

Avaliação do ciclo de vida de telha ecológica à base de papel reciclado

K. S. O. Yoshimura^{1*}, H. N. Yoshimura², H. Wiebeck¹

¹Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica

Universidade de São Paulo – USP, Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, 380, CEP 05508-010, São Paulo – SP

²Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – CECS

Universidade Federal do ABC – UFABC, Rua Santa Adélia, 166, CEP 09210-170, Santo André – SP

(Recebido em 20/10/2011; revisado em 26/03/2012; aceito em 01/05/2012)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O método de avaliação de ciclo de vida (ACV) possibilita avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a um produto, serviço ou atividade. O objetivo deste trabalho foi identificar as oportunidades de melhoria no desempenho ambiental das telhas ecológicas, produzidas a partir de resíduo de pós-consumo de papel, utilizando a metodologia de ACV. O estudo de ACV forneceu o histórico do material, desde o processo de produção, passando pela distribuição, até o descarte do produto. Foram identificados os aspectos mais críticos que podem ser melhorados ao longo do ciclo de vida das telhas. A categoria de impacto com maior contribuição foi o potencial de aquecimento global, decorrente principalmente do processo de produção. A etapa de secagem utilizando secador com queima de GLP (gás liquefeito de petróleo) foi a mais impactante, devido à quantidade de CO₂ emitida para a atmosfera. A etapa de distribuição do material contribuiu com a oxidação fotoquímica, a acidificação, a toxicidade humana e a eutrofização, devido à queima de óleo diesel utilizado no transporte rodoviário. Dois outros fatores ambientalmente negativos foram a geração de resíduos sólidos e o destino final das telhas.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida; telhas ecológicas; reciclagem; papel.

Abstract:

The method of life cycle assessment (LCA) allows evaluating the environmental aspects and potential impacts associated with a product, service or activity. The aim of this work was to identify the possibilities of improvements on environmental performance of ecological tiles, produced from waste paper residue, using the methodology of LCA. The study of LCA resulted in a description of the life cycle of the material, involving the production process, distribution and disposal of the product. The most critical aspects of the life cycle of tile that can be improved were identified. The impact category with higher contribution was the global warming potential, mainly due to the production process. The drying process unit using dryers operated with LPG (liquefied petroleum gas) as fuel was the most deleterious because of the amount of CO₂ emitted to the environment. The product distribution step contributed to the photo-oxidant potential, acidification, human toxicity, and eutrophication because of the burning of diesel oil used as fuel in the road transportation. Two others detrimental environmental factors were the generation of solid residues and the final disposal of the tiles.

Keywords: Life cycle assessment; ecological tiles; recycling; paper.

1. Introdução

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é um processo para avaliar a carga ambiental associada com um produto, processo ou atividade, identificando e quantificando a energia e materiais usados e as emissões para o meio ambiente, além de avaliar os impactos do uso da energia e materiais e das emissões para o meio ambiente [1-3].

O ciclo de vida de um produto usualmente compreende as seguintes etapas: extração de recursos naturais, manufatura, uso, manutenção e disposição final do produto [4].

A ACV uma técnica bastante utilizada para auxiliar na tomada de decisão ambiental [5], mas não substitui outras técnicas. Embora seja mais ampla por identificar e quantificar o uso e a transformação dos recursos naturais e os impactos potenciais decorrentes dessas atividades, não considera os aspectos sociais e econômicos de um produto.

A ACV é uma abordagem conhecida como do “berço ao túmulo” para avaliar os sistemas industriais. O berço compreende a extração dos recursos naturais a partir da Terra para a manufatura do produto e o túmulo é o ponto final onde todos os materiais retornam a Terra [6].

*Email: ksoy16@gmail.com. (K. S. O. Yoshimura)

Por incluir os impactos de todo o ciclo de vida do produto, a ACV fornece uma visão compreensiva dos aspectos ambientais do produto ou processo e um quadro mais preciso da importância ambiental na seleção de um produto [7].

Dessa forma, a ACV pode ser utilizada para avaliar e identificar as melhorias no desempenho ambiental de um produto ou processo e auxiliar na tomada de decisão entre produtos que desempenham a mesma função. Por exemplo, Carvalho [8] aplicou a técnica de ACV para avaliar os benefícios ambientais de cimentos Portland com adição de resíduos e concluiu que os impactos ambientais da produção do cimento é inversamente proporcional ao volume de resíduos incorporados.

A estrutura metodológica de uma ACV compreende quatro etapas iterativas: definição do objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto e interpretação dos resultados (Figura 1).

Telhas fabricadas a partir do resíduo de pós-consumo, em particular de papel, são chamadas de telhas ecológicas e tem a mesma função das telhas convencionais: proteger os ambientes de intempéries.

As telhas ecológicas concorrem no mercado de telhas de fibrocimento, sendo que a sua vantagem em relação às outras telhas está principalmente na leveza e flexibilidade [9]. As telhas também ajudam a reduzir ruído, funcionando como isolante acústico e colaboram para diminuir a temperatura. Além de incentivar a reciclagem do papel, evitar a queima ou o depósito em aterros ou outros locais, a produção da telha ajuda as cooperativas de catadores de papel, além de ser uma alternativa para o amianto. Edwards [10] cita que o resíduo de papel é utilizado na indústria da construção civil e um dos produtos é a telha de papel (telha ecológica).

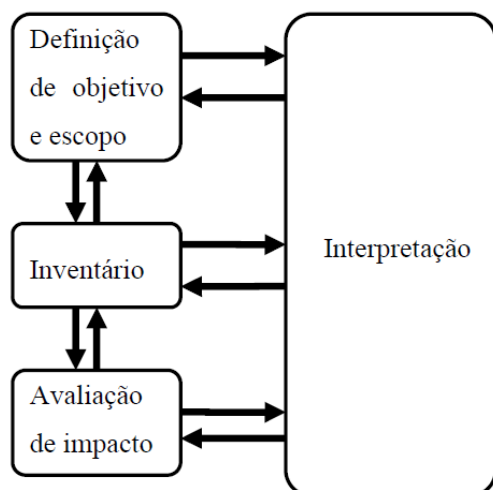


Figura 1. Etapas de uma ACV (adaptado de [11])

O objetivo deste trabalho foi identificar as oportunidades de melhoria no desempenho ambiental das telhas ecológicas,

produzidas a partir de resíduo de pós-consumo de papel, utilizando a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV).

