

VI-128 – A APLICAÇÃO DA FERRAMENTA ANÁLISE DE FLUXO DE SUBSTÂNCIA PARA O SEGMENTO DO COBRE NO BRASIL

Armando Hirohumi Tanimoto⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Escola Politécnica da UFBA. Doutor em Política e Gestão Ambiental pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável da universidade de Brasília (UnB). Professor do Instituto Federal da Bahia (IFBA).

Armando de Azevedo Caldeira Pires

Graduação e mestrado em engenharia química pela UFRJ. Doutorado em engenharia mecânica pela Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. Professor da Universidade de Brasília (UnB).

Endereço⁽¹⁾: Rua Emídio dos Santos s/n, Barbalho, Salvador – BA, CEP: 40.301-015 - Brasil - Tel: (71) 2102-9507 - e-mail: armando@ifba.edu.br

RESUMO

Este artigo caracteriza quantitativamente o ciclo do cobre no Brasil incluindo as suas diversas etapas do processo (mineração, refino, fabricação e manufatura, uso e gerenciamento do resíduo) para o ano de 2005, usando a Análise de Fluxo de Substância (AFS).

Os resultados revelam que o Brasil é um importador de cobre tanto na forma de concentrado como de produtos acabados (total após balanço mássico de 64.000 t). Seu consumo interno é de 1,44 kg/hab.ano, sendo que 0,52 kg/hab.ano fica retido na forma de estoque em uso. Gera uma quantidade de resíduos (1.411 kg/hab.ano) e identifica os fluxos residuais de equipamentos eletro-eletrônicos e veículos em fim de vida como os prioritários para uma melhor gestão na destinação final do cobre.

A contabilização do ciclo do cobre o Brasil pode ser feita através de dados disponíveis pelos órgãos governamentais e associações de classes com relativa precisão, principalmente para as etapas iniciais do ciclo (produção, fabricação e manufatura, importação e exportação). Para as etapas finais que se referem às informações pós-uso, principalmente no destino final dados aos fluxos residuais, carece de maior volume de informações para se formar uma base de dados confiáveis e que possam ser úteis para a tomada de decisões por parte das instituições fomentadoras de políticas governamentais.

Dos destinos finais pesquisados, os aterros industriais são os que apresentam melhor potencial de servirem como fonte futura do cobre, principalmente porque como são controlados, sua composição é relativamente conhecida, estão sob a guarda de empresas privadas e em ambientes já com infra-estrutura empresarial, o que poderia otimizar o seu processo de obtenção do cobre.

O cobre que fica em uso na sociedade, contabilizados na forma estática (2005) em 94.900 t, merece uma análise aprofundada com respeito a dinâmica desse processo. A velocidade de concentração poderá direcionar políticas governamentais de restrição na destinação de equipamentos ou tipos de resíduos que contenha o cobre para aperfeiçoar o seu processo de reciclagem.

PALAVRAS-CHAVE: Cobre, Resíduos, Análise de Fluxo de Massa, AFM.

INTRODUÇÃO

Há décadas que se discute a insustentabilidade do modelo de produção e consumo dos metais, quer seja em função da sua intensidade quer seja na forma de uso. A capacidade de exploração dos recursos naturais tem sido constantemente atualizada, não só pelos avanços tecnológicos que permitem a sua exploração a níveis de concentração antes inviáveis economicamente como pelas descobertas de novas jazidas a serem exploradas, que aliada a criação de novos materiais substitutos, vão adiando o limite temporal para a sua exploração e consumo. Por outro lado, as estatísticas demográficas indicam um crescimento da população mundial, principalmente na China, Índia e em países do hemisfério sul, que aliado ao crescimento econômico baseado nos atuais padrões insustentáveis, antecipariam os limites de exaustão desses recursos naturais.

Nesse contexto, no qual o ciclo de reposição natural dos recursos naturais apresenta-se incapaz de atender à crescente demanda antrópica, é fundamental que se compreenda o funcionamento destes novos ciclos que fazem funcionar o atual metabolismo industrial. Sem minimizar a importância da eliminação do consumo para

efetivamente preservar os recursos naturais, novas ferramentas de gestão dos subprodutos gerados no pós-uso tem sido implementadas, e nesse sentido a análise de fluxo de substância (SFA) tem sido aplicada para identificar novas fontes de reposição, apontando novos desafios e oportunidades para atingir esse objetivo.

O Brasil, 5º país em extensão territorial e rico em recursos naturais, tem sua economia baseada na exploração dos recursos não renováveis (é o primeiro produtor mundial de nióbio, segundo em ferro, manganês, tantalita e alumínio - DNPM, 2006) e renováveis (primeiro exportador mundial de soja, café, suco de laranja, açúcar, álcool, carne de frango e gado e segundo produtor mundial em soja) além de principal produtor de papel e celulose, entre outros), e desponta como um promissor exportador de biomassa para substituir o petróleo como fonte de energia.

Em 2007, as reservas brasileiras de cobre representaram 1,5% da reserva mundial, e a sua produção chegou a 1,3% de todo o cobre produzido no mundo. O setor industrial nacional, incluindo o da produção de refinado, o de condutores elétricos e o de semimanufaturados, apresentou um faturamento de US\$ 5.030 milhões, gerando US\$ 890 milhões em impostos e 18 mil postos de trabalho, com exportações de US\$ 1.650 milhão. Mantendo-se a produção de 218.400 t e considerando a atual reserva conhecida (14,8 milhões de t) pode-se estimar a exaustão desse recurso em aproximadamente 70 anos (DNPM, 2008).

Este trabalho quantifica o fluxo do cobre em suas etapas de produção, consumo e destinação final na sociedade brasileira, para o ano de 2005, acompanhando a metodologia do projeto Global Stock and Flow – STAF (Lifset et al., 2002; Bertram et al., 2002; Spataro et al., 2002; Kapur et al., 2003; Vexler et al., 2004; van Beers et al., 2003).

Mais do que a aplicação desses indicadores para um país com dimensões continentais como é o Brasil, este artigo pretende identificar e adotar estatísticas locais de produção (bases de dados governamentais, associações de classes), adaptando a metodologia (*bottom-up* ou *top-down*) para a quantificação da cadeia produtiva do cobre à situação regional.

