<sub>2</sub> tanto devido ao navio (tempo de espera para atracação e para o embarque do granel sólido) quanto ao maquinário do porto (movimentação do coque de petróleo para embarque).

Em relação à embarcação, as emissões de GEE são geradas a partir da queima de combustível, principalmente em função da unidade de potência propulsora, chamado de motor principal, ou motor de propulsão. O combustível utilizado neste motor é o óleo combustível para navio, também chamado de *bunker*. Quando o navio está parado em fila, aguardando ser chamado pelo porto no fundeio, ou quando está atracado, descarregando ou carregando no porto, o motor de propulsão apresenta baixo consumo (RODRIGUES, 2013b).

Em relação ao tipo de combustível utilizado neste motor, é necessário esclarecer algumas definições. Segundo ICCT (2007), combustíveis navais utilizados em embarcações de alto-mar podem ser referidos como *bunker* ou pela sua designação industrial, *Intermediate Fuel Oil* (IFO). O IFO é composto principalmente por *residual fuel oil*, que é o óleo combustível de menor qualidade disponível, misturado com

diferentes tipos de óleo destilado. Dessa maneira, o próprio IFO pode ser referido mais genericamente apenas como *residual fuel oil*.

Por outro lado, a energia para alimentar os sistemas de iluminação, de segurança, de radar, entre outros, é gerada através de motores auxiliares. Esses motores consomem o *bunker* da família DO - *Diesel oil* (óleo diesel), que pode ser o MDO – *Marine diesel oil* (óleo diesel marítimo) ou o MGO – *Marine gas oil* (gasóleo marítimo). Mesmo quando o navio está em fila ou atracado no porto, os motores auxiliares permanecem operando (RODRIGUES, 2013b).

A *International Maritime Organization* (IMO) é uma agência especializada das Nações Unidas que tem como responsabilidade zelar pela segurança da navegação e pela prevenção da poluição marítima causada por navios. Uma das atribuições desta agência é cuidar dos registros dos navios. Esse registro é obrigatório e está vinculado ao banco de dados do *Lloyd-IHS Fairplay*, em nome da IMO. Através dele, todas as embarcações podem ser monitoradas e classificadas pelas classificadoras internacionais, como a *Lloyd's Register - Classification* (RODRIGUES, 2013b).

O número IMO é a identidade do navio. Assim, mesmo que o nome do navio mude, o seu número de IMO permanece inalterado. A Tabela 6 apresenta o nome do navio que trouxe o coque do Texas para o TUP de Praia Mole no dia 26 de janeiro de 2013 e o seu número de registro IMO, assim como outros dados relevantes. A carga total de coque de petróleo transportada por esta embarcação foi de 55.023,81 toneladas.

**Tabela 6:** Dados do navio que realizou o transporte de coque para Lafarge Brasil S.A. em janeiro de 2013.

Dados do Navio	
Nome:	OCEANIS
Outros nomes do navio:	SAMHO 1119
Estado de comércio:	EM SERVIÇO / COMISSÃO (2001)
Tipo de navio:	Graneleiro (2001)
Bandeira:	BAHAMAS (2001)
Ano de construção:	2001
Data de construção:	30/05/2001
Idade atual:	11,9 anos
DWT (verão) (mil t.):	75,211
Velocidade (nós):	14,8 (Serviço)
Calado (m):	14,15 (46,42 pés)

(Fonte: <http://site.rightship.com/>)

Tanto os navios do grupo *Panamax* quanto *Handymax* pertencem à família dos navios graneleiros, diferenciando-se devido às distintas capacidades de *DWT*<sup>4</sup>. Para esses grupos não se pode utilizar a mesma taxa de emissão de GEE, pois, além das variações de capacidade de carga, existem diferentes tipos e tamanhos de motores (RODRIGUES, 2013b).

Em relação ao consumo médio diário de combustível, RODRIGUES (2013b) compilou informações de cada grupo da família dos graneleiros. Os dados adotados/demonstrados pelo autor basearam-se em duas fontes. A primeira fonte é a *National Technical University of Athens* (NTUA, 2012 *apud* RODRIGUES, 2013b), enquanto a segunda fonte é uma média dos valores publicados pelas fontes *The Baltic Exchange* (2012), *RightShip* (2012), *Clarksons* (2012) e *Lloyd's List Intelligence* (2012) *apud* RODRIGUES (2013b). Analisando apenas o consumo dos navios *Panamax*, obtém-se os dados apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Informações de consumo para navios do grupo *Panamax*.

	Tamanho (DWT)	Velocidade Média (nós)	Consumo IFO Navegando (t/dia) <sup>1</sup>	Consumo MDO Navegando (t/dia) <sup>1</sup>	Consumo IFO no Porto (t/dia)	Consumo MDO no Porto (t/dia)
<b>Fonte 1</b>	67.230,00	14,00	32,00	1,50	3,00	1,50
<b>Fonte 2<sup>2</sup></b>	74.000,00	14,00	33,50	0,40	2,23	1,50

1 - Considerar o mesmo consumo para navegação vazio em *ballast*.

2 - Média do consumo entre registros dos navios.

(Fonte: Adaptado de RODRIGUES, 2013)

Neste estudo de caso foram utilizados os dados de consumo médio de combustível fornecidos pela Fonte 2 da Tabela 7. Esta escolha foi baseada na maior proximidade dos valores de *DWT* da embarcação analisada por esta fonte e a do estudo de caso.

A fim de calcular as emissões de CO<sub>2</sub> é necessário determinar o fator de emissão desses combustíveis. Assim, foram pesquisados junto ao IMO os fatores utilizados para a elaboração do “*Second IMO GHG Study*”, que podem ser vistos na Tabela 8. Conforme foi dito anteriormente, o IFO é composto majoritariamente de *residual fuel oil*. Desta forma, o fator de emissão do IFO foi considerado o mesmo daquele do *residual fuel oil*.

<sup>4</sup> *Deadweight Tonnage (DWT)* ou Tonelagem de Porte Bruto (TPB) é o peso da carga transportada somada aos pesos dos consumíveis, da água e do combustível.

**Tabela 8:** Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> para os combustíveis utilizados.

Combustível	Fator de Emissão (kgCO <sub>2</sub> /t de combustível)
<i>Marine diesel oil</i>	3.190,00
<i>Residual fuel oil</i>	3.130,00

Fonte: (IMO, 2009)

Ademais, devido à falta de dados específicos sobre as movimentações no porto de Point Comfort, optou-se por estimar este tempo com base nos dados verificados no terminal portuário de Praia Mole. Neste terminal, o navio ficou 3,37 dias na fila de espera e levou 42 horas e 7 minutos para descarregar as 55.023,81 toneladas de coque (RODRIGUES, 2013a).

No entanto, o tempo de desembarque é, em geral, consideravelmente maior do que o tempo de embarque de um granel sólido. Tendo isto em vista e adotando uma premissa conservadora, considerou-se que o embarque do coque de petróleo no navio durou metade do tempo de desembarque, ou seja, 21 horas e 4 minutos. Com isso, sabe-se que foram consumidos 6,37 t de MDO e 9,47 t de IFO, durante a espera e o embarque do coque.

Utilizando a equação 9 abaixo e os dados apresentados, tem-se que foram emitidas 8,7 tCO<sub>2</sub> por ano.

$$9) \quad [(IFO_1 \times k_{IFO}) + (MDO_1 \times k_{MDO})] \times [(CP_{UC} / CP_{PA})] / 1000 = E_9$$

Sendo:

IFO<sub>1</sub> = consumo de IFO no porto (t/ano);

k<sub>IFO</sub> = fator de emissão do *residual fuel oil* (IFO) (kgCO<sub>2</sub>/t);

MDO<sub>1</sub> = consumo de MDO no porto (t/ano);

k<sub>MDO</sub> = fator de emissão do MDO (kgCO<sub>2</sub>/t);

CP<sub>UC</sub> = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t/ano);

CP<sub>PA</sub> = coque de petróleo importado pelo navio *Panamax* (t/ano);

E<sub>9</sub> = emissões do embarque em Point Comfort (tCO<sub>2</sub>/ano).

A movimentação da carga para o embarque, entretanto, depende dos equipamentos presentes no porto em questão. O porto de Lavaca – Point Comfort está localizado no Golfo do México, na costa leste norte-americana. No entanto, não foi encontrada bibliografia específica acerca dos equipamentos utilizados para embarque

do coque em Point Comfort. Com isso, optou-se por utilizar dados do inventário de emissões do porto de Long Beach, na Califórnia, por ser o que apresentou dados disponíveis dentre os portos estadunidenses que tiveram significativa movimentação de coque de petróleo.

O porto de Long Beach está localizado na costa oeste dos EUA e é o segundo porto em termos de movimentação deste país. O coque de petróleo está entre os cinco produtos mais exportados, atingindo, em 2010, 5,069 milhões de toneladas. Este montante representou aproximadamente 77,5% do total de carga sólida movimentada em Long Beach em 2010 (The Harbor Department of the City of Long Beach, 2011).

Desde 2002 este porto publica o seu inventário de emissões, ampliando a sua abrangência ano a ano. O inventário de 2010 contempla tanto emissões de GEE quanto de poluentes, como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e CO, com abrangência geográfica dentro dos limites portuários e dentro do raio de influência do porto. As fontes móveis mapeadas para serem inventariadas são subdivididas em: embarcações marítimas, embarcações portuárias, equipamentos de movimentação de carga, ferrovias e veículos pesados.

As emissões de CO<sub>2</sub> dos equipamentos de movimentação de carga do porto de Long Beach, em 2010, somaram 104.886,7 toneladas. Deste total, apenas 502,7 toneladas foram emitidas pelos terminais de granéis sólidos (The Harbor Department of the City of Long Beach, 2011).

Assim, com base nas informações acima e utilizando a equação 10 abaixo obteve-se que são emitidas 0,7 toneladas de CO<sub>2</sub> ao ano na movimentação do coque no porto estadunidense.

$$10) \quad (E_{MCGS} \times \%_{MCP}) \times \left( \frac{CP_{UC}}{CP_{LB}} \right) = E_{10}$$

Sendo:

$E_{MCGS}$  = emissões da movimentação de carga no terminal de graneis sólidos no porto de Long Beach (tCO<sub>2</sub>/ano);

$\%_{MCP}$  = movimentação do coque de petróleo no porto de Long Beach (%);

$CP_{UC}$  = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t);

$CP_{LB}$  = coque de petróleo movimentado em Long Beach (t);

$E_{10}$  = emissão do embarque do coque de petróleo nos EUA (tCO<sub>2</sub>/ano)

Contudo, uma limitação observada durante a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> com auxílio do inventário do porto de Long Beach foi a ausência das emissões de nível

2. Não foram disponibilizadas informações de quanto foi gasto de cada combustível e o quanto foi consumido de energia elétrica o que inviabilizou este cálculo, especificamente para os equipamentos de movimentação de carga.