2. Materiais e Métodos

O primeiro estágio da metodologia de ACV envolveu a definição de objetivo e escopo. O objetivo foi apresentado no final da seção 1. O escopo envolveu a análise de telhas ecológicas produzidas e distribuídas pela empresa Fibroflex (Poços de Caldas, Minas Gerais). A fronteira do sistema de análise envolveu as seguintes etapas do ciclo de vida da telha ecológica: produção, uso, distribuição e disposição final. A etapa de extração de matérias-primas foi excluída da análise, pois o produto em estudo foi produzido a partir de resíduos pós-consumos obtidos em aterros.

O segundo estágio envolveu o levantamento do inventário para identificação e quantificação dos materiais, entradas de recursos, emissões e saídas de produtos no ciclo de vida do sistema de produto. Para o material em estudo, as entradas incluíram a matéria-prima, a energia e outros materiais para a manufatura do produto. As saídas incluíram as emissões para o ar, os efluentes líquidos e os resíduos sólidos provenientes das unidades de processo. A Figura 2 apresenta o diagrama de fluxo geral do sistema do produto.

Inicialmente foi necessário definir as unidades de processo de produção da empresa Fibroflex (Figura 3). Em seguida, realizou-se a coleta dos dados de entrada e saída de cada unidade. Para a etapa de distribuição foi levado em conta o transporte rodoviário, forma de distribuição do produto. Os dados foram obtidos junto à empresa Fibroflex.

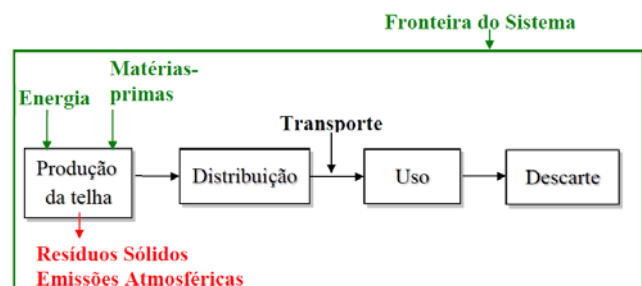


Figura 2. Diagrama de fluxo geral do sistema da telha ecológica

Como critério de exclusão de aspectos ambientais foi adotado a regra de contribuição de massa, sendo todo aspecto com contribuição menor do que 1,0% da massa total das correntes de entrada e saída foi excluído, salvo casos em que o material fosse considerado impactante para o meio ambiente.

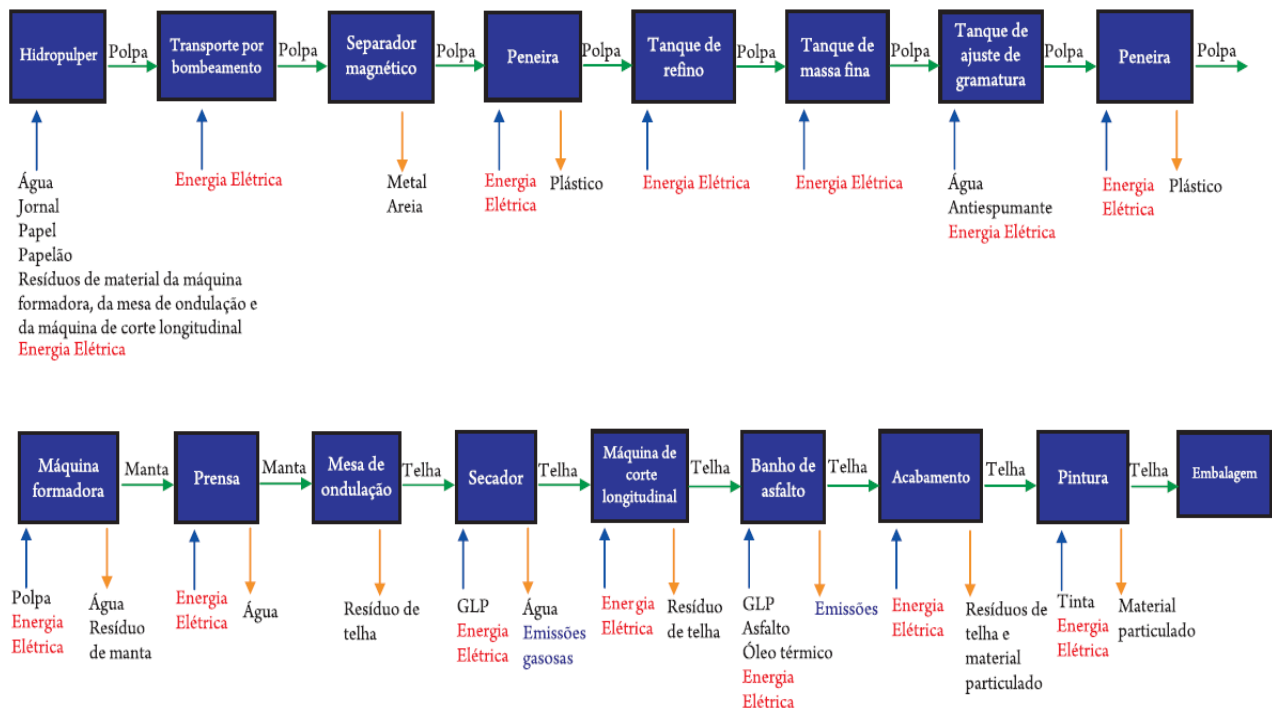


Figura 3. Diagrama de fluxo do processo de produção da telha ecológica

3. Análise de Inventário

3.1. Produção da telha

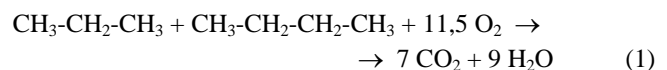
As telhas ecológicas foram produzidas a partir do resíduo de papel pós-consumo, como papel branco, papelão, revista e jornal, obtidos de cooperativas de reciclagem de lixo de Poços de Caldas e cidades vizinhas. O processo de produção contínuo produzia por hora 71 telhas com dimensões aproximadas de 1,4 m de comprimento e 0,71 m de largura (~1 m² de área) e massa de ~6,1 kg.

Os dados coletados nessa etapa foram na sua maioria dados primários obtidos no processo de fabricação, sendo que alguns foram medidos e outros calculados. A Tabela 1 apresenta o resultado da coleta de dados (brutos) para a etapa da produção da telha para uma produção de 105 telhas (correspondente a uma batelada de pesagem do processo).