MÉTODOS

Métodos de quantificação (Kapur e Graedel, 2006) dos fluxos podem utilizar técnicas dinâmicas (*top-down*) ou estáticas (*bottom-up*). Na primeira (*top-down*), a informação de entrada de um material em uma determinada área física é contabilizada. Essa quantidade é posteriormente dividida entre as principais fontes consumidoras. Na segunda (*bottom-up*), as principais fontes (automóveis, geladeiras, ar condicionados etc) em uma determinada área física que contém o material em estudo são identificados e contados. O produto dessas fontes com a concentração do metal contido em cada uma delas é o inventário, ou estoque, no espaço de tempo considerado. Nem sempre o tempo e o esforço necessário assim como a disponibilidade das informações serão suficientes para isso, e faz-se necessário a aplicação mista dessas duas técnicas. A diferença entre as entradas contabilizadas e o total descartados, num mesmo período de tempo é o estoque em uso.

A contabilização dos fluxos foi feita de forma a se adotar dados reais brasileiros para o ano de 2005, uma vez que ao se usar coeficientes de geração da literatura podemos incorrer em erros grosseiros devido a diferentes condições sociais e econômicas dos países onde foram gerados. Porém, a concentração do cobre nessas correntes não são conhecidas no Brasil e pela não existência de parâmetros locais, outros foram utilizados e devidamente referenciados.

As diversas etapas e correntes possíveis de serem contabilizadas são apresentadas num padrão de descrição dos estágios de ciclo de vida do cobre (Graedel et al., 2004; Spataro et al., 2002). Nesse estudo o ciclo de vida do cobre foi dividido em blocos associados às fases de Produção, de fabricação e manufatura, de uso e estoque, e de gestão de resíduos (fig. 1).

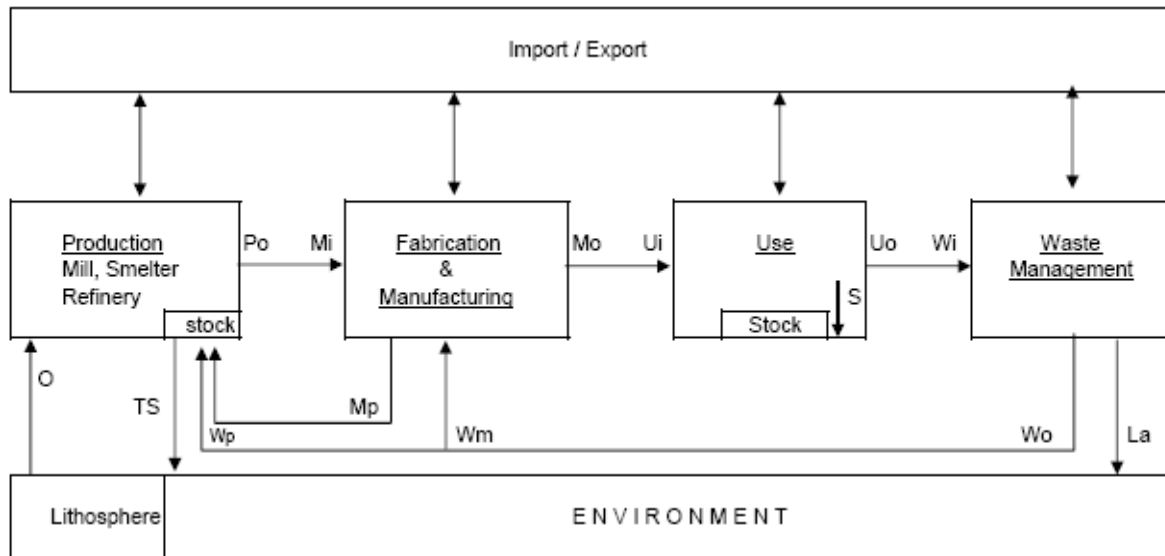


Figura 1 - Fluxo geral do cobre. Fonte: Graedel et al., 2004 e Spatari et al., 2002.

Legenda: O = Copper in Ore, P = Processing life stage, M = Manufacturing life stage, U = In-use life stage, W = Waste management life stage, La = Landfill, S = Flow to in-use stock, Wm = Scrap waste to manufacturer, Mp = New scrape to processing, Wp = Scrap waste to processor, TS = Copper discarded in tailings and slag, i = in, o = out.

1.1. Produção

A principal referência de informação foi o Sumário Mineral Brasileiro (DNPM, 2006), com ano base de 2005. Relatórios internos de produção das empresas envolvidas (Vale, Mineração Caraíba e Caraíba Metais¹) também foram utilizados, assim como referência da literatura para a concentração do cobre em correntes residuais (Ayres et al., 2002). O balanço de massa para cada etapa da produção pode ser descrito pela equação 01, abaixo:

$$F_{cu} = \sum_i^n F_{prod, i, t} + \sum_i^n F_{import, i, t} - \sum_i^n F_{export, i, t} + \sum_i^n S_{i, t-1} - \sum_i^n S_{i, t} \quad (1)$$

Onde F_{cu} é o fluxo de cobre contido nas diversas correntes (minério de cobre, catodo, vergalhão, resíduo) das etapas de processo (mineração e refino); $\sum F_{prod, i, t}$ é a produção de cobre pela empresa i no ano t ; $\sum F_{import, i, t}$ é a importação de cobre nas suas diversas formas (minério concentrado, catodo ou sucata) pela empresa i , no ano t ; $\sum F_{export, i, t}$ é a exportação de cobre nas suas diversas formas (minério concentrado, catodo ou sucata) pela empresa i , no ano t ; $\sum S_{i, t-1}$ e $\sum S_{i, t}$ são as somatórias do estoque nas suas diversas formas dentro da empresa no ano anterior e no ano de referência, respectivamente. Essa é a equação mais abrangente e que pode ser feita para cada empresa estabelecendo-se seus limites de contorno.

Em virtude da não divulgação do estoque de produtos e matéria prima nos relatórios acessados, não foram considerados nas avaliações dos balanços de massa.

A tabela 1 registra os fluxos de cobre considerados nas etapas de mineração (Vale e Mineração Caraíba) e refino (Caraíba Metais e outros²):

¹ Nome atual da Caraíba Metais é Paranapanema

² Outros referem-se às empresas Companhia Níquel do Tocantins e Mineração Santa Blandina, que produzem cobre como subprodutos de seus processos metalúrgicos. Juntas produziram 2.650 t, o que representa 1,3% do total. em 2005.