No entanto, tendo em vista a reduzida parcela emitida por essas fontes, imagine-se que as emissões de nível 2 também seriam bastante pequenas e, portanto, de pouca influência para os valores finais obtidos.

Já em relação ao combustível utilizado pelo navio foi possível calcular as emissões de nível 2, ou seja, da sua produção e distribuição. Segundo um estudo realizado pelo National Energy Technology Laboratory dos EUA, para produção de um barril de *residual fuel oil* (IFO), considerando a sua extração, transporte para refinaria e refino, emite-se 64,9 kgCO<sub>2</sub>. Como uma tonelada de *residual fuel oil* equivale a 6,66 barris, tem-se que o fator de emissão durante a produção é 432,23 kgCO<sub>2</sub>/t de IFO (NETL, 2008).

Entretanto, esta fonte não estimou as emissões de CO<sub>2</sub> devido à distribuição do IFO, fazendo este cálculo apenas para o diesel convencional, a gasolina e o querosene de aviação nos EUA. Para estes três combustíveis, o percentual médio de contribuição da distribuição frente ao total (considerando extração, transporte para refinaria e refino) foi de 6,33%. Com isso, optou-se por considerar este percentual para a distribuição do IFO nos EUA, concorrendo para um fator de emissão de nível 2 de 461,46 kgCO<sub>2</sub>/t de IFO.

Apesar do MDO ser distinto do óleo diesel convencional, optou-se por utilizar os dados fornecidos para este último pelo NETL (2008) para estimar as emissões de produção do MDO nos EUA, uma vez que ambos os combustíveis são da família do óleo diesel. Assim, na extração, transporte para refinaria, refino e distribuição de uma tonelada de MDO emite-se 648,23 kgCO<sub>2</sub>.

De posse dos dados de consumo destes óleos, do fator de emissão e da equação abaixo, tem-se que foram emitidos 1,5 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$11) \quad [(MDO_1 \times k_{PMDO}) + (IFO_1 \times k_{PIFO})] \times [(CP_{UC} / CP_{PA})] / 1000 = E_{11}$$

Sendo:

MDO<sub>1</sub> = consumo de MDO no porto (t/ano);

k<sub>PMDO</sub> = fator de emissão da produção e distribuição do MDO (kgCO<sub>2</sub>/t);

IFO<sub>1</sub> = consumo de IFO no porto (t/ano);

k<sub>PIFO</sub> = fator de emissão da produção e distribuição do IFO (kgCO<sub>2</sub>/t);

CP<sub>UC</sub> = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t/ano);

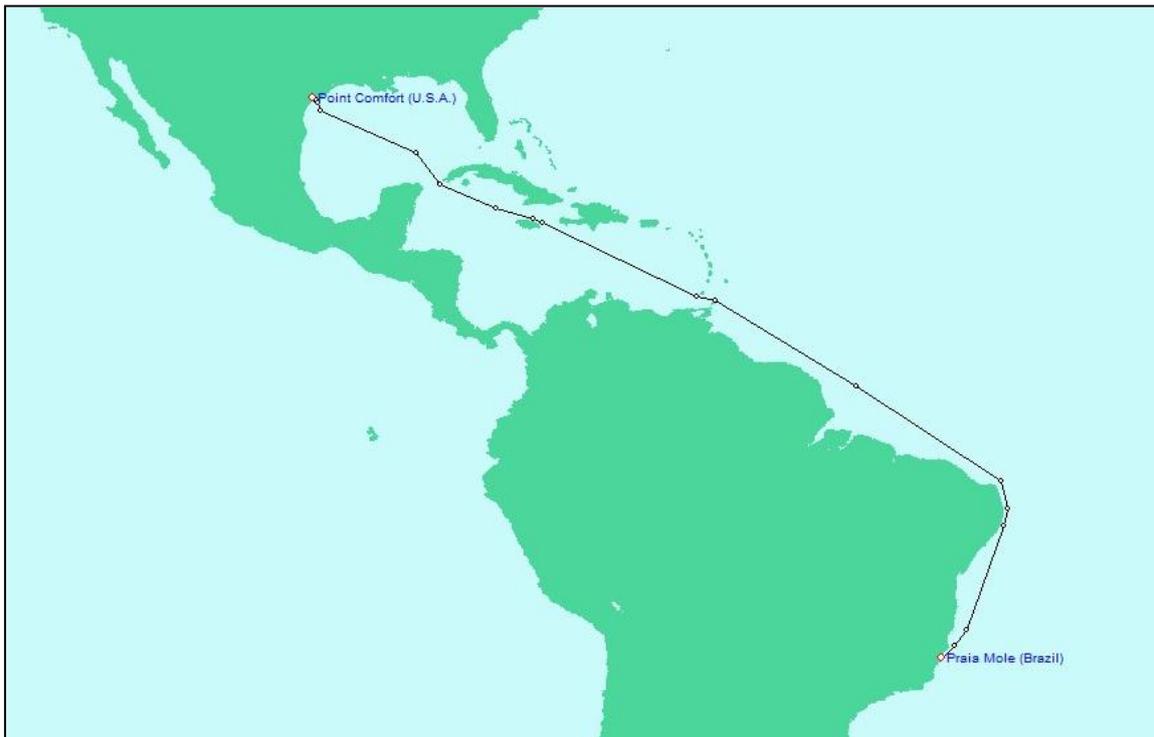
$CP_{PA}$  = coque de petróleo importado pelo navio *Panamax* (t/ano);

$E_{11}$  = emissões da produção dos combustíveis de navegação utilizados durante o embarque do coque de petróleo nos EUA (tCO<sub>2</sub>/ano).

Em suma, são emitidos anualmente 10,9 tCO<sub>2</sub> para o embarque do coque de petróleo nos EUA, sendo 9,4 tCO<sub>2</sub> diretamente ligados ao processo e 1,5 tCO<sub>2</sub> indiretamente (nível 2).

#### b) Transporte marítimo

Após o embarque, o navio segue para o terminal de Praia Mole. Utilizando o *software Port-to-Port* pode-se estimar a rota e a distância percorridas pelo navio, conforme pode ser visto na Figura 11. Não foi considerada nenhuma parada adicional. A distância obtida para a rota em questão foi de 5.157 milhas náuticas, o equivalente a 9.550,764 quilômetros de distância entre os dois portos.



**Figura 11:** Rota do navio entre Porto Lavaca - Point Comfort e o TUP de Praia Mole. (Fonte: *Software Port-to-Port*).

Para percorrer esta distância, o navio levou aproximadamente 14,5 dias. Isto representou um consumo de 484,30 toneladas de IFO e 21,75 toneladas de MDO. Desta forma, utilizando os dados de consumo durante a navegação já apresentados na Tabela 7, o fator de emissão dos combustíveis e a equação 12, tem-se que são

emitidas 268,5 tCO<sub>2</sub> por ano na queima dos combustíveis durante o transporte marítima do coque.

$$12) \quad [(IFO_2 \times k_{RFO}) + (MDO_2 \times k_{MDO})] \times [(CP_{UC} / CP_{PA})] / 1000 = E_{12}$$

Sendo:

IFO<sub>2</sub> = consumo de IFO navegando (t/ano);

k<sub>I<sub>FO</sub></sub> = fator de emissão do *residual fuel oil* (IFO) (kgCO<sub>2</sub>/t);

MDO<sub>2</sub> = consumo de MDO navegando (t/ano);

k<sub>M<sub>DO</sub></sub> = fator de emissão do MDO (kgCO<sub>2</sub>/t);

CP<sub>UC</sub> = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t/ano);

CP<sub>PA</sub> = coque de petróleo importado pelo navio *Panamax* (t/ano);

E<sub>12</sub> = emissões do transporte marítimo do coque de petróleo (tCO<sub>2</sub>/ano).

Ademais, devido ao consumo de combustível nesta etapa, faz-se necessário calcular as emissões da produção dessas fontes. Tendo em vista os dados apresentados anteriormente e com base na equação 13 abaixo, tem-se que foram emitidos 39,8 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$13) \quad [(MDO_2 \times k_{PMOD}) + (IFO_2 \times k_{PIFO})] \times [(CP_{UC} / CP_{PA})] / 1000 = E_{13}$$

Sendo:

IFO<sub>2</sub> = consumo de IFO navegando (t/ano);

k<sub>P<sub>I<sub>FO</sub></sub></sub> = fator de emissão da produção e distribuição IFO (kgCO<sub>2</sub>/t);

MDO<sub>2</sub> = consumo de MDO navegando (t/ano);

k<sub>P<sub>M<sub>DO</sub></sub></sub> = fator de emissão da produção e distribuição do MDO (kgCO<sub>2</sub>/t);

CP<sub>UC</sub> = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t/ano);

CP<sub>PA</sub> = coque de petróleo importado pelo navio *Panamax* (t/ano);

E<sub>13</sub> = emissões da produção e distribuição dos combustíveis de navegação utilizados durante o trajeto até o TUP de Praia Mole (tCO<sub>2</sub>/ano).

Logo, durante o transporte marítimo do coque de petróleo são emitidos no total 308,3 tCO<sub>2</sub>/ano.

c) *Desembarque no TUP de Praia Mole*

Ao chegar no TUP de Praia Mole, o navio ficou 3,37 dias na fila de espera para atracação. Após a espera, o navio atracou e começou a descarregar o coque de petróleo. Durante esta operação, os dois motores da embarcação continuam funcionando. Em janeiro de 2013, o navio OCEANIS teve uma prancha (ritmo) de descarga de 31.355 t/d, ou seja, demorou 1,75 dias (42 horas e 7 minutos) para descarregar todo o coque importado (RODRIGUES, 2013a). Com isso, o consumo de IFO foi de 11,43 toneladas e de MDO 7,69 toneladas.

Assim, utilizando os dados apresentados e a equação 14 abaixo, tem-se que são emitidas 10,5 tCO<sub>2</sub> por ano.

$$14) \quad [(IFO_3 \times k_{IFO}) + (MDO_3 \times k_{MDO})] \times [(CP_{UC} / CP_{PA})] / 1000 = E_{14}$$

Sendo:

IFO<sub>3</sub> = consumo de IFO durante o desembarque (t/ano);

k<sub>IFO</sub> = fator de emissão do *residual fuel oil* (IFO) (kgCO<sub>2</sub>/t);

MDO<sub>3</sub> = consumo de MDO durante o desembarque (t/ano);

k<sub>MDO</sub> = fator de emissão do MDO (kgCO<sub>2</sub>/t);

CP<sub>UC</sub> = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t/ano);

CP<sub>PA</sub> = coque de petróleo importado pelo navio *Panamax* (t/ano);

E<sub>14</sub> = emissões do desembarque no TUP de Praia Mole (tCO<sub>2</sub>/ano).