Os dados da Tabela 1 foram analisados quanto à sua consistência, tratados (convertidos e adequados) e consolidados na Tabela 2. Nesta tabela, duas alterações casadas foram realizadas. A soma das massas de água de recirculação das correntes de saída da máquina formadora e da prensa foi de ~4147 kg (supondo densidade da água de 1 g/cm³, Tabela 1). Estes dados foram calculados com base nas massas dos sólidos destas etapas. Como a massa de água recirculada das correntes de entrada do hidropulper e do tanque de ajuste de gramatura (Tabela 2) foi de 4000 kg e não há emissão de efluentes líquidos para fora da fronteira do sistema de estudo (Figura 3), considerou-se que a massa de

147 kg de água foi perdida no processo, provavelmente por evaporação. Assim, considerou-se que a massa de água de recirculação das correntes de saída foi igual ao valor da água de recirculação da corrente de entrada (Tabela 2). A compensação foi realizada somando-se a diferença de 147 kg de água à massa de água perdida por evaporação do secador no item “evaporação de água do processo” da corrente de saída (Tabela 2).

Como não havia dados de emissões atmosféricas, as massas dos gases emitidos na atmosfera foram calculadas, considerando-se que: a combustão do gás GLP (gás liquefeito de petróleo) foi completa (equipamentos ajustados para esta condição); e o GLP foi composto por 50% de propano e 50% de butano. A reação considerada de combustão do GLP com o oxigênio da atmosfera foi:



Utilizando a Equação 1, as massas de CO₂ e H₂O geradas foram calculadas a partir das massas de GLP utilizadas no secador e no banho de asfalto (correntes de entrada) e os valores estão apresentados na Tabela 2 (correntes de saída). A massa total das correntes de entrada foi 5437 kg (para produção de 105 telhas) e a massa total das correntes de saída foi 6135 kg (Tabela 2). A diferença de 698 kg correspondeu à massa de oxigênio do ar atmosférico consumida na combustão do gás GLP (Equação 1).

Tabela 1. Dados brutos do processo de produção de 105 telhas ecológicas (Fonte: Empresa Fibroflex)

Etapa do processo	Entrada/ Saída	Descrição	Quantidade	Unidade
1) Hidropulper	E	Papel (revista, jornal, papel branco, papelão)	400	kg
		Água recirculada	2000	L
		Água de reposição	300	L
		Sobra máq. formadora	202,5	kg
		Sobra mesa ondulação	10	kg
		Sobra máq. corte long.	40	kg
		Energia elétrica	120	hp
2) Bomba	S	Polpa	2952,5	kg
	E	Polpa	2952,5	kg
	E	Energia elétrica	20	hp
3) Separador magnético	S	Polpa	2952,5	kg
	E	Polpa	2952,5	kg
	S	Polpa	2952,4	kg
4) Peneira 1	S	Resíduo sólido - metal	80	g
		Resíduo sólido - areia	20	g
	E	Polpa	2952,4	kg
	S	Energia elétrica	5	hp
5) Tanque de refino (Refinador)	S	Polpa	2952,39	kg
	E	Resíduo sólido - plástico	10	g
	E	Polpa	2952,39	kg
6) Tanque de massa fina	S	Energia elétrica	78	hp
	E	Polpa	2952,39	kg
	S	Polpa	2952,39	kg
7) Tanque de ajuste de gramatura	E	Polpa	2952,39	kg
	S	Energia elétrica	14	hp
	E	Polpa	2952,39	kg
8) Peneira 2	S	Polpa	2952,39	kg
	E	Água recirculada	2000,00	kg
	S	Antiespumante	2	g
9) Máquina formadora	E	Polpa	4952,392	kg
	S	Polpa	4952,392	kg
	E	Energia elétrica	3	hp
10) Prensa	S	Polpa	4952,382	kg
	E	Resíduo sólido - plástico	10	g
	S	Polpa	4952,382	kg
11) Mesa de ondulação	E	Energia elétrica	72,5	hp
	S	Manta	1417,50	kg
	E	Água para recirculação	3332,374	L
12) Secador	S	Sobra da manta	202,5	kg
	E	Manta	1417,50	kg
	S	Energia elétrica	5	hp
13) Mesa de ondulação	S	Manta	602,70	kg
	E	Água para recirculação	814,80	L
	S	Manta	602,70	kg
14) Secador	S	Telha	592,70	kg
	E	Sobra da manta	10	kg
	S	Telha	592,70	kg
	E	Combustível - GLP	150,15	kg
15) Mesa de ondulação	S	Energia elétrica	55	hp
	E	Telha	389,0	kg
	S	Água de evaporação	203,70	L
		Gás de queima*	---	---

Continuação da Tabela 1. Dados brutos do processo de produção de 105 telhas ecológicas

Etapa do processo	Entrada/ Saída	Descrição	Quantidade	Unidade
13) Máquina de corte longitudinal	E	Telha	389,0	kg
		Energia elétrica	3	hp
	S	Telha	349,0	kg
		Sobra de telha	40	kg
14) Banho de asfalto	E	Telha	349,00	kg
		Asfalto	231,00	kg
		Combustível - GLP	43,68	kg
		Óleo térmico	20	L/mês
	S	Energia elétrica	13,5	hp
		Telha impregnada	580	kg
		Evaporação óleo térmico	20	L/mês
		Gás de queima*	---	---
15) Acabamento: Máquina de corte transversal e Lixadeira	E	Telha impregnada	580	kg
		Energia elétrica	3	hp
	S	Telha	577,5	kg
		Pedaco telha impregnada	2	kg
16) Pintura	E	Material particulado	0,5	kg
		Telha	577,5	kg
		Tinta	60,05	kg
	S	Energia elétrica	40	hp
		Telha	637,55	kg
		Névoa da tinta (perda)	10 a 20	g

Nota: *Ausência de dados.