Tabela 1 – Fluxos do cobre na mineração e refino, considerações e fontes de dados

Etapa	Fluxo	Considerações	Fontes
Mineração	Minério bruto	Estimado pela diferença do balanço de massa.	
	Concentrado de cobre	Valor exportado bruto obtido do Sumário Mineral Brasileiro.	(1)
		Valor vendido no mercado interno obtido do relatório interno da Caraíba Metais.	(2)
		Concentração do cobre de 30%	(1)
Tailings	Estimado pela diferença do balanço de massa dos fluxos de saída. Conteúdo de cobre da literatura (0,09%)	(3)	
Refino	Concentrado de cobre da Caraíba	Valor importado.	(1)
		Valor comprado do mercado interno.	(2)
	Sucata de cobre processado	Valor estimado em 15% da produção,	(2)
	Cobre vergalhão / eletrolítico	Valor exportado bruto. Vendas internas obtido por balanço de massa	(1)
	Copper slag	Valor vendido ao mercado interno obtido do relatório interno da Caraíba Metais.	(2)
	Resíduo do cobre (slag)	Estimada produção bruta de 100 mil t e concentração em 0,1% de cobre contido.	(2)
	Conc. de Cobre de outros	Valor obtido do Sumário Mineral Brasileiro.	(1)

(1) DNPM, Sumário Mineral Brasileiro, 2006. Disponível em www.dnpm.gov.br

(2) Relatório interno da Caraíba Metais, obtido por comunicação pessoal.

(3) Ayres et al., 2002

1.2. Fabricação e manufatura

Os fluxos foram caracterizados segundo a associação brasileira do cobre³, em semimanufaturados, composto pela produção de laminados, tubos e conexões, barras e arames; e os manufaturados, fios e cabos com aplicação em energia, esmaltados, telecomunicações, e outros.

O consumo doméstico de produtos que utilizam o cobre foi obtida pelo balanço de massa, considerando a produção nacional, importação, exportações e reciclagem das sucatas primária (reinserida no processo produtivo através da Caraíba Metais) e secundária (consumida pelos fabricantes de produtos finais); e teve como fonte o DNPM - Sumário Mineral Brasileiro de 2006 e SINDICEL - Anuário Estatístico de 2005.

1.3. Uso e estoque

O cobre sai da etapa anterior (fabricação e manufatura), na forma de produto final (cabos de eletricidade, tubulações de água) ou adicionado a um produto montado (carros, motores, equipamentos eletrônicos), que vão ser usados em diversos setores econômicos como o da construção civil, industrial, automobilístico e de infra-estrutura (sistema de distribuição de energia, telecomunicações). Devido a dificuldade de se obter informações relativa ao uso do cobre nesses setores econômicos, calculou-se os fluxos de saída desta etapa. Spatari et al. (2002), classificou em 7 as categorias de resíduos gerados após o seu uso:

- Resíduos domésticos municipais – MSW;

³ Anuário Estatístico 2005 – condutores elétricos & semimanufaturados de cobre e suas ligas, publicação conjunta da Associação Brasileira do Cobre – ABC, e o Sindicato da Indústria de Condutores Elétricos, Trefilação, Laminação de Metais não ferrosos do Estado de São Paulo - SINDICEL

- Resíduos da construção e demolição - C&D;
- Resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos – WEEE;
- Resíduos de lodo da estação de tratamento de efluentes – SS;
- Resíduos de veículos sucateados – ELV;
- Resíduos industriais perigosos – IHW;
- Resíduos industriais não perigosos – NH&IW.

O estoque de cobre que fica na sociedade em um certo período de tempo é estimado como sendo a diferença entre as somatórias de cobre presente nos produtos consumidos e a sua saída nos fluxos de resíduos nesse período de tempo.

Os resíduos foram quantificados tomando como base o período de um ano (2005), seguindo a equação 2 geral:

$$F_{Cu,i} = TG_{percapita,i} \times P \times C_{Cu,i} \quad (2)$$

Onde $F_{Cu,i}$ é o fluxo do cobre contido no resíduo i ; TG é a taxa de geração percapita do resíduo i ; P é a população no período estudado e $C_{Cu,i}$ é a concentração de cobre no resíduo i .

Para a estimativa do fluxo de resíduo sólido municipal - MSW, utilizou-se os dados do Banco Multidimensional de Estatística (BME) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000b), considerando não só o lixo doméstico e comercial coletado, mas também o lixo de vias públicas dos 5.475 municípios brasileiros que fizeram parte da pesquisa. A população considerada foi baseada nos censos de 2000 (IBGE, 2000c) e 2005 (IBGE, 2005a) realizada pelo IBGE. Para a concentração do cobre nos diversos fluxos de resíduos gerados foram adotados os valores utilizados por Bertram et al. (2002).

A quantidade gerada do resíduo da construção e demolição baseou-se em informações de John e Agopyan (2001) e corrigido a população de 1996 segundo IBGE (2000c), uma vez que os dados registrados no Banco Multidimensional de Estatística do IBGE eram muito baixos e iam de encontro aos dados divulgados na literatura brasileira (Pinto, 1999). A concentração de cobre foi a mesma presente no resíduo similar gerado na Europa.

Os resíduos proveniente de equipamentos eletroeletrônicos - WEEE foram divididos em duas categorias: Bens de consumo e bens de capital, que usam 70 e 30% do cobre destinado a esse segmento (Bertram et al., 2002). Os bens de consumo foram estimados a partir da síntese de indicadores sociais (IBGE, 2007), que indicam a percentagem de domicílios brasileiros que possuem telefone, computador, geladeira, freezer, TV, máquina de lavar, celulares e ar-condicionado. Aplicando-se um coeficiente de peso médio (Kumar e Shrihari, 2007) dos equipamentos estimou-se sua quantidade em massa. A geração anual foi obtida considerando a distribuição linear ao longo do seu tempo de vida útil (Craes, 2003, apud Jianxin et al., 2008). A concentração do cobre foi a média ponderada da concentração dos bens de consumo e de capital (Bertram et al., 2002).