Além disso, o coque é retirado do navio por um equipamento conhecido como Descarregador de Navios, sendo colocado em uma correia transportadora que o conduz para o pátio de armazenagem. No pátio, o coque é empilhado por uma pá carregadeira para aguardar o transporte rodoviário que o conduzirá a Cantagalo. Não foram obtidas as especificações de consumo de combustível por movimentação de carga desses equipamentos. Sabe-se, contudo, que todo o maquinário utilizado em Praia Mole é movido a energia elétrica (RODRIGUES, 2013a).

No entanto, apesar do Sistema Interligado Nacional brasileiro possuir um fator de emissão baixo, devido à característica majoritariamente hidroelétrica de sua matriz energética, julgou-se adequado estimar as emissões das movimentações após o desembarque com auxílio dos dados do Inventário de Long Beach. Assim, com base nas informações disponibilizadas no item 4.2.2.4a e utilizando a equação 10 estima-se que são emitidas 0,7 toneladas de CO<sub>2</sub> ao ano do desembarque à estocagem do coque de petróleo em Praia Mole.

Contudo, conforme já dito, ao se utilizar esta estimativa, não é possível calcular as emissões de nível 2 devido à movimentação do coque de petróleo no porto durante o desembarque. Por outro lado, os combustíveis queimados pelo navio durante esta etapa geram emissões de CO<sub>2</sub> na sua produção e distribuição passíveis de serem estimadas.

Sabendo o quanto foi consumido de cada combustível e utilizando os dados de emissão nível 2 apresentados anteriormente e a equação 15 abaixo, tem-se que foram emitidos 1,8 tCO<sub>2</sub> por ano.

$$15) \quad [(MDO_3 \times k_{PMOD}) + (IFO_3 \times k_{PIFO})] \times [(CP_{UC} / CP_{PA})] / 1000 = E_{15}$$

Sendo:

IFO<sub>3</sub> = consumo de IFO durante o desembarque (t/ano);

k<sub>PIFO</sub> = fator de emissão da produção e distribuição do IFO (kgCO<sub>2</sub>/t);

MDO<sub>3</sub> = consumo de MDO durante o desembarque (t/ano);

k<sub>PMDO</sub> = fator de emissão da produção e distribuição do MDO (kgCO<sub>2</sub>/t);

CP<sub>UC</sub> = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t/ano);

CP<sub>PA</sub> = coque de petróleo importado pelo navio *Panamax* (t/ano);

E<sub>15</sub> = emissões de nível 2 do desembarque do coque de petróleo em Praia Mole (tCO<sub>2</sub>/ano).

Dessa forma, são emitidos no total 13,0 tCO<sub>2</sub>/ano nesta etapa do ciclo de vida do coque.

#### d) *Estocagem*

Como não há movimentações nesta etapa, tem-se que as emissões de CO<sub>2</sub> são nulas.

#### e) *Carregamento dos caminhões*

As carretas basculantes são carregadas com o auxílio de pás carregadeiras (RODRIGUES, 2013a). Contudo, não foram obtidas as especificações do equipamento. Com isso, optou-se por realizar uma estimativa baseada nos dados fornecidos pelo inventário de emissões atmosféricas de Long Beach.

Neste porto, as emissões equivalentes a pá carregadeira foram de 293,0 tCO<sub>2</sub> ao ano. Essas emissões equivalem as operações de 15 pás, sendo 9 dedicados aos terminais de granel sólido e 6 aos terminais de neo-granéis. Tendo como base a

equação 16 apresentada abaixo, estima-se que são emitidas 0,3 tCO<sub>2</sub>/ano nesta etapa.

$$16) \quad (E_{PC} \times n_{PCGS} / n_{PCT} \times \%_{MCP}) \times (CP_{UC} / CP_{LB}) = E_{16}$$

Sendo:

$E_{PC}$  = emissão das pás carregadeiras em Long Beach (tCO<sub>2</sub>/ano);

$n_{PCGS}$  = quantidade de pás carregadeiras do terminal de graneis sólidos;

$n_{PCT}$  = quantidade total de pás carregadeiras no porto de Long Beach;

$\%_{MCP}$  = movimentação do coque de petróleo no porto de Long Beach (%);

$CP_{UC}$  = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t);

$CP_{LB}$  = quantidade de coque de petróleo movimentado em Long Beach (t/ano);

$E_{16}$  = emissões de nível 1 do carregamento dos caminhões (tCO<sub>2</sub>/ano).

Para estimar as emissões de nível 2 foi utilizada a mesma lógica aplicada ao item e) do ciclo de vida do pneu inservível, considerando a proporção entre emissões de nível 1 e 2 do diesel comercializado em território brasileiro. Assim, tem-se como total de nível 2, 12,5% das emissões do nível 1, o que equivale a menos de 0,1 tCO<sub>2</sub>/ano.

Portanto, esta emissão de nível 2 não influencia significativamente nos resultados encontrados para o nível 1 e a emissão total deste processo do ciclo de vida do coque de petróleo é de 0,3 tCO<sub>2</sub>/ano.

#### f) *Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo*

Os conjuntos caminhão trator semi-reboque com caçambas basculantes que realizam a rota do TUP de Praia Mole até a unidade de Cantagalo tem idade média de 3 anos, podendo ser das marcas Volvo ou Scania (AKASAKA, 2013). No entanto, elas não são dedicadas exclusivamente à Lafarge Brasil S.A. e por isso não se tem dados precisos do seu consumo de combustível por quilômetro. Por isso, foram utilizados dados gerais consolidados do Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro.

As carretas deste estudo de caso são consideradas caminhões pesados por terem um Peso Bruto Total (PBT) acima de 15 toneladas. Além disso, o motor desses veículos é movido a diesel. Dessa forma, sabendo que o fator de emissão do diesel é 2,67 kgCO<sub>2</sub>/l (MMA, 2011) e que o valor médio de quilometragem por litro para

caminhões pesados é 2,61 km/l diesel (D'Agosto *et al.*, 2011), pode-se estimar as emissões deste trecho.

As carretas basculantes carregadas com o coque de petróleo precisam realizar um trajeto de 408 quilômetros para chegar até a unidade de Cantagalo. Como são substituídas pelos pneus inservíveis anualmente 9.600 toneladas de coque de petróleo, são realizadas 356 viagens, totalizando 145.066,7 quilômetros percorridos.

De posse desses dados e utilizando a equação 17 tem-se a emissão de 148,5 tCO<sub>2</sub> ao ano.

$$17) \quad [(d_{17}/e_{CA}) \times k_{DIE}]/1000 = E_{17}$$

Sendo:

$d_{17}$  = distância percorrida (km/ano);

$e_{CA}$  = eficiência de consumo para caminhões pesados (km/l);

$k_{DIE}$  = fator de emissão do diesel (kgCO<sub>2</sub>/l);

$E_{17}$  = emissões de nível 1 do transporte rodoviário até Cantagalo (tCO<sub>2</sub>/ano).

Tendo em vista o consumo de diesel, é preciso que se calcule as emissões de nível 2 deste combustível. Como este consumo é em território brasileiro, considerou-se mais adequada a utilização dos dados obtidos por D'AGOSTO (2004), conforme utilizado no ciclo de vida do pneu inservível. Assim, o fator de emissão considerado, incluindo extração, transporte até a refinaria, refino e distribuição, para o diesel utilizado no Brasil é de 396,54 kgCO<sub>2</sub>/t de combustível.

Como explicado anteriormente, o valor adotado para a densidade do diesel metropolitano será de 0,843 kg/l, aplicado à equação 18. Assim, obteve-se que foram emitidas 18,6 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$18) \quad \{[(d_{18}/e_{CA}) \times (d_{DIE}/1000)] \times (k_{PDIE})\}/1000 = E_{18}$$

Sendo:

$d_{18}$  = distância percorrida (km/ano);

$e_{CA}$  = eficiência de consumo para caminhões pesados (km/l);

$k_{PDIE}$  = fator de emissão de nível 2 do diesel utilizado no Brasil (kgCO<sub>2</sub>/t);

$d_{DIE}$  = densidade média do diesel metropolitano (kg/l);

$E_{18}$  = emissões de nível 2 do transporte rodoviário até Cantagalo (tCO<sub>2</sub>/ano).

Computando tanto as emissões de nível 1 quanto as de nível 2, foram emitidas 167,0 tCO<sub>2</sub>/ano no transporte rodoviário do coque de petróleo.

*g) Descarga dos caminhões em Cantagalo*

Após realizar o trajeto, as carretas basculantes chegam à unidade de Cantagalo e realizam o descarregamento do coque. Para esta operação, a caçamba do caminhão é deslocada hidráulicamente, despejando a carga no pátio de armazenagem sem o auxílio de nenhum outro equipamento (AKASAKA, 2013). Durante este deslocamento não há gastos extras de combustível, apenas o necessário para deixar o caminhão ligado.

Adotando uma premissa conservadora, estima-se que este descarregamento dure em média 5 minutos. Como são 356 viagens, o tempo total para a descarga é de 29,67 horas ao longo de um ano.

De acordo com o estudo “*Study of Exhaust Emissions from Idling Heavy-Duty Diesel Trucks and Commercially Available Idle-Reducing Devices*”, conduzido pela United States Environmental Protection Agency (EPA) o fator de emissões para modelos de caminhões típicos, produzidos entre 1980 e 2001 e movidos a diesel, durante o ponto-morto, é de 8,224 kgCO<sub>2</sub>/h, em média (EPA, 2002). De posse destes dados e com base na equação 19, obtem-se uma emissão de 0,24 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$19) \quad (t_d \times k_{PM})/1000 = E_{19}$$

Sendo:

$t_d$  = tempo de descarga (h/ano);

$k_{PM}$  = fator de emissão durante o ponto morto (kgCO<sub>2</sub>/h);

$E_{19}$  = emissões da descarga dos caminhões em Cantagalo (tCO<sub>2</sub>/ano).

Ainda segundo a EPA (2002), são consumidos durante o ponto-morto cerca de 0,82 gal/h de diesel. Considerando a densidade do diesel utilizada neste estudo da EPA, de 3,212 kg/gal, tem-se que o consumo anual de diesel para o descarregamento das carretas de coque de petróleo em Cantagalo é de 0,078 t.

De posse destes dados, do fator de emissão da produção e distribuição do diesel brasileiro e da equação 20 tem-se que são emitidas 0,03 tCO<sub>2</sub>/ano.

$$20) \quad (C_{DIE} \times k_{PDIE})/1000 = E_{20}$$

Sendo:

$C_{DIE}$  = consumo de diesel durante a descarga na unidade de Cantagalo (t);

$k_{PDIE}$  = fator de emissão de nível 2 do diesel utilizado no Brasil ( $kgCO_2/t$ );

$E_{20}$  = emissões de nível 2 do descarregamento na unidade de Cantagalo ( $tCO_2/ano$ ).