Os seguintes aspectos ambientais de entrada e de saída da etapa de produção da telha foram considerados:

i) O consumo de antiespumante foi desconsiderado, pois correspondeu a 0,0004% do total da entrada e, assim, muito inferior a 1% (critério de exclusão);

ii) Os descartes de areia, material particulado, metal e plástico corresponderam, respectivamente, somente a 0,0003%, 0,008%, 0,001% e 0,0003% (total de ~0,01%) da massa total de saída, mas, apesar de estarem dentro do valor estipulado para exclusão, não foram excluídos. Como esses materiais foram enviados para o aterro e levando-se em conta a falta de espaço e o tempo de vida curto dos aterros, os descartes desses materiais foram considerados;

iii) As emissões atmosféricas provenientes da decomposição do asfalto não foram consideradas. Como o ponto de fulgor do asfalto empregado era acima de 235°C e o equipamento operava a uma temperatura máxima de 200°C, considerou-se que a possibilidade de emissões de voláteis era mínima na etapa de banho do asfalto;

iv) Quanto às emissões da combustão do GLP, em comparação a outros combustíveis, o GLP pode ser considerado um gás limpo e suas emissões desprezíveis. O problema de emissão está na combustão realizada de forma não controlada, falta de O₂, que resulta em formação de CO e outros compostos. Quando a combustão é completa há

emissão somente de CO₂ e H₂O, como foi considerada na Equação 1;

v) Na etapa de pintura, a névoa da tinta não foi medida, mas foi estimada em torno de 10 a 20 g por batelada de 105 telhas. Como a sua contribuição foi de 0,0002% a 0,0003% da massa de entrada, inferior ao limite mínimo para inclusão, a névoa foi desconsiderada. Para tanto vale a observação de que a tinta era à base de água;

vi) No caso do óleo térmico as emissões não foram consideradas, pois o óleo encontrava-se em um ambiente fechado e a possibilidade de emissão de um poluente, aparentemente, era baixa (a sua fração foi de 0,001%);

vii) O resíduo de material proveniente da etapa de acabamento, resto de telha impregnada da máquina de corte transversal, foi utilizado em outra empresa como combustível, portanto foi considerado como um subproduto;

viii) Os dados de energia elétrica levantados foram referentes às potências nominais dos equipamentos (Tabela 1). Como não havia dados relativos ao consumo individual dos equipamentos, considerou-se o consumo médio de energia elétrica da empresa de 79.747 kWh por mês. Para o cálculo do consumo para fabricação de 105 telhas, considerou-se produção de 71 telhas/hora em jornada de 20 h por dia e 22 dias por mês (Tabela 2).

Tabela 2. Dados consolidados do processo de produção (105 telhas)

	Valor	Unidade	Tipo de dado	Fonte de dado
<i>Correntes de Entrada</i>				
Material Principal				
Matéria-prima ¹	400	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Material recirculado ²	252,5	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Água de recirculação ³	4000	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Água do poço artesiano	300	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Tinta	60	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Asfalto	231	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Material Auxiliar				
Antiespumante ⁴	desconsiderado			
Óleo térmico ^{4,5}	desconsiderado			
Energia				
Elétrica ⁶	432	hp	Secundário	Manual equip.
Combustível (GLP) ⁷	193,83	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
<i>Correntes de Saída</i>				
Produto				
Principal: Telha	637,55	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Subproduto: Resto de telha ⁸	2	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Material de Recirculação				
Água ⁹	4000	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Resíduos retornam processo ²	252,5	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
Resíduos Sólidos ¹⁰	1,52	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS				
Óleo térmico ^{4,5}	desconsiderado			
Névoa da Pintura ⁴	desconsiderado			
Evaporação água processo ¹¹	351	kg/105 telhas	Primário	Linha de prod.
CO ₂ da queima do GLP ¹²	585	kg/105 telhas	Calculado	
H ₂ O da queima do GLP ¹²	306	kg/105 telhas	Calculado	

Notas: Resultados consolidados da Tabela 1: ¹ – Resíduos de papel (revista, jornal, papel branco, papelão); ² – Soma da máquina formadora, mesa de ondulação e máquina de corte longitudinal; ³ – Soma do hidropulper e do tanque de ajuste de gramatura; ⁴ – Desconsiderado por apresentar fração mássica muito inferior a 1% (critério de exclusão); ⁵ – Considerou-se no cálculo da massa do óleo a densidade de 0,8 g/cm³; ⁶ – Soma das energias elétricas de todas as etapas, considerando as potências nominais dos equipamentos; ⁷ – Soma do secador e do banho de asfalto; ⁸ – Da máquina de corte transversal; ⁹ – Foi considerado igual ao valor da água de recirculação da corrente de entrada (vide texto para explanação); ¹⁰ – Soma de metal, areia e plástico do separador magnético e das peneiras; ¹¹ – Soma do secador e de perda no processo (vide texto para explanação); ¹² – Calculado conforme Equação 1.

Em uma ACV, os sistemas de produto são avaliados sob uma base funcional. A unidade funcional adotada para o estudo foi uma área de cobertura da telha de 1000 m². A seguir é descrita a forma como as massas de correntes de entrada e de saída foram ajustadas para a unidade funcional adotada. Como o processo gerava um subproduto, foi necessário realizar a operação de alocação para corrigir a fração de contribuição dos aspectos ambientais apenas para a telha ecológica (produto em análise neste estudo). O procedimento de alocação escolhido foi o de massa e o fator de alocação (FA) foi calculado como sendo:

$$FA = \frac{M_{telha,i}}{M_{telha,i} + M_{resíduo,i}} \quad (2)$$

onde, $M_{telha,i}$ é a massa da telha e $M_{resíduo,i}$ é a massa do resíduo (resto de telha impregnada com asfalto) numa etapa i do processo. Tomando-se ambos os valores na etapa de acabamento (máquina de corte transversal, etapa 15 da Tabela 1), onde o subproduto foi gerado, o valor de FA foi calculado como sendo 0,9974, para a etapa de acabamento e para as etapas anteriores a ela.

Considerando-se a área de cada telha de 1 m², o ajuste das massas para a unidade funcional (1000 m²) foi realizado pela normalização dos valores de massa de 105 telhas para 1000 telhas e aplicando-se o fator de alocação (FA) por meio do fator de conversão (FC) dado por:

$$FC = \frac{M_{telhas,uf}}{M_{telhas,vb}} \cdot FA \quad (3)$$

onde, $M_{telhas,uf}$ e $M_{telhas,vb}$ são, respectivamente, as massas de telha da unidade funcional e do valor bruto, que neste caso equivalem, respectivamente, às massas de 1000 e 105 telhas no final do processo. O valor de FC calculado foi de 9,50 para a etapa de acabamento e para as etapas anteriores a ela. Para a etapa de pintura (etapa 16 da Tabela 3), foi considerado FA=1

e o valor de FC calculado foi de 9,52. Assim, as massas dos aspectos ambientais foram multiplicadas pelo fator FC para o ajuste para a unidade funcional adotada. Os valores consolidados de massas corrigidos e convertidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados do processo de produção ajustados à unidade funcional (área de cobertura da telha de 1000 m²)