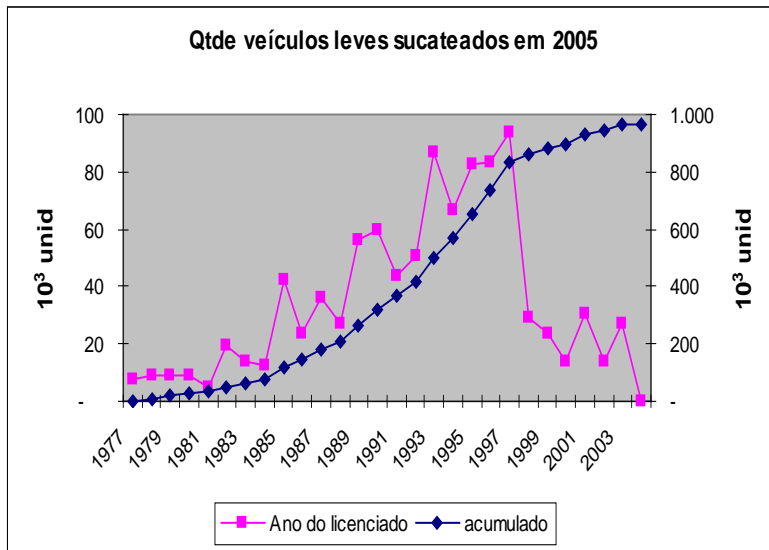


Figura 2 – Percentual de carros segundo o ano de licenciamento, que são sucateados no ano em estudo.

Elaborado a partir de Uria, 1996, apud Meyer (2001)

A concentração média ponderada de cobre dos veículos sucateados obedeceu a seguinte relação (equação 3):

$$CM_{Cu, ELV} = \frac{(Q_{L, ELV} \times m_L \times C_{Cu, L} + Q_{P, ELV} \times m_P \times C_{Cu, P})}{(Q_{L, ELV} \times m_L + Q_{P, ELV} \times m_P)} \quad (3)$$

Onde $CM_{Cu, ELV}$ é a concentração média ponderada do cobre na massa de veículos sucateados, $Q_{L, ELV}$ é a quantidade de veículos leves sucateados, m_L é a massa de um veículo leve, $C_{Cu, L}$ é a concentração de cobre no veículo leve, $Q_{P, ELV}$ é a quantidade de veículos pesados sucateados, m_P é a massa de um veículo pesado, $C_{Cu, P}$ é a concentração de cobre no veículo pesado.

O fluxo de lodo sólido - SS, proveniente de estações de tratamento de efluentes domésticos, é também uma fonte de cobre. Machado (2001), utilizou dados de 275 estações de tratamento de efluentes domésticos, que atendem a 13 milhões de habitantes nas médias e grandes cidades e estimou a geração per capita de lodo em 11,87 kg de sólidos (base seca) por ano. Nesse mesmo trabalho, estimou-se a concentração do cobre em 255 mg/kg de material sólido, usando as amostras dessas estações.

A quantidade gerada de resíduos industriais perigosos foi baseada nos inventários estaduais elaborados pelos seguintes estados: Acre, Amapá, Ceará, Goiás, Minas Gerais, Pernambuco, Rio Grande do Sul, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo, que juntos representam 78% do PIB nacional. Foi considerado que a geração de resíduos perigosos e não perigosos industriais é proporcional ao PIB dos estados geradores. Com isso estimou-se a geração dos outros estados e obteve-se a quantidade de resíduos perigosos e não perigosos industriais total (equação 4).

$$Q_{Cu, IHW} = (Q_{T, IHW} \times C_{Cu, IHW}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{j=10} Q_{i, IHW}}{\sum_{i=1}^{j=10} PIB} / \sum_{i=1}^{j=27} PIB} \right) \times C_{Cu, IHW} \quad (4)$$

Onde $Q_{Cu, IHW}$ é a quantidade de cobre contido nos resíduos perigosos industriais; $Q_{T, IHW}$ é a quantidade total de resíduos perigosos industriais gerados no período considerado; $C_{Cu, IHW}$ é a concentração de cobre no fluxo; $\sum Q_{i, IHW}$ é a quantidade de resíduos gerados pelos 10 estados que realizaram seus inventários; $\sum PIB$ é o somatório do PIB de 10 e dos 27 estados do Brasil.

Para a estimativa dos veículos sucateados – ELV foi usado uma curva de sucateamento (Uria, apud Meyer, 2001) de veículos leves (fig. 2) segundo o ano de licenciamento.

Para os veículos pesados considerou-se o tempo de vida útil de 15 anos (FENABRAVE, 2008) e que toda a frota com essa idade sai de circulação ao mesmo tempo. A quantidade de veículos posta em circulação por ano foi baseada nos dados de licenciamento da Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotivos (ANFAVEA, 2008).

Tabela 2 - Fluxos do cobre no gerenciamento de resíduos, considerações e fontes de dados

Etapa	Fluxo	Considerações	Fontes
Gerenciamento de resíduos	MSW	Calculado a quantidade percapita gerada em 2000 e considerada a população de 2005. Foi considerada a concentração do cobre de 500 mg/kg para estimar a quantidade de cobre contido.	(4) (5) (6)
	C&D	Idem acima. Concentração adotada foi de 670 mg/kg	(4) (5) (6)
	WEEE	Concentração do cobre utilizado em bens de consumo e de capital; Quantificação dos bens de consumo no Brasil que contém cobre; Peso médio dos equipamentos Tempo de vida útil dos equipamentos	(6)
			(7)
			(8)
	ELV	Utilizada curva de sucateamento para veículos leves; tempo de vida útil para os veículos pesados e dados de licenciamento de veículos nacionais e importados. Massa do veículo leve, pesado, e seus conteúdos de cobre foi de 1.000 kg, 12.000 kg, 1,4 % e 0,5%.	(9)
			(10)
SS	Geração percapita de lodo e concentração de cobre	(11) (12) (6)	
HIW e NH&IW	Utilizado o inventário de resíduos perigosos industriais de 10 estados Produto Interno Bruto dos demais estados para estimar o total de resíduos gerados. Concentração do cobre na corrente dos resíduos	(13) (14) (15) (6)	

(4) Banco Multidimensional de Estatística (IBGE, 2000b);

(5) Censos de 2000 e 2005 (IBGE, 2000c; IBGE, 2005);

(6) Bertram, et al. (2002);

(7) Síntese de Indicadores Sociais (IBGE, 2007);

(8) Kumar, P.; Shrihari S. (2007);

(9) Jianxin et al. (2008);

(10) Meyer, (2001);

(11) Anuário da distribuição de veículos automotivos no Brasil (FENABRAVE, 2008);

(12) Anuário da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2008);

(13) Machado (2001);

(14) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2007);

(15) Produto interno bruto dos municípios 2005 (IBGE, 2005).

1.4. Gerenciamento de Resíduos

Bertram et al. (2002) sugere analisar 3 pontos onde se pode fazer a gestão do cobre como componente residual de um fluxo maior: coleta e separação, incineração e aterro. A contabilização dos fluxos para esses pontos foi feita utilizando coeficientes de reaproveitamento do cobre para cada fluxo residual estudado.