Portanto, são emitidos no total  $0,3 tCO_2/ano$  nesta etapa do ciclo de vida do coque de petróleo.

#### *h) Movimentação dentro da unidade*

O coque despejado no pátio de armazenamento é colocado, com auxílio de uma pá carregadeira, em uma esteira em direção ao forno. Devido à ausência de dados mais específicos sobre o consumo desses dois equipamentos, optou-se por utilizar o mesmo raciocínio aplicado ao caso do pneu inservível, apresentado anteriormente.

Naquele ciclo de vida, os equipamentos que fazem o descarregamento e transporte do pneu dentro da fábrica foram considerados como um só conjunto, com potência aproximada de  $5 \times 10^{-3}$  MW. Por ser um conjunto elétrico, sua emissão dá-se apenas no nível 2, sendo zero na operação (nível 1). Sabendo que a unidade fabril opera ininterruptamente e tendo o fator de emissão anual médio do *grid* brasileiro, pode-se aplicar a equação 21.

Adicionalmente, observa-se que mesmo que haja alguma diferença na movimentação do pneu inservível triturado e do coque de petróleo acredita-se que estas sejam insignificantes, não impactando no resultado final do estudo. Assim, tem-se que foram emitidas  $2,3 tCO_2/ano$ , que é o total para este elo do ciclo do coque de petróleo.

$$21) \quad (P \times t_0 \times k_{GRID})/1000 = E_{21}$$

Sendo:

P = potência dos equipamentos (MW);

$t_0$  = tempo de operação (h/ano);

$k_{GRID}$  = fator de emissão médio do *grid* brasileiro ( $kgCO_2/MWh$ );

$E_{21}$  = emissão da movimentação dentro da unidade ( $tCO_2/ano$ ).

#### *i) Queima do combustível*

De acordo com a CSI (2011), a abordagem preferencial para se calcular a emissão de  $CO_2$  advindas da queima de combustíveis convencionais se dá com base no seu

consumo, no seu poder calorífico inferior (ou poder calorífico líquido) e no fator de emissão. Para o consumo, foi considerado neste estudo de caso o montante que é substituído anualmente pelo pneu inservível.

O poder calorífico líquido do coque de petróleo adotado foi o fornecido pelo IPCC (2006a) cujo valor é de 32,5 MJ/kg. Entretanto, o seu fator de emissão é baseado em análises compiladas por uma Força –Tarefa da CSI. Esta Força-Tarefa CSI compilou dados de 361 amostras de coque com alto teor de enxofre utilizado pelas suas empresas-membro em 2003. Desta análise, chegou-se ao valor médio do fator de emissão de 92,8 kgCO<sub>2</sub>/GJ.

Com esses dados, pode-se obter o total emitido através da equação 22 abaixo. Assim, durante a queima do coque de petróleo para a produção de cimento em Cantagalo ocorre a emissão de 28.953,6 tCO<sub>2</sub> a cada ano.

$$22) \quad (CP_{UC} \times PC_{CP} \times k_{CP}) / 1000 = E_{22}$$

Sendo:

CP<sub>UC</sub> = coque de petróleo que é substituído pelo pneu inservível na unidade de Cantagalo (t/ano);

PC<sub>CP</sub> = poder calorífico do coque de petróleo (MJ/kg);

k<sub>CP</sub> = fator de emissão do coque de petróleo (kgCO<sub>2</sub>/GJ);

E<sub>22</sub> = emissões da queima do combustível (tCO<sub>2</sub>/ano).

Ademais, como não foi considerada a produção deste combustível, seria incoerente o cálculo de suas emissões indiretas (nível 2).

Por fim, tem-se que foram emitidos 29.455,8 tCO<sub>2</sub> ao ano no ciclo de vida do coque de petróleo considerado neste estudo. Na Tabela 9 pode ser visto um resumo, discriminando as emissões em cada etapa.

**Tabela 9:** Tabela-resumo das emissões do coque de petróleo para o estudo de caso.

Meso-estágio	Micro-estágio	tCO <sub>2</sub> /ano
Produção da Matéria Prima	Embarque do coque de petróleo nos EUA	10,9
Transporte da Matéria Prima	Transporte marítimo	308,3
	Desembarque no TUP de Praia Mole	13,0
Destino Intermediário	Estocagem	0,0
Transporte da Fonte de Energia	Carregamento dos caminhões	0,3
	Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo	167,0
	Descarga dos caminhões em Cantagalo	0,3
	Movimentação dentro da unidade	2,3
Queima em Fornos de Clínquer	Queima do combustível	28.953,6
<b>TOTAL</b>		<b>29.455,8</b>

(Fonte: Elaboração Própria)

#### 4.2.3. Fase 3: Avaliação dos Dados

O objetivo desta fase é orientar uma possível reavaliação dos dados de emissões de CO<sub>2</sub>, a partir da identificação de fluxos críticos para o resultado final. Neste sentido, recomenda-se que sejam realizadas, preliminarmente, avaliações relativas: (1) ao peso de cada entrada individual em relação ao fluxo total de cada aspecto analisado no ciclo de vida, (2) ao intervalo de variação de cada valor, e (3) à origem do dado utilizado, que pode ser de uso específico ou geral (D'AGOSTO e RIBEIRO, 2009).

Neste estudo de caso foram adotados os mesmos parâmetros de avaliação definidos por D'AGOSTO e RIBEIRO (2009). Os parâmetros são: peso mínimo para que o fluxo seja avaliado correspondente a 10% do total e intervalo máximo de variação do dado de entrada de 5%. Isto significa que, caso um fluxo contribua com mais do que 10% para o montante final de emissões, seu intervalo de variação é avaliado. Se o intervalo for maior do que 5%, a origem do dado deve ser analisada.

A Tabela 10 mostra o peso de cada etapa no valor total de emissão do ciclo de vida do pneu inservível.

**Tabela 10:** Percentual de influência de cada etapa no cálculo final de emissão de CO<sub>2</sub> para o ciclo de vida do pneu inservível.

Meso-estágio	Micro-estágio	%
Produção da Matéria Prima	Carregamento dos caminhões	0,0%
Transporte da Matéria Prima	Transporte rodoviário até a unidade da CBL	0,2%
	Descarregamento na CBL	0,0%
Destino Intermediário	Trituração e estocagem	0,4%
Transporte da Fonte de Energia	Carregamento dos caminhões	0,1%
	Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo	0,6%
	Descarga dos caminhões e movimentação dentro da unidade	0,0%
Queima em Fornos de Clínquer	Queima do combustível	98,7%
<b>TOTAL</b>		<b>100,0%</b>

(Fonte: Elaboração Própria)

Conforme definido pela metodologia, deve-se analisar a variação das emissões da queima no forno de clínquer, uma vez que só o seu peso no resultado final é maior do que 10%. Assim, é preciso avaliar o intervalo de variação deste valor.

Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> nesta etapa foi utilizada a equação 8 cujas variáveis eram o poder calorífico, o fator de emissão e a massa total dos pneus inservível. A massa total é invariável e, portanto, não cabe ser analisada. Para o fator de emissão do pneu inservível não foram encontradas outras fontes bibliográficas. Ademais, nem mesmo o CSI (2011) forneceu o intervalo de variação deste dado. Julgou-se, entretanto, por ser esta fonte uma iniciativa confiável e que embasa o reporte mundial das emissões de GEE da indústria cimenteira, não ser necessária a sua avaliação.

Já o valor do poder calorífico adotado para o pneu inservível, é específico para o estudo de caso, com base no que foi captado durante as entrevistas. Desta forma, não há uma incerteza associada a ele e dados bibliográficos não são aderentes à realidade do processo. Por isso, não foi feita a avaliação desse dado.

No caso do coque de petróleo, nota-se, pela Tabela 11, que apenas a queima nos fornos de clínquer representa mais do que 10% do total.

**Tabela 11:** Percentual de influência de cada etapa no cálculo final de emissão de CO<sub>2</sub> para o ciclo de vida do coque de petróleo.

Meso-estágio	Micro-estágio	%
Produção da Matéria Prima	Embarque do coque de petróleo nos EUA	0,0%
Transporte da Matéria Prima	Transporte marítimo	1,0%
	Desembarque no TUP de Praia Mole	0,0%
Destino Intermediário	Estocagem	0,0%
Transporte da Fonte de Energia	Carregamento dos caminhões	0,0%
	Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo	0,6%
	Descarga dos caminhões em Cantagalo	0,0%
	Movimentação dentro da unidade	0,0%
Queima em Fornos de Clínquer	Queima do combustível	98,3%
<b>TOTAL</b>		<b>100,0%</b>

(Fonte: Elaboração Própria)

O valor da emissão deste elo do ciclo de vida foi obtido através da equação 22, que considerava o poder calorífico, o fator de emissão e a massa total do coque de petróleo. Tanto o poder calorífico quanto o fator de emissão são dados consolidados e largamente utilizados em inventários de gases de efeito estufa, uma vez que suas fontes são o IPCC (2006a) e o CSI (2011), respectivamente. Com isso, julgou-se desnecessária a avaliação da qualidade dos dados.

#### 4.2.4. Fase 4: Comparação dos Resultados

Na Tabela 12 podem ser vistas as emissões de dióxido de carbono para ambos os ciclos de vida, por cada etapa do meso estágio.

