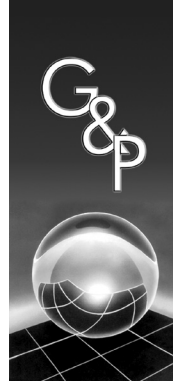


Substituição das soldas estanho-chumbo na manufatura: Efeitos na saúde do trabalhador e no desempenho ambiental

Substitution of tin-lead solders in manufacturing: Impacts on workers' health and on the environment



Cecilia Maria Villas Bôas de Almeida¹
Marco Antonio Madureira¹
Biagio Fernando Giannetti¹
Silvia Helena Bonilla¹

Resumo: As soldas à base de estanho-chumbo (63Sn/37Pb) são largamente utilizadas no Brasil e no mundo. Este estudo aplica a avaliação em emergia em um fabricante de soldas brandas à base de estanho e chumbo e outros metais. O cálculo da emergia por unidade de três tipos de solda mostra que mais recursos são utilizados para produzir uma tonelada de soldas livres de chumbo do que para produzir soldas à base de estanho e chumbo. O indicador DALY (*Disability Adjusted Life Years*) foi utilizado para comparar as emissões na atmosfera dos três tipos de produção de soldas e os resultados apontam para a adoção das soldas à base de chumbo, quando se considera todo o ciclo de vida do produto. A diferença entre os resultados obtidos por avaliações locais e globais é discutida.

Palavras-chave: Emergia. Reciclagem. Estanho-chumbo. Soldas livres de chumbo. DALY.

Abstract: *Tin-lead solders (Sn63-Pb37) have been widely used in Brazil and worldwide. This study evaluates the emergy in a company that manufactures soft solders based on tin, lead, and other metals. The calculation of emergy per unit of three types of solder showed that more resources are used to produce one ton of lead-free solders than those used to produce tin-lead solders. The DALY (Disability Adjusted Life Years) indicator was used to assess the emissions to air of three types of solder. The results favor the use of tin-lead solders when the whole product life-cycle is evaluated. The difference between the results obtained by local and global assessments is discussed.*

Keywords: *Emergy. Recycling. Tin-lead solders. Lead-free solders. DALY.*

1 Introdução

As soldas à base de chumbo, assim como suas substitutas, são utilizadas para fixação de componentes eletrônicos na manufatura de circuitos eletroeletrônicos. A liga de estanho e chumbo (63Sn-37Pb) é uma das mais utilizadas para os processos de montagem de placas e circuitos eletrônicos, pois o chumbo possui um ótimo grau de molhagem e excelentes características no que se refere ao acabamento do produto final (GARCIA et al., 2009). Entretanto, desde o início da década passada, as soldas contendo chumbo vêm sofrendo crescente pressão das leis regulamentares, e uma alternativa para eliminar os riscos potenciais do chumbo é a substituição deste metal por outros componentes de liga menos nocivos à saúde humana (ITSUBO et al., 2003).

A substituição das soldas à base de chumbo vem ocorrendo desde 2004 principalmente na Europa e no

Japão (TURBINI et al., 2000). Embora a comunidade Europeia e alguns países asiáticos estejam utilizando as soldas livres de chumbo em grande escala, no Brasil as soldas estanho-chumbo são ainda largamente utilizadas. Isto ocorre não só devido a seu custo, como também pelo seu grau de “molhagem” e pelas suas propriedades físico-químicas, que agregam maior confiabilidade aos equipamentos eletroeletrônicos (PERASSI, 1994). A produção das soldas livres de chumbo ainda é pequena e ocorre, principalmente, devido à pressão das empresas estrangeiras. As ligas que têm o maior potencial para utilização pelas indústrias brasileiras são da família Sn-Ag-Cu.

A maioria dos estudos encontrados na literatura, que tratam da substituição das soldas estanho-chumbo, refere-se a aspectos ligados às propriedades físicas das junções efetuadas por esses tipos de

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Paulista – UNIP, Rua Dr. Bacelar, 1212, Mirandópolis, CEP 04026-002, São Paulo, SP, Brasil, e-mail: cmvbag@unip.br

solda e aos problemas decorrentes nos produtos com elas manufaturados (ROMM; ABBOTT, 1998; DEUBZER et al., 2001; REUTER; VERHOEF, 2004; MA; CHEN, 2005). No que concerne à toxicidade do chumbo, a substituição destas soldas vem sendo estudada por diversos pesquisadores. Itsubo et al. (2003) avaliam o dano na saúde humana para discutir a efetividade da substituição do chumbo. Este autor considera a necessidade de estabelecer um fator de dano para melhorar a qualidade de avaliação e calcula as quantidades de chumbo emitidas desde a mineração até a produção de lingote em 0,6 g de chumbo emitido para cada quilograma de solda produzida. Segundo Ku (2003), as soldas alternativas sem chumbo são mais seguras em termos de toxicidade e impactos ambientais. A autora classifica os metais quanto à toxicidade e compara os resultados com a disponibilidade e oferta e a sua posição quanto aos impactos ambientais na extração. A autora oferece um *ranking* final, com base no qual recomenda a substituição das ligas contendo chumbo. Okamoto et al. (2005) avaliam a substituição do chumbo por antimônio, bismuto, prata, cobre, índio e zinco e recomendam a utilização das soldas livres de chumbo como a melhor solução no presente.