Para o ponto de coleta e separação, foi considerado que 1% do resíduo sólido municipal coletado passa por uma triagem para reaproveitamento dos materiais recicláveis (IBGE, 2000a e 2000b). Esse mesmo percentual foi considerado para determinar a quantidade de cobre oriundo do resíduo da construção e demolição.

Dos resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos foram considerados a recuperação de 20% do cobre contido nesses equipamentos (Vexler et al., 2003). Nos veículos sucateados foi considerado o mesmo índice de sua reciclagem – 80% e do resíduo de lodo das estações de tratamento de efluentes 15% são reaproveitados como fertilizante na agricultura (Machado, 2001).

Dos resíduos perigosos industriais (21%) e os não perigosos e industriais (1%) também são reaproveitados parcialmente (Tanimoto, 2007)⁴.

A geração da sucata secundária, que é gerada após o uso de produtos pelos consumidores, é estimada com baixa precisão pelo relatório Sumário Mineral editado pelo Departamento Nacional de Pesquisas Minerais (DNPM, 2006). A esse montante foi adicionado mais 80% (Vexler et al., 2004) como sendo resultado da economia informal que predomina nesse setor, dos quais 25% tiveram origem dos resíduos da construção e demolição, e o restante 55% dos equipamentos eletro-eletrônicos.

Para o ponto de incineração, foi considerado o cobre oriundo dos resíduos sólidos municipais (IBGE, 2000a e 2000b), e 79% dos resíduos perigosos industriais (Tanimoto, 2007).

Os aterros foram divididos por tipo de resíduo a que se destinam: Os aterros domésticos, que tem gestão municipal e recebem principalmente resíduos de origem doméstica; e os aterros particulares industriais, que podem estar ou não dentro das empresas geradoras e recebem resíduos desse segmento produtivo.

Foram considerados para os aterros domésticos os seguintes fluxos: 73% dos resíduos sólidos municipais (IBGE, 2000a e 2000b), cujo coeficiente de destinação foi aplicado também para os resíduos da construção e demolição. Vexler et al. (2004) estimam em 10% o percentual de resíduo eletroeletrônico na América Latina que são destinados aos aterros, Machado (2001) contabilizou em 50% o lodo gerado pelas estações de tratamento e Tanimoto (2007) 3% dos resíduos não perigosos e industriais que são destinados a esse mesmo ponto.

Além desses fluxos residuais, foi considerado que 90% do cobre contido nos resíduos incinerados são destinados aos aterros domésticos.

Os aterros industriais foram considerados tanto aqueles controlados pelas próprias empresas geradoras do resíduo como os comerciais, que recebem os 96% dos resíduos não perigosos e industriais (os resíduos da mineração – tailing (DNPM, 2006; Relatórios empresariais), refino – slag (DNPM, 2006; Relatórios empresariais) e outros (Tanimoto, 2007).

E finalmente, foram contabilizados como perdas para a biosfera, a diferença do que foi estimado nos fluxos de resíduos e suas destinações. Incluso os resíduos de eletroeletrônicos estimados em 70% (Vexler et al., 2004) que ficam hibernados nos domicílios e no mercado de segunda mão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Análise do Fluxo do Cobre no Brasil, na sua etapa de mineração e refino, utilizou não só dados de produção das empresas envolvidas como dados de literatura (concentração do cobre nas correntes residuais – tailings e slag). Na mineração, o Brasil, produz concentrados através de duas empresas, a Mineração Caraíba e a Vale. A primeira produz somente para o mercado interno, e previsto o esgotamento de suas minas em 2012, atualmente busca rotas alternativas que permitam a continuidade do seu empreendimento. A segunda, começou a produzir em 2004 e deve em poucos anos mudar o cenário nacional de importador para exportador de cobre contido. Sua produção de concentrado de cobre (141.000 t) está voltada principalmente para o mercado externo (84%), pois a sua planta de refino está prevista entrar em operação somente em 2011. Para atender a atual demanda o Brasil (DNPM, 2006) importou concentrados (132.780 t) principalmente do Chile (86%).

No refino do cobre, há somente uma empresa produzindo cobre eletrolítico – Caraíba Metais, responsável por 98,7% do catodo e vergalhão produzido no Brasil. Outras duas empresas produzem cobre como um subproduto de processos metalúrgicos, em pequena quantidade (1,3%).

⁴ Para os resíduos perigosos industriais, e os não perigosos e industriais, foram consideradas as estatísticas de destinação de um grupo de 11 empresas do pólo petroquímico de Camaçari, como sendo uma situação idealista para a representatividade brasileira, uma vez que não há estatística a nível nacional.

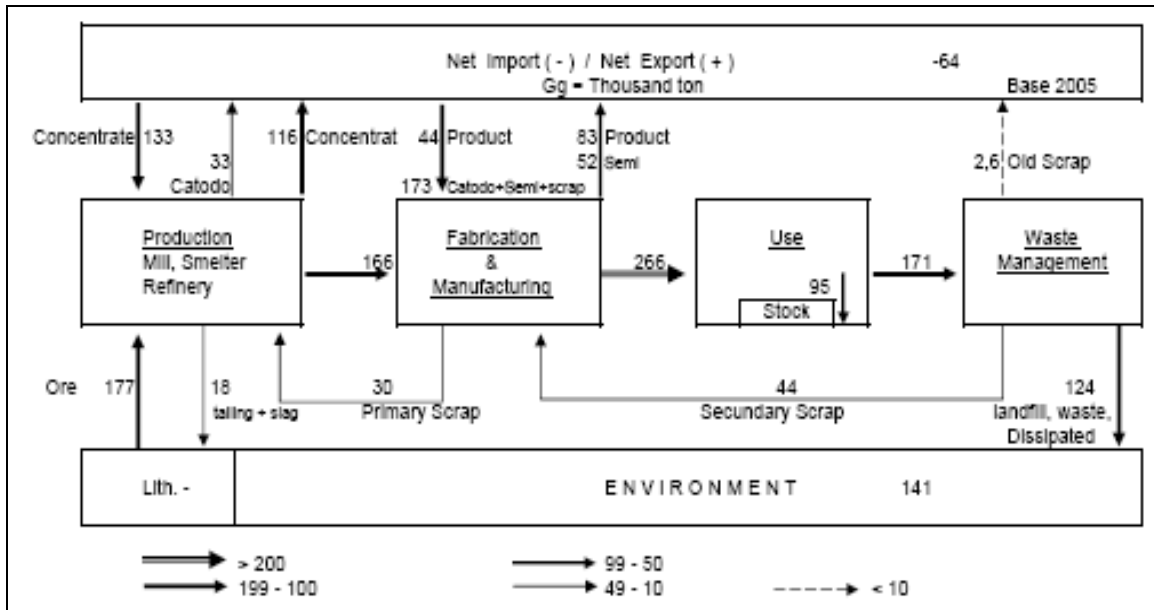


Figura 3 – Fluxo resumido do cobre no Brasil.