**Tabela 12:** Comparação das emissões no meso estágio do estudo de caso.

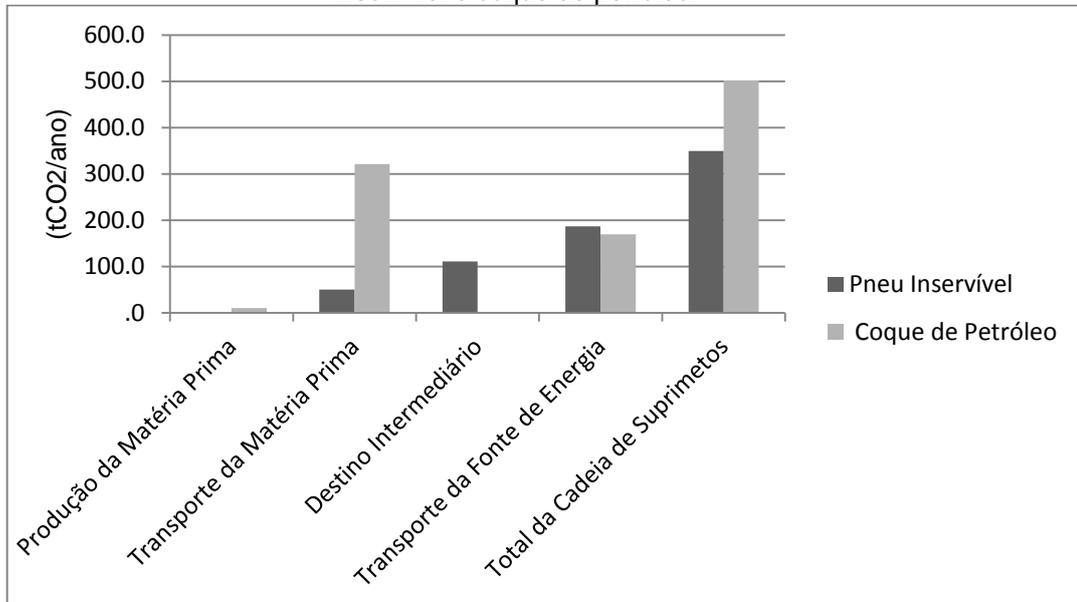
Ciclo de Vida	Meso-estágio					
	Produção da Matéria Prima (tCO <sub>2</sub> /ano)	Transporte da Matéria Prima (tCO <sub>2</sub> /ano)	Destino Intermediário (tCO <sub>2</sub> /ano)	Transporte da Fonte de Energia (tCO <sub>2</sub> /ano)	Queima em Fornos de Clínquer (tCO <sub>2</sub> /ano)	Total (tCO <sub>2</sub> /ano)
Pneu Inservível	0,0	51,0	111,2	187,3	26.520,0	26.869,5
Coque de Petróleo	10,9	321,3	0,0	169,9	28.953,6	29.455,8

(Fonte: Elaboração Própria)

Analisando os resultados apresentados, percebe-se que o ciclo de vida do coque emite mais CO<sub>2</sub> que o do pneu inservível. Esta diferença, de 8,8%, deve-se, essencialmente, ao último processo da cadeia, a queima no forno de clínquer. Este, por sua vez, difere-se devido ao fator de emissão da queima dos combustíveis de cada um, cuja análise de qualidade do dado foi realizada na seção anterior.

Devido à diferença na ordem de grandeza das emissões da queima em relação aos outros meso-estágios, julgou-se adequado analisar a cadeia de suprimentos isoladamente. A Figura 12 ilustra os diferentes resultados encontrados.

**Figura 12:** Comparação das emissões de CO<sub>2</sub> entre as cadeias de suprimento do do pneu inservível e coque de petróleo.



(Fonte: Elaboração Própria)

Pode-se observar uma emissão total de 349,5 tCO<sub>2</sub>/ano na cadeia de suprimentos do pneu inservível e de 502,2 tCO<sub>2</sub>/ano na do coque de petróleo, o que representa

30,4% a menos daquela em relação a esta. A partir da Figura 12 percebe-se que o principal processo que contribui para essa diferença é o transporte da matéria prima, devido à longa distância percorrida via transporte marítimo para importação do coque.

Outra análise importante é em relação ao meso estágio “Transporte da Fonte de Energia”, principal contribuinte da cadeia de suprimentos do pneu inservível, representando 46,4% do seu total. A impossibilidade de utilização de outro modo de transporte que não o rodoviário, devido às características do pneu triturado e à quantidade transportada, diminuem as possibilidades de redução das emissões deste processo.

Além disso, cabe ressaltar a diferença nas emissões de CO<sub>2</sub> no meso estágio “Destino Intermediário”, que ocorre porque o coque é apenas armazenado neste estágio, enquanto que o pneu deve ser processado, passando pela unidade de trituração. Caso o pneu fosse utilizado inteiro nos fornos de cimento da unidade de Cantagalo, não haveria emissões neste meso-estágio em nenhum dos dois ciclos de vida.

Ao se realizar variações nos parâmetros estipulados no estudo de caso, pode-se visualizar diferentes cenários. Este mecanismo contribui para a determinação de novas soluções ou mesmo para avaliar o comportamento dos resultados. Assim, a seção a seguir propõe a realização de uma análise de sensibilidade, considerando parâmetros tidos como chave na obtenção dos resultados.

### **4.3. Análise de sensibilidade**

Esta seção objetiva analisar como se comportam as emissões de CO<sub>2</sub> quando feitas alterações de algumas premissas adotadas. Para isto, foram propostos três diferentes cenários de análise. O primeiro leva em conta a variação caso fosse utilizado valores de fontes bibliográficas para o poder calorífico do pneu inservível, o segundo considera a não computação no total das emissões de CO<sub>2</sub> do carbono de biomassa presente no pneu inservível. Por fim, o terceiro cenário explora a variação por conta da mudança do tipo de navio que importa o coque de petróleo.

#### **4.3.1. Cenário 1: Adoção do poder calorífico de fontes bibliográficas**

Através do levantamento bibliográfico realizado notou-se que o valor adotado de 26 MJ/kg para o poder calorífico do pneu inservível difere de diversas fontes bibliográficas. No entanto, optou-se pela manutenção deste valor nos cálculos realizados no trabalho por ser específico para o estudo de caso desenvolvido. As bibliografias encontradas estão resumidas na Tabela 13.

**Tabela 13:** Resumo dos valores de poder calorífico dos pneus inservíveis encontrados no levantamento bibliográfico.

Fonte	Poder Calorífico	Particularidades
ETRMA (2011)	Veículos de passeio: 29,5 – 30,6 MJ/kg Caminhões: 26,1 – 26,7 MJ/kg	Estudo com duração de 3 anos, lançado em 2009, conduzido pela Aliapur (principal empresa de recuperação de pneus inservíveis na França).
FREITAS (2011) <i>apud</i> SOUZA (2011)	Mínimo: 7000 kcal/kg (29,3 MJ/kg) Médio: 7250 kcal/kg (30,4 MJ/kg) Máximo: 7500 kcal/kg (31,4 MJ/kg)	Dado obtido através de comunicação via email de SOUZA (2011) com a Agência Nacional do Petróleo (ANP). Não fornece nenhum detalhamento de como foi obtido o valor em si.
GIERÉA <i>et al.</i> (2006) <i>apud</i> SIENKIEWICZ <i>et al.</i> (2012)	32,0 MJ/kg	Poder calorífico do pneu inservível em geral, sem especificar detalhes do estudo ou do estado do pneu.
GIUGLIANO, CERNUSCHI, <i>et al.</i> (1999)	Praticamente 7500 kcal/kg (31,4 MJ/kg) em termos de poder calorífico inferior	Dado experimental do poder calorífico do pneu inservível sem aço.

(Fonte: Elaboração Própria)

Como pode ser visto na tabela acima, apenas uma fonte descreve em que condição está o pneu inservível para a obtenção do poder calorífico. Esta descrição seria importante para a comparação com o valor obtido no estudo de caso, de 26 MJ/kg, uma vez que a presença de alguns componentes, como o aço, podem afetar o resultado.

Mesmo assim, julgou-se pertinente a análise da influência deste parâmetro no total das emissões da queima do pneu inservível em fornos de clínquer. A Tabela 14 apresenta os valores mínimo, médio e máximo do poder calorífico, considerando tanto as fontes bibliográficas quanto o estudo de caso. Nota-se que o valor mínimo é o adotado neste trabalho. Para realização da análise de sensibilidade, optou-se por estimar as emissões considerando tanto o valor médio quanto o valor máximo.

**Tabela 14:** Valores mínimo, médio e máximo do poder calorífico do pneu inservível e o intervalo de variação dos dados.

Poder calorífico (MJ/kg)			Intervalo de variação
Mínimo	Médio	Máximo	
26,0	29,3	32,0	18,75%

(Fonte: Elaboração própria com base em ETRMA (2011), FREITAS (2011) *apud* SOUZA (2011), GIERÉA *et al.* (2006) *apud* SIENKIEWICZ *et al.* (2012) e GIUGLIANO, CERNUSCHI, *et al.* (1999))

É importante destacar que os cálculos foram uniformizados pela energia total gerada na queima, que permanece constante. Com a utilização de combustíveis com maior poder calorífico, reduz-se o montante queimado no forno, mas, como o fator de emissão do pneu inservível é baseado no poder calorífico deste combustível, as emissões de CO<sub>2</sub> não se alteram.

Onde pode se observar uma redução nas emissões é na cadeia de suprimentos do pneu inservível, uma vez que seria necessário transportar uma quantidade menor de pneus para obtenção da mesma quantidade de energia. Contudo, como pode ser visto na Tabela 15, esta redução é ínfima quando comparado ao total, sendo de apenas 0,15% quando comparado com o valor médio e 0,24% se comparado ao máximo. Com relação apenas à cadeia de suprimentos, a redução foi de 11,3% e 18,8%, respectivamente.

**Tabela 15:** Variação nas emissões no ciclo de vida do pneu inservível mantendo-se constante o total de energia gerado no forno de clínquer.

Meso-estágio	Micro-estágio	Estudo de caso (tCO <sub>2</sub> /ano)	Valor médio (tCO <sub>2</sub> /ano)	Valor máximo (tCO <sub>2</sub> /ano)
Produção da Matéria Prima	Carregamento dos caminhões	0,0	0,0	0,0
Transporte da Matéria Prima	Transporte rodoviário até a unidade da CBL	48,5	43,1	39,4
	Descarregamento na CBL	2,4	2,1	2,0
Destino Intermediário	Trituração e estocagem	111,2	98,7	90,4
Transporte da Fonte de Energia	Carregamento dos caminhões	21,9	19,5	17,8
	Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo	163,0	144,7	132,5
	Descarga dos caminhões e movimentação dentro da unidade	2,3	2,1	1,9
Queima em Fornos de Clínquer	Queima do combustível	26.520,0	26.520,0	26.520,0
<b>TOTAL</b>		26.869,5	26.830,1	26.804,0

(Fonte: Elaboração Própria)

Outra abordagem possível considera ainda a variação do poder calorífico adotado com manutenção da quantidade de pneus inservíveis triturados que entra no forno de clínquer (12 mil toneladas). Isto implicaria em um crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> devido ao aumento do poder calorífico. Com o aumento da energia gerada, seria possível substituir uma maior quantidade de coque de petróleo com as mesmas 12 mil toneladas de pneu. Enquanto no estudo de caso essa quantidade substitui 9.600 toneladas de coque, considerando o valor médio do poder calorífico é possível substituir 10.818 toneladas e utilizando o valor máximo, 11.815 toneladas.

Este cenário concorre para que as emissões da cadeia de suprimentos do pneu inservível mantenham-se constantes, com aumento apenas no processo de queima, mas implica em um aumento das emissões de todo o ciclo do coque de petróleo, como pode ser visto na Tabela 16.

**Tabela 16:** Variação nas emissões no ciclo de vida do coque de petróleo mantendo-se constante o total de pneu inservível no forno de clínquer.