	Valor	Unidade	% em massa [#]
<i>Correntes de Entrada</i>			
Material Principal			
Matéria-prima	3800	kg/1000 m ²	6,5
Material reciclado	2399	kg/1000 m ²	4,1
Água de recirculação	37997	kg/1000 m ²	65,2
Água de reposição (poço artesiano)	2850	kg/1000 m ²	4,9
Tinta	572	kg/1000 m ²	1,0
Asfalto	2194	kg/1000 m ²	3,8
Energia			
Elétrica	2552	kWh/1000 m ²	---
Combustível (GLP)	1841	kg/1000 m ²	3,2
Oxigênio do ar *	6628	kg/1000 m ²	11,4
<i>Correntes de Saída</i>			
Produto			
Telha	6072	kg/1000 m ²	10,4
Material de Recirculação			
Água	37997	kg/1000 m ²	65,2
Resíduos que retornam ao processo	2399	kg/1000 m ²	4,1
Resíduos Sólidos	5,89	kg/1000 m ²	0,01
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS			
CO ₂	5561	kg/1000 m ²	9,5
H ₂ O	6240	kg/1000 m ²	10,7

Nota: [#] – As porcentagens referem-se aos valores totais de massa de entrada ou de saída, que foram 58.281 e 58.275 kg, respectivamente. * - Para complementar o balanço de massa da entrada, foi incluído o oxigênio do ar atmosférico consumido na reação de combustão do GLP.

3.2. Distribuição da Telha

A distribuição do produto foi feita por transporte rodoviário e os principais clientes da empresa Fibroflex localizavam-se em Belo Horizonte, Rio de Janeiro, Porto Alegre, São Luís e Belém. Os dados relacionados ao meio de transporte do material, como desempenho do caminhão, capacidade de carga e combustível, foram obtidos da transportadora. Os dados relacionados à distância percorrida pelo material foram obtidos do mapa rodoviário, pois a distribuição era FOB, isto é, o material foi retirado pelo cliente na empresa. Os dados de emissões atmosféricas do diesel foram obtidos do relatório de qualidade do ar da CETESB [12]. A Tabela 4 apresenta o resultado da coleta de dados (valores brutos) para a etapa de transporte.

As distâncias a partir de Poços de Caldas para as cidades de Belo Horizonte, São Luiz, Belém, Porto Alegre e Rio de Janeiro foram estimadas como sendo de 457, 2876, 2839, 1319 e 504 km, respectivamente. A distância média aritmética foi calculado como sendo de 1599 km. O fator de

multiplicação da distância (FM), em unidade de comprimento, para o cálculo das emissões atmosféricas foi calculado por:

$$FM = \frac{M_{telhas,uf}}{C_{caminhão}} \cdot d_m \quad (4)$$

onde, $M_{telhas,uf}$ é a massa de telhas da unidade funcional, $C_{caminhão}$ é a capacidade de carga de transporte do caminhão e d_m é a distância média percorrida. Supondo a capacidade do caminhão de 15 toneladas (dado fornecido pela transportadora), $M_{telhas,uf}$ de 6070 kg (1000 telhas) e d_m de 1599 km, o valor de FM calculado foi de 647,1 km. As emissões atmosféricas médias, adequadas para a unidade funcional adotada (área de cobertura de telhas de 1000 m²), foram calculadas multiplicando-se os valores brutos (Tabela 4) por FM. No caso do combustível (diesel), dividiu-se o valor de FM pelo valor bruto, considerando a densidade de 0,8 g/cm³. Estes resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 4. Resultados da coleta de dados (valores brutos) da distribuição (transporte rodoviário)

	Valor	Unidade	Fonte de dado
<i>Entrada</i>			
Combustível			
Diesel	3	km/L	Inform. transport.
<i>Saída</i>			
Emissões Atmosféricas			
CO	17,8	g/km	CETESB
HC	2,9	g/km	CETESB
NO _x	13,0	g/km	CETESB
SO _x	0,43	g/km	CETESB
Material Particulado	0,81	g/km	CETESB

Tabela 5. Resultados dos dados de distribuição ajustados à unidade funcional (área de cobertura da telha de 1000 m²)

	Valor	Unidade
<i>Entrada</i>		
Combustível		
Diesel	259	kg
<i>Saída</i>		
Emissões Atmosféricas		
CO	17,3	kg
HC	2,8	kg
NO _x	12,6	kg
SO _x	0,42	kg
Material Particulado	0,79	kg

3.3. Uso da Telha

Não se encontrou informação relativa ao desempenho e durabilidade das telhas ecológicas. Entretanto, sendo a telha ecológica constituída basicamente de papel, asfalto e tinta e a sua aplicação voltada principalmente para a área de construção civil, não é de se esperar que ela emita produto impactante para o meio ambiente durante o seu uso. Assim, considerou-se que não há aspectos ambientais a serem analisados para este produto na etapa de uso do ciclo de vida.

A confirmação desta suposição, entretanto, necessita de mais investigações, como a realização de estudos de envelhecimento e de lixiviação para se aferir o efeito das intempéries na estabilidade das telhas.

3.4. Disposição Final do Produto

Devido ao produto ser novo no mercado, aparentemente não há dados quanto à sua disposição final. Segundo Togni [13], as telhas podem ser adicionadas em asfalto para pavimentação, mas não se encontrou estudo ou caso confirmando esta possibilidade. Outra possibilidade, a mais provável de ocorrer, é o depósito das telhas em aterros.

Neste caso, recomenda-se a realização de testes, baseados nas normas técnicas (ABNT NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação [17]; ABNT NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos [18]; ABNT

NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos [19]) para a classificação do resíduo e para estabelecer o impacto ambiental da disposição final das telhas.

3.5. Resultado do Inventário

A Tabela 6 apresenta o resultado do inventário de ciclo de vida (ICV). Esta tabela lista as quantidades de emissões para o meio ambiente e as quantidades de energia e matéria-prima consumidas nas unidades de processos envolvidas no ciclo de vida das telhas ecológicas

4. Avaliação de Impacto

Para avaliar o impacto ambiental das telhas foram consideradas as etapas de processo de produção e distribuição. Esta etapa da metodologia de ACV compreendeu quatro fases: definição das categorias de impacto, classificação, caracterização e valoração.

4.1. Categorias de Impacto e Classificação

As categorias de impacto foram definidas a partir dos aspectos ambientais levantados na etapa anterior (inventário de ciclo de vida). Os aspectos ambientais que foram levados em consideração nesta etapa são as emissões atmosféricas e os resíduos sólidos (Tabela 6). Para as emissões atmosféricas

foram considerados os seguintes componentes: CO, CO₂, HC, NO_x, SO_x e material particulado (proveniente do diesel). Para os resíduos sólidos foram considerados os resíduos provenientes do processo de produção: areia, metal, plástico e material particulado (resíduo proveniente da lixadeira).