Na etapa de fabricação e manufatura, a importação de semi-manufaturados (171.900 t, dos quais 93% é catodo de cobre) e em menor quantidade produtos manufaturados (43.700 t) complementam a demanda por este metal. Ainda assim, há a exportação de 134.700 t de produtos manufaturados e semi-manufaturados. Para o consumo interno de produtos de cobre e suas ligas metálicas foram estimados 265.500 t, o equivalente a 1,44 kg/hab.ano.

Na etapa de uso, devido a falta de dados estatísticos confiáveis não foi possível calcular em quais segmentos da sociedade são mais empregados os produtos de cobre (edificações, maquinários, veículos e infra-estruturas), porém com a estimativa dos fluxos residuais pós uso, foi possível se obter a quantidade de cobre em uso por mais de um ano, 94.900 t, o equivalente a 36% do que foi consumido internamente em 2005.

A geração total de resíduos no Brasil (tabela 3) foi estimada em 1.411 kg/hab.ano, isso representa em ordem de grandeza, 4 kg/hab.dia. O de maior geração foi o resíduo não perigoso e industrial, representando 43%, que somando-se aos resíduos sólidos municipais (26%) e os da construção & demolição (27%), totalizam 96%. São números baseados em dados estatísticos brasileiros.

Para a estimativa da geração dos resíduos não perigosos e industriais (611 kg/hab.ano) usou-se os relatórios estaduais de resíduos industriais, que apesar de serem considerados somente dos 10 estados que o terminaram, estes representam 78% do produto interno bruto nacional.

Tabela 3 - Geração de resíduos e conteúdo de cobre no Brasil

Categoria do resíduo Nomenclatura	Geração		Conc Cu (mg/kg)	Cobre contido		
	Kg/hab.ano	%		t/ano	kg/hab.ano	%
Res. Sólido Municipal (MSW)	365	25,9	500	33.617	0,183	19,7
Res. Construção e Demolição (C&D)	384	27,2	670	47.431	0,257	27,8
Res. Equip. Eletro-eletrônico (WEEE)	3	0,2	7,6 %	47.257	0,257	27,7
Veículos Sucateados (ELV)	9	0,6	1,1 %	16.745	0,091	9,8
Lodo Estação Tratamento (SS)	12	0,8	255	558	0,003	0,3
Res. Perigoso Industriais (I&HW)	27	1,9	500	2.506	0,014	1,5
Res. Nao- Perigoso Industriais (I&NHW)	611	43,3	200	22.491	0,122	13,2
Total	1.411	100		170.606	0,926	100

No entanto, quando contabilizados a quantidade de cobre contido (tabela 3) chega-se a 170.606 t/ano e há uma maior homogeneidade na distribuição entre os fluxos. Numa mesma ordem de grandeza (47.000 t), os resíduos da construção e os de equipamentos eletro-eletrônicos. Em seguida o resíduo sólido municipal (33.617 t), o resíduo industrial não perigoso (22.491 t) e os veículos sucateados (16.745 t).

O WEEE (0,2%) e ELV (0,6%) em termo mássico não representa nem 1% do total de resíduo gerado, mas contém juntos quase 38% do cobre liberado na antroposfera (27,7 e 9,8% respectivamente). Isso se deve ao fato das altas concentrações (7,6 e 1,1%) de cobre presentes nesses fluxos.

O alto acúmulo do cobre no C&D deve-se ao fato de que no desconhecimento da concentração do cobre nesse tipo de resíduo no Brasil, adotou-se a mesma concentração (670 mg/kg – Bertram et al., 2002) que foi utilizada nos resíduos da Europa, sabendo-se que muito provavelmente o resíduo brasileiro pelo tipo de construção adotada deve ter uma concentração menor.

Os aterros municipais destacam-se por receber grande parte dos fluxos residuais da construção e demolição, o maior contribuinte com 34.700 t, seguido de resíduo sólido municipal com 24.600 t e os resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos 4.700 t.

Os aterros industriais, apesar de receberem menos cobre contido (39.300 t contando com os resíduos da mineração e refino), merecem destaque pois estão em menor número que os municipais, portanto potenciais fontes de recursos para a produção futura do cobre.

O Brasil, diferente dos países do sudeste asiáticos em desenvolvimento, não tem o perfil de consumidor de sucata de cobre, tendo sido importado 1.566 t e exportado 2.636 t. Apesar do balanço mássico positivo (1.070 t), os preços praticados dependem da qualidade da sucata negociada, que em 2005 teve a balança comercial desfavorável em 1,85 milhões de US\$.

O sistema de reciclagem no Brasil é por demais incipiente em suas estatísticas, uma vez que a economia informal predomina nesse segmento. O registro da reciclagem do cobre, principalmente a sucata secundária que é obtida após o uso dos equipamentos que contém o cobre, é praticamente inexistente. Além disso há o fato de que equipamentos, principalmente fios e cabos de eletricidade obtidos de forma ilegal, sejam fonte dessa sucata que retorna ao processo fabril. Por conta disso, os números da reciclagem do cobre são bastante inferiores ao real. DNPM (2006) registrou 26.000 t, isso representa 14% do potencial de cobre disponível após o seu uso, incluindo o industrial (tailings e slag). Vexler et al. (2004) estima que o mercado informal da reciclagem do cobre secundário na América Latina é 80% do formal. Adotando-se esse percentual, teríamos então o total de 46.800 t de cobre reciclado em 2005, o que representa 25% de reciclagem do cobre disponível.

Esforços tem sido feito em países desenvolvidos para se fomentar a reciclagem do cobre pós uso, uma vez que é crescente a forma insustentável da sua produção, e o cobre em uso na sociedade se tornará uma alternativa de alimentação do processo fabril. Para isso, será preciso mapear como, de que forma e onde está sendo depositado o cobre pós-uso.

A separação final do cobre para o seu reaproveitamento poderia ser facilitada se os equipamentos aos quais são agregados fossem projetados pensando no seu fim de vida. Conceitos como o Life Cycle Thinking e o Ecodesign tornam-se importantes coadjuvantes nesse processo de otimização do uso dos metais.