Meso-estágio	Micro-estágio	Estudo de caso (tCO <sub>2</sub> /ano)	Valor médio (tCO <sub>2</sub> /ano)	Valor máximo (tCO <sub>2</sub> /ano)
Produção da Matéria Prima	Embarque do coque de petróleo nos EUA	10,9	12,3	13,5
Transporte da Matéria Prima	Transporte marítimo	308,3	347,4	379,4
	Desembarque no TUP de Praia Mole	13,0	14,7	16,1
Destino Intermediário	Estocagem	0,0	0,0	0,0
Transporte da Fonte de Energia	Carregamento dos caminhões	0,3	0,3	0,3
	Transporte rodoviário até a unidade de Cantagalo	167,0	188,2	205,6
	Descarga dos caminhões em Cantagalo	0,3	0,3	0,3
Queima em Fornos de Clínquer	Movimentação dentro da unidade	2,3	2,6	2,9
	Queima do combustível	28.953,6	32.628,5	35.635,2
<b>TOTAL</b>		<b>29.455,8</b>	<b>33.194,4</b>	<b>36.253,2</b>

(Fonte: Elaboração Própria)

A fim de comparação, a Tabela 17 mostra as emissões de CO<sub>2</sub> tanto do coque de petróleo (já demonstradas na Tabela 16) quanto do pneu inservível quando considerada o mesmo aporte de pneus triturados no forno, variando-se os valores do seu poder calorífico. Como a energia liberada é a base de cálculo utilizada nas contas e como a cadeia de suprimentos do pneu inservível é relativamente pequena em relação à emissão total, esta variação influencia apenas de forma absoluta na diferença entre os ciclos de vida. Pode-se concluir, então, que o aumento do poder calorífico do pneu inservível acentuaria a vantagem absoluta da substituição deste pelo coque de petróleo, em relação à emissão de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 17:** Resumo das emissões de CO<sub>2</sub> dos ciclos de vida do pneu inservível e do coque de petróleo a partir da variação do poder calorífico do pneu.

<b>Cenário considerado para o poder calorífico do pneu inservível</b>	<b>Emissão total do ciclo de vida do pneu inservível (tCO<sub>2</sub>/ano)</b>	<b>Emissão total do ciclo de vida do coque de petróleo (tCO<sub>2</sub>/ano)</b>	<b>Varição absoluta das emissões entre os ciclos de vida (tCO<sub>2</sub>/ano)</b>
Estudo de caso	26.867,0	29.455,8	2.588,7
Valor médio	30.277,1	33.194,4	2.917,3
Valor máximo	33.067,1	36.253,2	3.186,1

(Fonte: Elaboração Própria)

Após esta análise, torna-se possível a realização de uma crítica ao modo como estão dispostas as informações para realização de inventários de GEE de empresas de cimento. O poder calorífico do pneu inservível, assim como o seu fator de emissão, são diretamente relacionados ao estado em que ele se encontra ao ser queimado nos fornos de clínquer. A ausência de informações sobre o levantamento feito para obtenção do fator de emissão deste combustível permite uma variação do quanto foi emitido, dependendo exclusivamente do poder calorífico adotado.

#### 4.3.2. Cenário 2: Carbono de biomassa

De acordo com IPCC (2006b), quando há combustíveis com frações de biomassa deve-se estabelecer a divisão entre esta e a fração fóssil, a fim de adequar o seu fator de emissão. As emissões de combustíveis que contenham alguma fração de biomassa

não devem ser completamente computadas no balanço de emissões de GEE, devendo ser apenas informadas.

Isto porque emissões advindas da queima de biomassa são tidas como renováveis, uma vez que durante o crescimento da biomassa haverá consumo de CO<sub>2</sub> sendo, portanto, teoricamente nulo o acúmulo na atmosfera. Este dióxido de carbono emitido é conhecido como “carbono-neutro”.

Diferentemente do carvão e do coque de petróleo, pneus inservíveis quando queimados emitem uma fração de “carbono – neutro”, devido aos seus componentes orgânicos, como por exemplo, a borracha natural (ETRMA, 2011).

Neste sentido, a CSI (2011) promoveu um estudo entre 2008 e 2009 a fim de determinar a fração de carbono de biomassa de diversos combustíveis alternativos para cimenteiras. Apenas os pneus inservíveis apresentaram dados consistentes o suficiente para que se chegasse ao valor *default* de carbono de biomassa de 27%. Este valor coincide com aqueles adotados em diferentes países europeus, como Áustria e Alemanha, para o reporte de emissões dentro do European Emissions Trading Scheme.

Com isso, o fator de emissão considerado neste cenário é 27% menor do que aquele considerado na seção 4.2.2.1h), equivalendo a 62,1 kgCO<sub>2</sub>/GJ. Assim, utilizando os parâmetro utilizados anteriormente e a equação 8 tem-se um novo valor de emissão de 19.359,6 tCO<sub>2</sub>/ano.

No total, os resultados do estudo de caso do pneu inservível foram de 19.709,1 tCO<sub>2</sub>/ano contra 29.455,8 tCO<sub>2</sub>/ano do coque. Esta redução representa uma diferença de 33,1% entre os totais emitidos pelas fontes de energia o que é 24,3% maior do que aquela observada quando o carbono de biomassa do pneu inservível é computado no resultado final.

A partir disso, reforça-se a ideia de que o uso de pneus inservíveis representa uma melhora significativa no que concerne à emissão de CO<sub>2</sub> pela indústria cimenteira.

#### 4.3.3. Cenário 3: Mudança no tipo do navio

O tipo de navio utilizado para se estimar as emissões do transporte do coque de petróleo dos EUA até o TUP de Praia Mole foi o *Panamax*, uma vez que este foi o primeiro navio contratado em 2013 pela Lafarge Brasil S.A. No entanto, durante as entrevista, afirmou-se que o principal tipo de navio que realizava este trajeto com este fim era o *Handymax* (LAZARINI, 2013). Assim, julgou-se adequado analisar como o parâmetro de escolha do navio influencia os resultados.

Utilizando as mesmas fontes compiladas por RODRIGUES (2013) sobre o consumo dos navios graneleiros, tem-se em resumo os dados de consumo de combustível do *Handymax* na Tabela 18.

**Tabela 18:** Informações de consumo para navios do grupo *Handymax*.

Tamanho (DWT)	Velocidade Média (nós)	Consumo IFO Navegando (t/dia) <sup>1</sup>	Consumo MDO Navegando (t/dia) <sup>1</sup>	Consumo IFO no Porto (t/dia)	Consumo MDO no Porto (t/dia)
52.454,00	14	30	0,2	1,5	1,5

1 - Considerar o mesmo consumo para navegação vazio em *ballast*.

2 – Média do consumo entre registros dos navios.

(Fonte: Adaptado de *The Baltic Exchange* (2012), *RightShip* (2012), *Clarksons* (2012) e *Lloyd's List Intelligence* (2012) apud RODRIGUES, 2013)

Com base nas variáveis acima e na equação 12, calcula-se que, se fosse utilizado o navio *Handymax*, as emissões seriam de 274,5 tCO<sub>2</sub>/ano contra 308,3 tCO<sub>2</sub>/ano no caso do navio *Panamax* durante o trajeto do Golfo do México até Praia Mole. Esta troca representa uma redução de 10,9% neste processo da cadeia de suprimentos. Já para o desembarque no porto brasileiro, esta redução seria de 18,0%.

No somatório total das emissões do coque, considerando as 9.600 toneladas que são substituídas por pneus inservíveis anualmente na unidade de Cantagalo, o montante sofreria uma redução 0,12%, sendo irrelevante. Considerando o somatório de todas as outras etapas do ciclo de vida excetuando-se a queima no forno rotativo, nota-se uma redução 7,2% no total emitido, passando de 502,2 tCO<sub>2</sub>/ano para 466,1 tCO<sub>2</sub>/ano.

Ao se comparar os ciclos de vida do coque de petróleo e do pneu inservível tendo em visto este novo cenário, nota-se que o coque continua emitindo mais CO<sub>2</sub>. A diferença entre os dois ciclos de vida diminui para 8,7%, ou seja, apenas 0,1% menor se comparado ao valor com a utilização do navio tipo *Panamax*.

## 5. CONCLUSÃO, LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantidade de pneus inservíveis gerados vem crescendo ano a ano. Estes resíduos dispostos inadequadamente constituem um passivo ambiental que pode resultar em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. Portanto, é imprescindível que o pneu seja disposto corretamente, de modo a prevenir o seu acúmulo no meio ambiente.

Este desafio pode se transformar em uma oportunidade, através da reinserção do pneu inservível em um ciclo produtivo. Com isso, torna-se possível ir além da

mitigação dos impactos abordados, contribuindo de outras formas com o meio ambiente e maximizando os ganhos econômicos.

Neste sentido, foram feitos levantamentos bibliográficos que indicaram o coprocessamento de pneus inservíveis em fornos de cimenteiras para a produção do clínquer como uma opção atraente, sendo uma das principais destinações atuais.

Essa opção permite o uso do pneu inservível como um todo, não gerando resíduos extras uma vez que até as cinzas produzidas durante a queima são incorporadas ao clínquer. Assim, visando ampliar a análise de toda a cadeia produtiva do pneu inservível, realizou-se um ICV, seguindo a metodologia proposta por D'AGOSTO e RIBEIRO (2009).

Um dos aspectos ambientais mais relevantes no cenário global está relacionado ao aumento da concentração dos gases do efeito estufa. Tendo isso em vista, mostrou-se pertinente a análise das emissões de CO<sub>2</sub>, principal gás contribuinte para o incremento do efeito estufa, na cadeia produtiva do pneu inservível destinado aos fornos de cimenteiras.

Para proceder com a análise proposta, foi necessário avaliar não só o ciclo de vida do pneu inservível, mas também o do coque de petróleo, por ser este o principal combustível atualmente utilizado que é parcialmente substituído pelos pneus. Para isso, realizou-se um estudo de caso para a unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A., que é uma das grandes empresas de cimento do mundo.

A partir da estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> constatou-se que o ciclo de vida do pneu inservível emite 8,8% a menos do que o do coque de petróleo. Ambos, porém, possuem como principal contribuição para as emissões de CO<sub>2</sub> o último meso-estágio, a queima do combustível, representando 98,3 e 98,7%, respectivamente.

Neste sentido, pode-se concluir que o pneu inservível tem no coprocessamento uma vantagem adicional à retirada do meio ambiente, para o estudo de caso em questão. Os cálculos realizados a partir do ciclo de vida traçado mostraram que a substituição do coque de petróleo pelo pneu inservível representa também uma redução das emissões de CO<sub>2</sub>, beneficiando tanto o meio ambiente quanto a indústria.