Abaixo são apresentados alguns aspectos relacionados à influência ambiental e à saúde de parte destes componentes [14], que auxiliaram na definição das categorias de impacto:

- *Material particulado*: proveniente da combustão do óleo diesel, causa uma variedade de impactos ambientais e à saúde (problemas relacionados ao sistema respiratório, como asma, bronquites crônicas e mortes prematuras). Na contribuição para o meio ambiente, as partículas podem ser levadas para longe pelo vento ou pela água e os efeitos incluem depleção dos nutrientes sob o solo e afeta a biodiversidade dos ecossistemas; a fuligem, um tipo de material particulado, danifica os objetos históricos, como monumentos e estátuas. Contudo, a principal preocupação está relacionada com os efeitos causados à saúde humana. Com isso pode-se classificá-lo na categoria de impacto de toxicidade humana;
- *Óxidos de nitrogênio (NO_x)*: fontes primárias são os veículos automotores. Os óxidos de nitrogênio causam impacto ambiental e à saúde humana. No meio ambiente eles contribuem para formar as chuvas ácidas, nutrientes que deterioram a qualidade das águas e contribuem para o aquecimento global. À saúde humana, devido à formação de ácido nítrico, eles afetam o sistema respiratório;
- *Óxidos de enxofre (SO_x)*: principal é o SO₂, que está relacionado com os problemas respiratórios e no meio ambiente é o principal precursor de deposição ácida, associada à acidificação do solo e à corrosão de construções e monumentos;

- *Monóxido de carbono*: É formado pela combustão incompleta dos combustíveis, afeta os sistemas nervoso central, cardiovascular e o respiratório.

Considerando os aspectos ambientais identificados, as categorias selecionadas foram: aquecimento global, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica, redução de espaço físico e toxicidade humana. Após esta definição, os aspectos ambientais foram agrupados dentro das categorias de impacto (Tabela 7).

4.2. Caracterização e Valorização

Nestas etapas os impactos considerados no estudo foram quantificados em termos de problemas ambientais. O modelo de caracterização usado para avaliar os impactos foi a avaliação de equivalência. Para a conversão dos dados do inventário em unidades comuns de impacto, foram utilizados os fatores de caracterização (equivalência) obtidos de Guinée et al. [15] e UNEP [16] para as emissões atmosféricas. Os fatores de caracterização utilizados estão apresentados na Tabela 8 e os valores calculados da contribuição individual e total dos dados do inventário para cada categoria de impacto estão apresentados na Tabela 9.

Os valores totais de emissão equivalente dos aspectos ambientais da Tabela 9 foram normalizados pela base de referência de emissão global anual de cada categoria de impacto em avaliação. Para tanto, foram utilizados os valores médios de emissão equivalente global de 1995 obtidos de Guinée et al. [15]. Estes valores e os resultados normalizados calculados estão apresentados na Tabela 10. Os valores normalizados mostram a contribuição relativa dos aspectos ambientais em cada categoria de impacto no ciclo de vida das telhas ecológicas.

Tabela 6. Resultado da etapa de inventário de ciclo de vida (ICV) da telha ecológica (para área de cobertura de 1000 m²)

	Processo de Produção	Distribuição
Entrada		
Matéria-prima - Resíduos de papel (kg)	3800	---
Consumo de Energia (kg)		
Elétrica	9,2	---
GLP	91,6	---
Diesel	---	7,1
Consumo de Água (kg)	4275	---
Saída		
Emissões Atmosféricas (kg)		
CO	---	11,5
CO ₂	5561	---
HC	---	1,9
H ₂ O	6240	---
NO _x	---	8,4
SO _x	---	0,28
Material Particulado	---	0,52
Resíduos Sólidos (kg)	5,89	---
Produto - Telha (kg)	6072	---

Tabela 7. Classificação dos aspectos ambientais nas categorias de impacto

Categorias de Impacto	Aspectos Ambientais
Aquecimento global	CO e CO ₂
Acidificação	NO _x e SO _x
Eutrofização	NO _x
Oxidação fotoquímica	H _x C _x , CO, NO _x e SO ₂
Redução de espaço físico	Metal, areia, material particulado e plástico
Toxicidade humana	CO, NO _x , SO _x e material particulado

Tabela 8. Fatores de caracterização utilizados para o potencial de aquecimento global (PAG), potencial de oxidação fotoquímica (POF), toxicidade humana (TH), acidificação (AC) e eutrofização (Eut.)

M	PAG [kg (eq.) CO ₂ /kg M]	POF [kg (eq.) etileno/kg M]	TH [kg (eq.) 1,4- diclorobenzen o/kg M]	AC [kg (eq.) SO ₂ /kg M]	Eut. [kg (eq.) NO _x /kg M]
CO ₂	1	---	---	---	---
CO	1	0,027	---	---	---
H _x C _x	---	0,377*	---	---	---
NO _x	5	---	1,2	0,5	0,13
SO _x	---	0,048	0,096	1,2	---
MP	---	---	0,82	---	---

Notas: Fonte: Guinée et al. (2002), exceto * - UNEP (1996). MP – material particulado.

Tabela 9. Contribuição individual e total dos aspectos ambientais nas categorias de impacto em unidades equivalentes por unidade funcional (área da telha de 1000 m²)

	Massa [kg]	PAG [kg eq. CO ₂]	POF [kg eq. etileno]	TH [kg eq. 1,4-diclo- robenzeno]	AC [kg eq. SO ₂]	Eut. [kg eq. NO _x]
CO ₂	5561	5561	---	---	---	---
CO	11,5	11,5	0,31	---	---	---
H _x C _x	1,9	---	0,72	---	---	---
NO _x	8,4	42	---	10,1	4,20	1,09
SO _x	0,28	---	0,01	0,03	0,34	---
MP	0,52	---	---	0,43	---	---
TOTAL		5614,5	1,04	10,53	4,54	1,09

Notas: Massa - resultado de ICV (Tabela 6); PAG - potencial de aquecimento global; POF - potencial de oxidação fotoquímica; TH - toxicidade humana; AC - acidificação; Eut. - eutrofização; MP - material particulado.