Num mundo globalizado onde o cobre é uma commodity, cujo preço é estabelecido pelo mercado (Bolsa de Metais de Londres - LME), a internalização dos custos ambientais deste segmento produtivo será fator decisivo na otimização da sua taxa de reciclagem e políticas governamentais deveriam fomentar a eficiência no reuso e na reciclagem do cobre, através da educação e conscientização da insustentabilidade do atual modelo de produção e consumo; restringir o descarte de resíduos com alto conteúdo de cobre; propor instrumentos econômicos que permitissem a sobrevivência da cadeia da reciclagem; definir a responsabilidade do produtor quanto ao destino que é dado aos seus produtos pós-uso e finalmente fomentar o desenvolvimento de tecnologia para tornar economicamente viável a recuperação do cobre contido nos resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos.

Os números encontrados para o Brasil, indicam que 39% do cobre residual (66.900 t) são destinados aos aterros domésticos. Procedimentos de identificar formas de concentração e separação dos resíduos que contém o cobre antes de chegarem aos aterros terão que ser implantados para tornar exequível a sua reciclagem.

A perda anual de cobre para a biosfera (incluindo-se os aterros) em 2005 foi de 141.500 t e quando contabilizado de forma per capita atingiu 0,75 kg.

Quando comparamos a procedência e o destino do cobre consumidos no Brasil (fig 7), observa-se que o Brasil é um importador de cobre (66% das suas necessidades), dividindo-se em 25% na forma de concentrado e 41% na forma de produtos. Apesar disso, exporta cerca de 55% do que produz, onde 22% na forma de concentrado e 33% na forma de produtos finais. Uma análise simplista sugeriria ao Brasil direcionar sua produção de concentrado para o consumo interno e com isso economizaria em divisa pois deixaria de importar praticamente todo o cobre concentrado, oriundo principalmente do Chile. No entanto, aspectos comerciais dificultam essa opção pois a maior produtora de cobre concentrado (Vale) será dentro de poucos anos produtora também de cobre refinado, competindo no mercado nacional com a Caraíba Metais.

Identifica-se também que 53% (141.500 t) do cobre consumido (265.500 t) tem seu destino final a biosfera. Só os aterros recebem 106.200 t sendo que o industrial abriga 37% dessa massa e poderia se transformar em potencial fonte de cobre no futuro devido ao menor número e a existência de um estrutura operacional mais adequada para a sua exploração (logística, recursos tecnológicos, utilidades e potencial de investimentos privado).

Por falta de registro, 21% do cobre na etapa de gerenciamento do resíduo, foi considerado como fuga para a biosfera. Isso representa 35.100 t, o que para padrões ambientais torna-se preocupante pois não se tem nenhum controle de como isso pode estar sendo absorvido ou contaminando a natureza.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduo Sólido, torna-se um importante instrumento legislativo específico para a redução do cobre nas correntes residuais identificadas nesse trabalho, caso venha a ser priorizado sua reciclagem ou limitado seu destino em aterros sanitários.

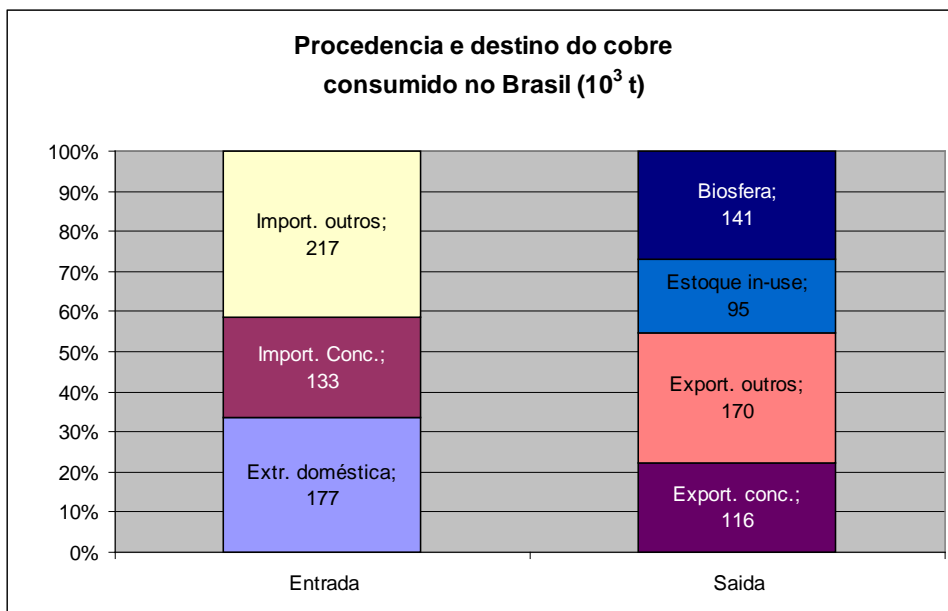


Figura 4 – Procedência e destino do cobre consumido no Brasil, base 2005.

CONCLUSÕES

O Brasil, como característica de país em desenvolvimento, possui um ainda baixo consumo per capita de cobre, 1,44 kg/hab.ano. Isso também pode ser visto como um país com potencial de crescimento no seu consumo, a medida que as áreas de infraestrutura, telecomunicações, edificações sejam mais implementadas.

A produção do cobre, desde a mineração até o refino, está concentrada em tres empresas atualmente. Apesar de uma delas, Mineração Caraíba, estar diversificando seu processo com a produção de outros metais e diminuindo a produção de cobre, a Vale está com altos investimentos em minas para produzir não só concentrados como também o refinado a partir de 2011. O Brasil passará de importador a exportador de cobre contido nos

próximos anos e esse aumento da produção nacional demandará cada vez mais uma estratégia empresarial e governamental que leve em consideração as variáveis ambientais junto às demais, econômicas e sociais. Isso demandará um estudo dos impactos ambientais na cadeia de produção do cobre e a análise do fluxo desse metal será uma importante ferramenta para esse objetivo.

A contabilização do ciclo do cobre no Brasil já pode ser feita através de dados disponíveis pelos órgãos governamentais e associações de classes com relativa precisão, principalmente para as etapas iniciais do ciclo (produção, fabricação e manufatura, importação e exportação). Para as etapas finais que se referem às informações pós-uso, principalmente no destino final dados aos fluxos residuais, carece de maior volume de informações para se formar uma base de dados confiáveis e que possam ser úteis para tomada de decisões por parte das instituições fomentadoras de políticas governamentais.