Além disso, mesmo considerando apenas as cadeias de suprimentos, percebe-se que a maior fonte de emissões também é a do coque de petróleo, com 502,2 tCO<sub>2</sub>/ano contra 349,5 tCO<sub>2</sub>/ano do pneu. Este fato deve-se à longa distância percorrida pelo transporte marítimo, tendo em vista a importação do coque estadunidense. Assim, percebe-se que, tendo em vista as emissões de dióxido de carbono, o pneu inservível é mais adequado para o uso em fornos de clínquer do que o coque de petróleo no estudo de caso.

Buscando ampliar a abordagem e refinar o estudo, realizou-se uma análise de sensibilidade considerando alguns cenários distintos daqueles definidos no estudo de caso. O primeiro cenário teve como objetivo avaliar a variação no resultado final da adoção de diferentes valores de poder calorífico do pneu inservível, trocando o valor real do estudo de caso por valores bibliográficos, médios e máximos. Pode-se concluir que o estado do pneu quando utilizado como combustível influencia na sua emissão de CO<sub>2</sub> na queima. Além disso, pode-se observar que com um maior poder calorífico, aumenta-se ligeiramente a vantagem do pneu em relação ao coque.

Outro cenário desconsiderou a contribuição para o balanço total das emissões de CO<sub>2</sub> advinda da fração de biomassa do pneu inservível na determinação do seu fator de emissão. Esta hipótese reduziu as emissões desta cadeia, indicando uma maior vantagem do pneu inservível frente ao coque de petróleo em relação às emissões de CO<sub>2</sub>.

O terceiro cenário considerou a mudança de navio, do tipo Panamax para o Handymax. Esta mudança afetou pouco o balanço total das emissões, apesar de ter apontado para uma redução nas emissões neste elo da cadeia do coque de petróleo.

Devido ao tempo que pode ser alocado em um projeto de conclusão de curso de graduação, algumas restrições foram adotadas para o desenvolvimento do trabalho.

Como já foi abordado, o CO<sub>2</sub> foi escolhido como único gás de efeito estufa a ser considerado na análise por apresentar dados disponíveis para o cálculo de suas emissões em diversos processos e devido à sua importância, baseado nas referências apresentadas.

Uma ressalva também deve ser feita no sentido de reafirmar que os dados apresentados representam um estudo de caso específico. Por ser uma referência, tanto em tecnologia de produção quanto na localização, próxima a diversas indústrias cimenteiras importantes, a unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A. é uma referência para o setor. Assim, a aplicação do ICV para comparação dos ciclos de vida do pneu inservível e do coque de petróleo desenvolvida no estudo pode ser estendida a outros casos, apresentando diferenças particulares que devem ser analisadas a cada caso, sendo uma contribuição deste trabalho.

Algumas limitações de dados foram encontradas, como os do porto de Point Comfort, a quantidade exata de pneus que vinha de cada ecoponto e as emissões de nível 2 devido à movimentações do pneu inservível e do coque na planta cimenteira, entre outras. Os valores adotados para estes casos foram aproximados e sustentados ao longo do trabalho, mas podem representar pequenas variações nos cálculos.

Além disso, em relação à destinação final do pneu inservível, é importante salientar que o fato do coprocessamento ter sido escolhido não indica que esta seja a melhor opção para destinação dos pneus inservíveis gerados em território nacional. Optou-se por utilizar este uso final, visto que este tem ganhado destaque não só no Brasil, mas no mundo. Também não foram considerados todos os impactos ambientais gerados por esta opção produtiva.

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de outros aspectos do coprocessamento de pneu inservíveis em comparação ao uso do coque de petróleo, como emissão de poluentes atmosféricos (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> etc) ou outros gases do efeito estufa (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O etc), com o objetivo de aprofundar a avaliação do quão ambientalmente adequada é esta opção produtiva.

Sugere-se também a realização de análises mais abrangentes do que apenas as emissões atmosféricas, englobando a energia demandada por cada ciclo de vida e aspectos financeiros e sociais.

Por fim, para refinamento dos dados do próprio estudo de caso, sugere-se a realização de medições *in loco* das emissões de CO<sub>2</sub> e compara-las com as estimativas encontradas neste estudo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ABCP, 2009. Fabricação do Cimento. **Portal ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao>>. Acesso em: 25 Março 2013.

ABNT, 2001. *NBR - ISO - 14040 - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ANDRADE, H., 2007. *Pneus Inservíveis: Alternativas Possíveis de Reutilização*. Monografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. Disponível em: <<http://tcc.bu.ufsc.br/Economia293475>>. Acesso em: 18 de maio de 2013.

ANTAQ, 2011. **Panorama Aquaviário – Volume 6**. Agência Nacional de Transportes Aquaviários.

AKASAKA, Y., 2013. “Dados sobre as cadeias logísticas do coque de petróleo da Lafarge Brasil S.A.” *Comunicação pessoal via entrevista*.

BENHELAL, E.; GHOLAMREZA, Z.; EZZATOLLAH, S. *et al.*, 2012 “Global Strategies and Potentials to Curb CO<sub>2</sub> Emissions in Cement Industry” ***Journal of Cleaner Production***, pp.1-20. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0959652612006129/1-s2.0-S0959652612006129-main.pdf?\\_tid=98df6eca-fcb3-11e2-bb68-00000aacb35f&acdnat=1375586087\\_d9949b8e5349122edc169cb2bb942fc5](http://ac.els-cdn.com/S0959652612006129/1-s2.0-S0959652612006129-main.pdf?_tid=98df6eca-fcb3-11e2-bb68-00000aacb35f&acdnat=1375586087_d9949b8e5349122edc169cb2bb942fc5)>. Acesso em: 30 de maio de 2013.

The Harbor Department of the City of Long Beach, 2011. **Comprehensive Annual Financial Report - Year ended September 30, 2010**. Disponível em: <<http://www.polb.com/civica/filebank/blobload.asp?BlobID=9581>>. Acesso em: 05 de maio de 2013.

CAPONERO, J.; TENÓRIO, J.; LEVENDIS, Y. *et al.*, 2003. “Emissões Tóxicas da Queima de Pneus Inservíveis” In: *1º Fórum de Universidades Públicas de São Paulo – Ciência e Tecnologia de Resíduos*, São Pedro (Jun), SP, Brasil.

CIMINO, M. A.; ZANTA, V. M., 2005. “Gerenciamento de pneumáticos inservíveis (GPI): análise crítica de ações institucionais e tecnologias para minimização” ***Engenharia Sanitária e Ambiental***, v. 10, n. 4 (Out), pp. 299-306. Disponível em: <

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522005000400006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522005000400006)>.  
Acesso em: 23 de abril de 2013.

COOK, A.; KEMM, J., 2004. "Health Impact Assessment of Proposal to Burn Tyres in a Cement Plant" *Environmental Impact Assessment Review*, n. 24, pp. 207–216. Disponível em: < [http://ac.els-cdn.com/S0195925503001756/1-s2.0-S0195925503001756-main.pdf?\\_tid=645c0aa0-fcb3-11e2-b422-00000aab0f01&acdnat=1375585998\\_1f1d0aaf0494d3d06b2413b64a1ebe97](http://ac.els-cdn.com/S0195925503001756/1-s2.0-S0195925503001756-main.pdf?_tid=645c0aa0-fcb3-11e2-b422-00000aab0f01&acdnat=1375585998_1f1d0aaf0494d3d06b2413b64a1ebe97)>. Acesso em: 27 de março de 2013.

CSI, 2011. **CO<sub>2</sub> and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry - Version 3.0**. Cement Sustainability Initiative. Disponível em: <[http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD\\_CO2\\_Protocol\\_En.pdf](http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD_CO2_Protocol_En.pdf)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2013.

DA SILVA, E. L.; MENEZES, E. M., 2001. *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. 3 ed. Florianópolis, Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

D'AGOSTO, M., 2004. *Análise da Eficiência da Cadeia Energética para as Principais Fontes de Energia Utilizadas em Veículos Rodoviários no Brasil*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

D'AGOSTO, M.; RIBEIRO, S. K., 2009 "Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n.13, pp. 1326 - 1337.

EGGLESTON, H., BUENDIA, L., MIWA, K. *et al.*, 2006a. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. Chapter 1: Introduction**. IPCC - Internacional Panel on Climate Change. Disponível em: < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2013.

EGGLESTON, H., BUENDIA, L., MIWA, K. *et al.*, 2006b. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2: Energy. Chapter 3: Mobile Combustion**. IPCC - Internacional Panel on Climate Change. Disponível em: < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>>. Acesso em: 25 de junho de 2013.

EIA, 2013. **Quarterly Coal Report, October – December 2012**. U.S. Energy Information Administration. Disponível em: < <http://www.eia.gov/coal/production/quarterly/>>. Acesso em: 27 de abril de 2013.

EPA, 2002. **Study of Exhaust Emissions from Idling Heavy-Duty Diesel Trucks and Commercially Available Idle-Reducing Devices**. United States Environmental Protection Agency. Disponível em: < <http://www.eia.gov/coal/production/quarterly/>>. Acesso em: 30 de junho de 2013.

ETRMA, 2011. **End of Life Tyres: A Valuable Resource with Growing Potential**. European Tyre & Rubber Manufacturer's Association. Disponível em: < <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/brochure-elt-2011-final.pdf>> Acesso em: 25 de novembro de 2012.

FARENZENA, H, 2011. Clinquer. **Blog do Cimento**. Disponível em: <<http://blogdocumento.blogspot.com.br/2011/06/clinquer-fonte-eng-helio-farenzena.html>>. Acesso em: 25 Fevereiro 2013.

FARIA, E., 2007. “Logística de Abastecimento de Carvão Mineral Importado para o Sistema Usiminas” **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.3, n.3, pp. 12-15. Disponível em: < <http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/811196.pdf>>. Acesso em: 23 de abril de 2013.

GIUGLIANO, M.; CERNUSCHI, S.; GHEZZI, U. *et al.*, 1999. “Experimental Evaluation of Waste Tires Utilization in Cement Kilns” **Journal of the Air & Waste Management Association**, n. 49, pp. 1405-1414 Disponível em: < <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10473289.1999.10463976>>. Acesso em: 27 de janeiro de 2013.

GOBBI, A., 2002. *Reaproveitamento de Pneus Inservíveis como Fonte de Energia e Matéria-Prima*. Dissertação de M.Sc., UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: < <http://www.peamb.eng.uerj.br/producao.php?id=111>>. Acesso em: 10 de novembro de 2012.

IBAMA, 2011. **Pontos de coleta de pneus inservíveis cadastrados por importadores e fabricantes de pneus no ano de 2011**. IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: < <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CD4QFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.ibama.gov.br%2Fphocadownload%2Fcategory%2F>

4%3Fdownload%3D5701%253Apontos-coleta-pneus-2011&ei=4Mb9UceRJJDM8gSNyYBY&usg=AFQjCNH04t9aZVTdWjga9VwHwEA6IL\_Sjg&bvm=bv.50165853,d.eWU&cad=rja>. Acesso em: 15 de maio de 2013.