Tabela 10. Valores médios de emissão anual e valores normalizados da contribuição total dos aspectos ambientais nas categorias de impacto

Categoria	Valor de emissão anual global (1995)*	Valor normalizado [ano/1000 m ²]
PAG	4,0 x 10 ¹³ kg CO ₂ /ano	1,40 x 10 ⁻¹⁰
POF	9,6 x 10 ¹⁰ kg etileno/ano	1,08 x 10 ⁻¹¹
TH	5,7 x 10 ¹³ kg 1,4-diclorobenzeno/ano	1,85 x 10 ⁻¹³
AC	3,2 x 10 ¹¹ kg SO ₂ /ano	1,42 x 10 ⁻¹¹
Eut.	1,3 x 10 ¹¹ kg NO _x /ano	0,84 x 10 ⁻¹¹

Notas: * - Valores médios calculados dos dados de Guinée et al. (2002). PAG - potencial de aquecimento global; POF - potencial de oxidação fotoquímica; TH - toxicidade humana; AC - acidificação; Eut. - eutrofização.

5. Interpretação

A avaliação do desempenho ambiental do produto foi realizada analisando-se os resultados do sistema em relação aos seus aspectos ambientais, obtidos na etapa de análise inventário, i.e., as emissões atmosféricas e os resíduos sólidos.

Os aspectos ambientais relacionados às emissões atmosféricas foram agrupados dentro das categorias de impacto levando-se em consideração os efeitos causados ao meio ambiente e à saúde humana. Na Figura 4 é mostrada a contribuição de cada categoria de impacto para o sistema de produto da telha ecológica.

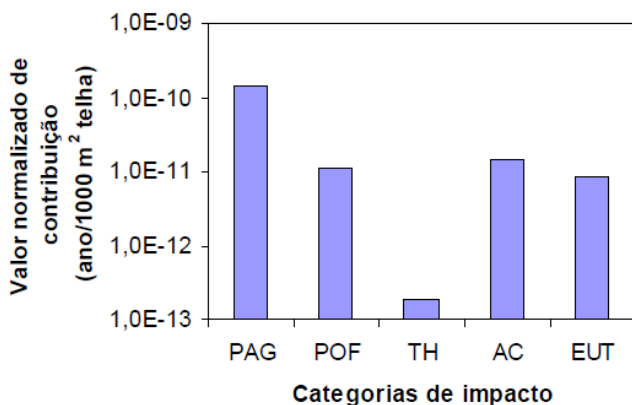


Figura 4. Representação gráfica da contribuição das categorias de impacto ambiental para o sistema de produto das telhas ecológicas

Como se pode observar a categoria de impacto que apresentou o maior valor relativo foi o potencial de aquecimento global (PAG). Em um nível de impacto intermediário ficaram as categorias do potencial de oxidação fotoquímica (POF), acidificação (AC) e eutrofização (EUT), em menor nível, a toxicidade humana (TH). Nestas categorias, a etapa do processo produtivo contribuiu apenas no potencial de aquecimento global, enquanto as demais tiveram contribuição apenas da etapa de distribuição (transporte rodoviário). No potencial de aquecimento global, houve contribuição de ambas as etapas (Tabela 6), entretanto, a influência da distribuição foi pequena (~0,4%). Assim, o processo (queima de GLP) foi o responsável pelo maior impacto ambiental das emissões atmosféricas. Na Figura 5 é mostrada a contribuição dos aspectos ambientais para as categorias de impacto selecionadas.

Como foi observado na categoria de impacto de Potencial de Aquecimento Global (PAG), o aspecto ambiental que mais contribuiu foi a emissão de CO₂ relacionada ao processo de fabricação da telha. As etapas do processo que contribuem com esse fator são a secagem do material e a impregnação (banho de asfalto). A secagem contribuiu com 77,5% de emissão de CO₂ e a impregnação com 22,5%. Portanto, a secagem do material foi o ponto crítico do processo que precisa ser melhorado.

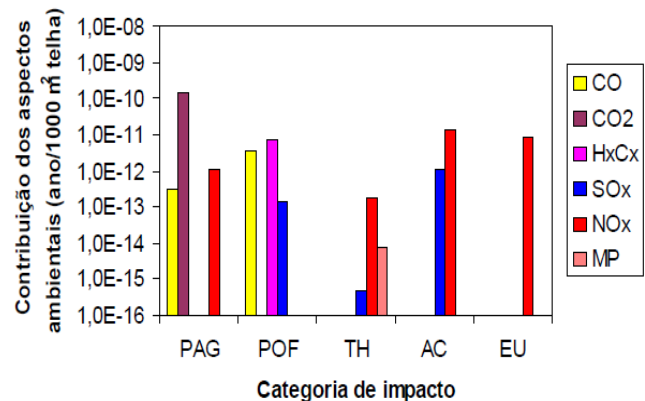


Figura 5. Representação gráfica da contribuição dos aspectos ambientais nas categorias de impacto

Outro ponto a ser considerado no processo é a impregnação do material que foi feita com asfalto de pavimentação. Apesar de sua contribuição ser baixa em relação à emissão de CO₂, é preciso considerar as possíveis emissões de voláteis do asfalto, mas ainda não há uma legislação brasileira sobre níveis de emissão de poluentes de asfalto.

Nas categorias de toxicidade humana (TH), acidificação e eutrofização, o NO_x foi o aspecto ambiental que mais contribuiu e na categoria de potencial de oxidação fotoquímica (POF), os aspectos ambientais que mais contribuíram foram o CO e os hidrocarbonetos (C_xH_x). Todos estes aspectos ambientais foram provenientes da etapa de distribuição das telhas ecológicas, que foi o transporte rodoviário. Em relação à distribuição das telhas, não houve uma logística definida, por isso as distâncias percorridas pelo material foram estimadas, sendo consideradas como se o material saísse de Poços de Caldas e fosse direto para a cidade de destino e que as telhas fossem a única carga a ser transportada. Considerando essas hipóteses pode-se atribuir as cargas ambientais dessa etapa somente para as telhas sem dividir com nenhum outro produto.