No Brasil, seguindo a tendência mundial, os fluxos de resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos e de veículos sucateados serão as grandes oportunidades de fontes do cobre. Apesar de representarem menos de 1 % em massa, contêm juntos quase 38% do cobre liberados para a antroposfera. São fluxos residuais com alto valor agregado e que hoje já justifica a sua reciclagem pelos outros metais que contém. Partes significativas desses fluxos já fazem parte de uma economia informal, fomentando um mercado de segunda mão de equipamentos de especificação menos exigente e de peças de reposição.

As informações de reciclagem para esses dois fluxos são praticamente inexistentes, o que dificulta a melhoria no seu processo de reaproveitamento.

Com exceção do resíduo perigoso industrial, os outros fluxos apesar da quantidade mássica gerada ser significativa, possuem o cobre muito diluído (resíduos da construção & demolição – 47 mil t e resíduos sólidos municipais – 34 mil t), tornando o seu processo de separação economicamente inviável. Para o resíduo perigoso industrial, normalmente o cobre não é o elemento que dá a caracterização de perigoso e a sua separação não agregará valor ao resíduo, mantendo o processo inexequível do ponto de vista econômico.

A taxa de reciclagem do cobre secundário foi estimada em 25%, bem abaixo dos valores estimados para a Europa (48% - Bertram et al., 2002), América do Norte (60% - Lifset et al., 2002) e continente africano (34% - van Beers et al., 2003). O baixo preço do cobre tem sido apontado como um dos motivos da baixa taxa de reciclagem do cobre secundário.

Dos destinos finais pesquisados, os aterros industriais são os que apresenta melhor potencial de servirem como fonte futura do cobre, principalmente porque como são controlados, sua composição é conhecida, estão sob a guarda de empresas privadas e em ambientes já com infra-estrutura empresarial o que poderia otimizar o seu processo para obtenção do cobre.

O cobre que fica em uso na sociedade, contabilizados de forma estática (2005) em 94.900 t nesse trabalho, merece uma análise aprofundada com respeito a dinâmica desse processo. A velocidade de concentração poderá direcionar políticas governamentais de restrição nas destinação de equipamentos ou tipos de resíduos que contenha o cobre para otimizar o seu processo de reciclagem.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada graças ao apoio da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES através do Programa de Doutorado com Estágio no Exterior – PDEE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE, 2007. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. Disponível em http://www.abrelpe.org.br/pdf/6_RSI.pdf, acesso em Outubro 15, 2008.
2. ANFAVEA, 2008. Anuário 2008. Disponível em <http://www.anfavea.com.br/anuario2008/capitulo2b.pdf>, acesso em Outubro 22, 2008.
3. AYRES, R.U. et al., 2002. The life cycle of copper, its co-products and by-products. IIED – International Institute for Environment and Development.

4. BERTRAM, M. et al., 2002. The contemporary European copper cycle: waste management subsystem. *Ecologic Economics*, 42: 43-57.
5. BRASIL, MDIC-SECEX Balança comercial brasileira – dados consolidados janeiro dezembro – 2007 Disponível em http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1221571901.pdf, acesso em Outubro 20, 2008.
6. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral, 2006.
7. DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Sumário Mineral, 2008.
8. FENABRAVE, 2008. Anuário da distribuição de veículos automotivos no Brasil. Disponível em www.fenabrave.org.br, acesso em Outubro 20, 2008.
9. GRAEDEL, T. E. et al., 2004. Multilevel Cycle of Anthropogenic Copper, *Environ. Sci. Technol.*, 38: 1242-1252.
10. GOU, X., SONG Y., 2008. Substance flow analysis of copper in China. *Resources. Conservation and Recycling*, 52: 874-882.
11. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Programa Nacional de Saneamento Básico, 2000a.
12. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco Multidimensional de Estatística, 2000b.
13. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo de 2000c. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/indicadores_sociais/tabela_01.pdf, acesso em Novembro 28, 2008.
14. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo de 2005a. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/contagem_final/tabela1_1.pdf, acesso em Novembro 28, 2008.
15. IBGE, Produto interno bruto dos municípios 2005b. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2005/tab01.pdf>, acesso em Novembro 28, 2008.
16. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Síntese de Indicadores Sociais: Uma análise das condições de vida da população brasileira, 2007. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/indicadoresminimos/sinteseindicossociais2007/indic_sociais2007.pdf, acesso em Novembro 28, 2008.
17. JIANXIN, Y., et al., 2008. WEEE flow and mitigating measure in China. *Waste management* 28: 1589 – 1597.
18. JOHN, V. M., Agopyan, V., 2001. Reciclagem de resíduos da construção. Seminário de Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>, acesso em Setembro 01, 2008.
19. KAPUR, A., Graedel, T. E., 2006. Copper mines above and below the ground. *Environ. Sci. & tecnol.*, 40: 3135-3141.
20. KAPUR, A., et al., 2003. The contemporary copper cycle of Asia. *J Mater Cycles Waste Manag.* 5:143-156.
21. LIFSET, R. J., et al., 2002. Where has the copper gone: The stocks and flow project, part 1. *Minerals, Metals & Material Society*, 54: 21-26.
22. MACHADO, M. F. S., 2001. A situação brasileira dos biossólidos. Disponível em <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000289996>, acesso em Setembro 01, 2008.
23. MEYER, C. R., 2001. Implicações energético-ambientais de esquemas de sucateamento de automóveis no Brasil. Disponível em <http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/crmeyer.pdf>, acesso em Setembro 01, 2008.
24. PINTO, T. P., 1999. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Disponível em http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/tese_tarcisio.pdf, acesso em Setembro 01, 2008.
25. SINDICEL, Anuário Estatístico 2005 – Condutores elétricos & semimanufaturados de cobre e suas ligas. São Paulo, 2005.
26. SPATARI, S., et al., 2002. The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows. *Ecological Economics*, 42: 27-42.
27. TANIMOTO, A. H., 2007. Projeto de Ecologia Industrial para o Pólo de Camaçari – Ba: Identificação de oportunidades estratégicas usando a simbiose industrial para minimizar os impactos ambientais dos resíduos sólidos no pólo de Camaçari. Relatório Corporativo. Camaçari - Bahia.
28. VAN BEERS, D.; et al., 2003. The contemporary African copper cycle: One year stocks and flows. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, April: 147 – 162.
29. VEXLER, D., et al., 2004. The contemporary Latin American and Caribbean copper cycle: 1 year stock and flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 41: 23-46.