ICCT, 2007. **Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions from Ocean-going Ships: Impacts, Mitigation Options and Opportunities for Managing Growth**. The International Council on Clean Transportation. Disponível em: <[http://www.agati.com/site/files/822/78282/293703/404970/Ocean\\_Freight\\_Pollution.pdf](http://www.agati.com/site/files/822/78282/293703/404970/Ocean_Freight_Pollution.pdf)>. Acesso em: 20 de maio de 2013.

IMO, 2009. **Second IMO GHG, Study 2009**. International Maritime Organization. Londres, Reino Unido. Disponível em: <[http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data\\_id=27795&filename=GHGStudyFINAL.pdf](http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=27795&filename=GHGStudyFINAL.pdf)>. Acesso em: 15 de março de 2013.

IPCC, 1995. **Second Assessment Climate Change**. Internacional Panel on Climate Change. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml#UfGmkK41wrgw](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#UfGmkK41wrgw)>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2013.

LTC, 2011. **Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro**. LABORATÓRIO DE TRANSPORTE DE CARGAS, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LAFARGE, 2004. **Relatório Social e Ambiental - Unidade Cantagalo**. Disponível em: <[http://www.lafarge.com.br/rel2003%202004\\_cantagalo.pdf](http://www.lafarge.com.br/rel2003%202004_cantagalo.pdf)>. Acesso em: 20 de maio de 2013.

LAFARGE, 2010. Sala de Imprensa - Últimas Notícias / Releases. **Lafarge - Construindo Cidades Melhores**, 2010. Disponível em: <[http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/7\\_1-Releases?WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib\\_br/Site\\_br/AllPR/2009/PressRelease\\_1270065505451/PressReleaseHeader](http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/7_1-Releases?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib_br/Site_br/AllPR/2009/PressRelease_1270065505451/PressReleaseHeader)>. Acesso em: 18 Maio 2013.

LAFARGE BRASIL S.A, 2013. Onde estamos. **Site da Lafarge**. Disponível em: <[http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/2\\_8-Contacts\\_AND\\_locations](http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/2_8-Contacts_AND_locations)>. Acesso em: 20 maio 2013.

LAGARINHOS, C., 2004. *Reciclagem de Pneus: Coleta e Reciclagem de Pneus. Co-processamento na Indústria de Cimento, Petrobrás SIX e Pavimentação Asfáltica*. Dissertação apresentada ao curso de Tecnologia Ambiental como requisito para sua conclusão, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetailObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=197403](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetailObraForm.do?select_action=&co_obra=197403)>. Acesso em: 21 de novembro de 2012.

LAGARINHOS, C.; TENÓRIO, J., 2008. “Reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil” *Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, n. 2, pp.106-118.

LAZARINI, M., 2013. “Dados sobre a cadeia logística do coque de petróleo da Lafarge Brasil S.A.”. *Comunicação pessoal via entrevista*.

LEMIEUX, P.; LUTES, C.; SANTOIANI, D., 2004. “Emissions of Organic Air Toxics from Open Burning: a Comprehensive Review” *Progress in Energy and Combustion Science*, n. 30, pp. 1–32.

MARINGOLO, V., 2001. *Clínquer Co-processado: Produto de Tecnologia Integrada para Sustentabilidade e Competitividade da Indústria de Cimento*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-16022006-132935/>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2013.

MCT, 2010a. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0213/213909.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0213/213909.pdf)>. Acesso em: 15 de março de 2013.

MCT, 2010b. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/310922/Segundo\\_Inventario\\_Brasileiro\\_de\\_Emissoes\\_e\\_Remocoes\\_Antropicas\\_de\\_Gases\\_de\\_Efeito\\_Estufa.html](http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/310922/Segundo_Inventario_Brasileiro_de_Emissoes_e_Remocoes_Antropicas_de_Gases_de_Efeito_Estufa.html)>. Acesso em: 15 de março de 2013.

MCTI, 2008. Mudanças Climáticas. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação**, 2008. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em: 17 maio 2013.

MDIC, 2012. **Plano Setorial de Mitigação da Mudança Climática para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80076/Industria.pdf>>. Acesso em: 17 de maio de 2013.

MILANEZ, B., 2007. “Co-incineração de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento: Problemas e Desafios” *IX ENGEMA - ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE*, [s.n.], Curitiba, PR, Brasil, 19 – 21 de novembro.

MMA, 2009. **Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009. Altera e complementa a Resolução nº 258**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama.>> Acesso em: 17 de maio de 2013.

MMA, 2011. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Departamento de Mudanças Climáticas. Gerência de Qualidade do Ar. Brasil.

MENDES, 2013. “Dados sobre o ciclo de vida do pneu inservível e o funcionamento da unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A.” *Comunicação pessoal via entrevista*.

MONTEIRO, L.; MAINIER, F., 2008. “Queima de Pneus Inservíveis em Fornos de Clínquer” *ENGEVISTA*, v. 10 (Jun), pp. 52-58.

MOTTA, F., 2008. “Cadeia de Destinação dos Pneus Inservíveis – O Papel da Regulação e do Desenvolvimento Tecnológico” *Desenvolvimento Tecnológico Ambiente & Sociedade*, v. XI, n. 1, pp. 167-184. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v11n1/11.pdf>>. Acesso em: 27 de janeiro de 2013.

NETL, 2008. **Development of Baseline Data and Analysis of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Petroleum-Based Fuels**. U. S. National Energy

Technology Laboratory. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/NETL%20LCA%20Petroleum-based%20Fuels%20Nov%202008.pdf>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2013.

PIPILIKAKI, P.; KATSIOTI, M.; PAPAGEORGIOU, D. *et al.*, 2005. "Use of Tire Derived Fuel in Clinker Burning" **Cement & Concrete Composites**, v. 27, pp. 843–847. Disponível em: <[http://www.aitec-ambiente.org/Portals/2/docs/publici/Documenti/Raccolta%20bibliografica/AITEC\\_CES ISP\\_Stato%20arte%20-%20letteratura/Pipilikaki%202005\\_pneuamntici\\_RE.pdf](http://www.aitec-ambiente.org/Portals/2/docs/publici/Documenti/Raccolta%20bibliografica/AITEC_CES ISP_Stato%20arte%20-%20letteratura/Pipilikaki%202005_pneuamntici_RE.pdf)>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2013.

RECICLANIP, 2012. Principais Destinações. **RECICLANIP - o ciclo sustentável do pneu**. Disponível em: <<http://www.reciclanip.com.br/v3/formas-de-destinacao-principais-destinacoes>>. Acesso em: 7 de junho de 2013.

RECICLANIP, 2013. Pontos de Coleta no Brasil. **RECICLANIP - o ciclo sustentável do pneu**. Disponível em: <<http://www.reciclanip.com.br/v3/pontos-coleta/brasil>>. Acesso em: 2 de maio de 2013.

ROCHA, S.; LINS, V.; ESPÍRITO SANTO, B., 2011 "Aspectos do Coprocessamento de Resíduos em Fornos de Clínquer" **Eng Sanit Ambient**, v.16, n.1, pp. 1-10.

RODRIGUES, V., 2013a. "Dados sobre o transporte marítimo do coque e o funcionamento do terminal portuário de Praia Mole administrado pela Vale S.A." *Comunicação pessoal via entrevista*.

RODRIGUES, V., 2013b. *Análise dos Impactos Ambientais da Navegação de Cabotagem no Brasil: O Caso do Transporte de Minério de Ferro para a Siderúrgica do Pecém*. Dissertação de M.Sc., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTI, A.; SEVÁ, A., 2004. "Combustíveis e Riscos Ambientais na Fabricação de Cimento; Casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e Possíveis Generalizações" In: *II ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE – ANPPAS*. Campinas, SP, Brasil.

SIENKIEWICZ, M., KUCINSKA-LIPKA, J.; JANIK, H. *et al.*, 2012 "Progress in Used Tyres Management in the European Union: a Review" **Waste Management**, n. 32, pp. 1742–1751. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0956053X1200219X/1-s2.0-S0956053X1200219X-main.pdf?\\_tid=452830fe-fcb4-11e2-bd6e-](http://ac.els-cdn.com/S0956053X1200219X/1-s2.0-S0956053X1200219X-main.pdf?_tid=452830fe-fcb4-11e2-bd6e-)

00000aab0f6c&acdnat=1375586376\_5ec02a84bc81bc6d9f7e98bf9e3a7073>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2013.

SILVA, O.; MENDES, E., 2013. “Dados sobre o transporte rodoviário do pneu inservível da CBL até a unidade de Cantagalo da Lafarge Brasil S.A.” *Comunicação pessoal via entrevista*.

SILVESTRAVICIUTE, I.; KARALIUNAITE, I., 2006. “Comparison of End-of-Life Tyre Treatment Technologies: Life Cycle Inventory Analysis” *Environmental Research, Engineering and Management*, n. 35, pp. 52-60. Disponível em: < [http://apini.ktu.edu/lt/Zurnalas/Straipsniai/35/07-straipsnis\\_padangos.pdf](http://apini.ktu.edu/lt/Zurnalas/Straipsniai/35/07-straipsnis_padangos.pdf)>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2013.

SNIC, 2008. **Relatório Anual**. Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/pdf/relat2008-9web.pdf>>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2013.

SOUZA, C., 2011. *Análise da Cadeia de Valor Aplicada a Cadeias Logísticas Reversas. Uma Contribuição ao Reaproveitamento de Pneus Inservíveis*. Dissertação de M.Sc., UFRJ/ COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SOUZA, C.; D'AGOSTO, M., 2010. “Modelo Conceitual da Cadeia Logística Reversa de Pneus Inservíveis”. In: *Anais do XXIV Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*. Salvador, BA, Brasil, nov/dez.

STARCREST CONSULTING GROUP, L., 2011. **Port of Long Beach Air Emissions Inventory – 2010**. The Port of Long Beach.

UNITED STATES DEPARTMENT OF STATE, 2013. **Draft Supplemental Environmental Impact Statement for the Keystone XL Project**. Disponível em: < <http://keystonepipeline-xl.state.gov/draftseis/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2013.

VERSCHOOR, A. H.; REIJNDERS, L., 1999. “The use of life cycle methods by seven major companies” *Journal of Cleaner Production*, n. 7, pp.375-382. Disponível em: < <http://data2.xjlas.ac.cn:81/UploadFiles/sdz/cnki/%E5%A4%96%E6%96%87/ELSEVIER/environmental%20risk%20assessment/45.pdf>>. Acesso em: 15 de março de 2013.