Em relação aos resíduos sólidos provenientes do processo de produção (areia, metal, plástico e material particulado), eles foram descartados no aterro sanitário. O material particulado correspondeu a 19% de todo o resíduo que foi descartado, e esse resíduo não teve valor comercial agregado, o que resultou no descarte do material no aterro. Como esse resíduo foi originado na etapa de acabamento (lixadeira), ele já estava impregnado com asfalto, não podendo ser reaproveitado no mesmo processo e nem como combustível em outros processos, como os restos de telhas que também foram gerados nessa mesma etapa do processo. Para evitar que isso aconteça, precisaria se fazer um estudo do material, tanto técnico quanto mercadológico, para que ele possa ser reutilizado ou reciclado. O subproduto, resíduo das telhas impregnadas, foi reaproveitado em outra empresa, a Togni Refratários, como combustível para os fornos. No entanto o plástico e o metal corresponderam a quantidades muito menores do que o material particulado, mas esses resíduos

têm valor comercial agregado. O descarte deles no aterro ocorreu pela pouca quantidade que saiu do processo.

A última etapa do ciclo de vida das telhas ecológicas é o destino final, sendo que a forma de descarte mais provável é o aterro, o que significa o retorno para o “berço”, isto é as telhas ecológicas retornam para o seu ponto inicial. A produção de 1000 m² de telhas ecológicas retira do meio ambiente uma média 3800 kg de resíduo de papel de pós-consumo, material passível de reciclagem e, no entanto, devolve para o meio ambiente 6072 kg de material, que não pode ser reutilizado no mesmo processo. Existe a possibilidade de ser incorporado ao asfalto de pavimentação, mas no momento não foi encontrado nenhum tipo de estudo em relação a essa reutilização das telhas ecológicas.

Para finalizar, os recursos energéticos envolvidos no ciclo de vida das telhas foram a energia elétrica utilizada ao longo do processo e a queima de combustíveis fósseis usados no processo e no transporte. Em relação ao consumo de energia ao longo do ciclo de vida das telhas ecológicas, foram consumidos 107,9 GJ para produção de 1000 m² de telhas ecológicas. Desse total 85% corresponderam ao GLP usado no processo de fabricação do material e os outros 15% foram decorrentes do uso de energia elétrica pelos equipamentos da fábrica e da queima de óleo diesel utilizado no transporte, etapa de distribuição do material.

4. Conclusões e Comentários Finais

Por meio da utilização da metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), foi possível ter uma visão geral de todo o processo produtivo das telhas ecológicas até a sua disposição final, o que possibilitou identificar os pontos de melhorias nas etapas do ciclo de vida das telhas produzidas a partir de resíduo de pós-consumo de papel. As etapas do ciclo de vida consideradas foram: o processo de produção, a distribuição do material e o destino final.

A metodologia de ACV mostrou que, no ciclo de vida da telha ecológica, a categoria de impacto com maior contribuição foi o potencial de aquecimento global (PAG), decorrente principalmente do processo de produção. No processo de fabricação das telhas, a etapa de secagem utilizando secador com queima de GLP foi a mais impactante, devido à quantidade de CO₂ emitida para a atmosfera.

Outro ponto que pode ser melhorado é o destino final do produto, pois ao final do ciclo de vida as telhas provavelmente são descartadas em aterros, mas esse produto ainda não é passível de reciclagem e pode apenas ser reutilizado.

A etapa de distribuição do material contribuiu com a oxidação fotoquímica, a acidificação, a toxicidade humana e a eutrofização, devido à queima de óleo diesel utilizado no transporte rodoviário. É um ponto que pode ser melhorado, mas não é crítico como os outros dois apresentados anteriormente. Quanto aos combustíveis utilizados no transporte, existem atualmente vários desenvolvimentos de combustíveis e veículos alternativos, menos poluentes.

As telhas ecológicas tem um desempenho ambiental satisfatório e ainda cumprem o seu propósito que é de contribuir para a reciclagem do papel, diminuir o resíduo

depositado em aterros e, o mais importante, contribuir com a formação de novas cooperativas de catadores de papel, que resulta na inclusão social destas pessoas.

Referências

- [1] Finnveden, G., Albertsson, A.-C., Berendson, J., Eriksson, E., Höglund, L. O., Karlsson, S., Sundqvist, J.-O. Solid waste treatment within the framework of life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v.3, n.4, p.189-199, 1995.
- [2] Vigon, B. W., Jensen, A. Life cycle assessment: data quality and databases practitioner survey. *Journal of Cleaner Production*, v.3, n.3, p.135-141, 1995.
- [3] Maurice, B., Frischknecht, R., Coelho-Schwartz, V., Hungerbühler, K. Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plants. *Journal of Cleaner Production*, v.8, n.2, p.95-108, 2000.
- [4] Almeida, S. M. G. Estudo da técnica de análise de ciclo de vida e sua aplicação como ferramenta de gestão ambiental nas empresas. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998. 203p.
- [5] Kuta, C. C., Koch, D. G., Hildebrandt, C. C., Janzen D. C. Improvement of products and packing through the use of life cycle analysis. *Resources, conservation and recycling*, v.14, n.3-4, p.185-198, 1995.
- [6] Azapagic, A. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimization. *Chemical Engineering Journal*, v.73, p.1-21, 1999.
- [7] Tillman, A. M., Ekvall, T., Baumann, H., Rydberg, T. Choice of system boundaries in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v.2, n.1, p.21-29, 1994.
- [8] Carvalho, J. Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil – Estudo de caso: Comparação entre cimentos portland com adição de resíduos. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002. 102p.
- [9] Cavalheiro, A. L. Telhas de papel reciclado cobrem galpões rurais. *Gazeta Mercantil*, São Paulo, 26 abril 2000.
- [10] Edwards, J. R. Recycling waste paper. In: Mantell, C. L. *Solid Waste: origin, collection, processing and disposal*. New York: John Wiley & Sons, 1975. p.883-913.
- [11] International Organization for Standardization. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework – ISO 14040*. Genève, 1997.
- [12] CETESB. Relatório de qualidade do ar de 2002. São Paulo, 2002.
- [13] Togni, L. V. (empresa Fibroflex). Informação pessoal.
- [14] EPA – United States Environmental Protection Agency. *Life cycle impact assessment: a conceptual framework, key issues, and summary of existing methods*. EPA A-452/R-95002, 1995.
- [15] Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. De, Oers, L. Van, Wegener Sleswijk, A., Suh, S., Udo De Haes, H. A., Bruijn, H.

- De, Duin, R. Van, Huijbregts, M. A. J. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [16] United National Environment Program Industry and Environment (UNEP). Life cycle assessment: what it is and how to do it. 1996, 92p.
- [17] Associação Brasileira de normas técnicas – ABNT NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. 2004, 71p.
- [18] Associação Brasileira de normas técnicas – ABNT NBR 10.005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. 2004, 16p.
- [19] Associação Brasileira de normas técnicas – ABNT NBR 10.006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2004, 3p.