De outro lado, Turbini et al. (2000) relatam que é importante refletir sobre o impacto ambiental de produtos eletrônicos livres de chumbo em todo o seu ciclo de vida. Isto inclui fatores como: ligas disponíveis, considerações sobre o processamento, a utilização da energia, além da contaminação das águas subterrâneas. Muitos pesquisadores argumentam sobre o aumento significativo do consumo de energia elétrica para os processos de soldagem com as ligas livres de chumbo, mas concluem que a eliminação do chumbo e o custo efetivo dessa eliminação proporcionarão benefícios operacionais e de mercado para os fabricantes eletrônicos (CIOCCI; PECHT, 2006; TURBINI, 2007). Fujimo e Suga (2003), empregando a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) simplificada, relatam que a toxicidade do chumbo e o valor de consumo de energia são os maiores impactos causados pelas soldas para o meio ambiente. Zhou e Schoenung (2007) relatam que a solda sem chumbo tem impacto ambiental global comparável ao da solda de estanho-chumbo convencional, quando todo o ciclo de vida é levado em conta. A substituição das soldas à base de estanho e chumbo causa a diminuição da toxicidade, mas também um aumento de consumo de energia dos fornos de processamento. As afirmações de Zhou e Schoenung (2008) são complementadas pelas pesquisas realizadas por Reuter e Verhoef (2004). Segundo estes autores, os resultados e argumentos mudarão quando os desenvolvimentos tecnológicos (nos fornos de recuperação e na manufatura das placas eletrônicas) levarem à utilização efetiva das soldas livres de chumbo.

Há, ainda, algumas avaliações mais abrangentes que avaliam o ciclo de vida e impactos ambientais de soldas com e sem chumbo (SEGERBERG; HEDEMALM, 1996; SOCOLOF; GEIBIG, 2005; ANDRAE et al., 2008). Socolof e Geibig (2005) apresentam os resultados da ACV (Avaliação de Ciclo de Vida) para a análise individual de cada solda e mostram que a solda de estanho-chumbo tem o maior indicador de impacto em quatro categorias (câncer ocupacional, doenças ocupacionais crônicas não cancerosas, saúde pública e doenças crônicas não cancerosas no público). Já as soldas livres de chumbo têm o maior indicador de impacto nas doze categorias restantes, relativamente a: recursos não renováveis e renováveis, utilização de energia elétrica e GLP (gás liquefeito de petróleo), uso espacial de aterros, aquecimento global, camada de ozônio, nevoeiro fotoquímico, acidificação, particulados no ar, qualidade da água e contaminação pública.

Observa-se na revisão da literatura que há ainda controvérsias quanto à substituição das ligas de estanho-chumbo. Enquanto alguns pesquisadores destacam a toxicidade do chumbo e os danos causados à saúde humana na fabricação das soldas e na manufatura dos equipamentos eletroeletrônicos (ITSUBO et al., 2003; KU et al., 2003, OKAMOTO et al., 2005), outros destacam as desvantagens relativas à substituição, como o aumento do consumo de energia elétrica e do uso de recursos não renováveis (SEGERBERG; HEDEMALM, 1996; SOCOLOF; GEIBIG, 2005; ANDRAE et al., 2008; ZHOU; SCHOENUNG, 2008).

Neste estudo, a síntese em emergência é aplicada para avaliar um fabricante de soldas brandas à base de estanho-chumbo e outros metais. A avaliação em emergência realizada na Cast Metais e Soldas Ltda. tem como objetivo dar suporte para o gerenciamento da empresa no que se refere à escolha das melhores práticas de produção, à produtividade e à competitividade, assim como à gestão dos recursos naturais não renováveis utilizados. O indicador DALY (*Disability Adjusted Life Years*) foi empregado para complementar a avaliação em emergência e estimar o dano à saúde humana devido às emissões ao ar causadas pela produção dos três tipos de solda. A avaliação que agrega estes dois indicadores permite determinar o efeito da produção de soldas (63Sn-37Pb, 99Sn-0,3Ag-0,7Cu e 96,5Sn-3Ag-0,5Cu) no desempenho ambiental da empresa e o dano causado à saúde do trabalhador devido às emissões de poluentes na cadeia produtiva.

2 Métodos

2.1 A empresa em estudo

A empresa brasileira Cast Metais e Soldas Ltda. opera desde 1999 e fabrica uma linha completa de soldas em ânodos, barras, arames, vergas, fios sólidos

com e sem resina, em várias formas, tamanhos e diâmetros.

A produção de solda atual está dividida em mais ou menos 90% em soldas estanho-chumbo e 10% para livres de chumbo, que são produzidas de acordo com a demanda do mercado brasileiro.

A empresa é certificada pelo ISO9001:2008 desde setembro de 2006 e está em processo de implantação da ISO14001:2004.

2.2 A síntese em emergia

Emergia pode ser definida como a memória da energia ou a energia total incorporada em um produto, processo ou serviço. É a quantidade de energia necessária, de forma direta ou indireta, para obter um produto (bem ou serviço) em um determinado processo, sendo sua unidade expressa em seJ (joule de energia solar). O uso de uma única unidade para a qual são convertidos os diversos tipos de energia permite somar todas as contribuições de energia utilizadas para a obtenção de um determinado produto ou serviço. Define-se a transformidade como a quantidade de energia solar empregada, direta e/ou indiretamente, na obtenção de um joule de um determinado produto (bem ou serviço), sendo sua unidade expressa em seJ/J (joule de energia solar por Joule). A transformidade fornece uma medida da concentração de emergia e pode ser considerada como um indicador de qualidade. Os valores de emergia e transformidade dependem do material e da energia utilizados nas diversas etapas necessárias para a obtenção do produto ou serviço e, por este motivo, variam de acordo com a matéria-prima selecionada, com o tipo de energia empregado na produção e com a eficiência do sistema produtivo.

A avaliação em emergia permite a conversão de todas as contribuições recebidas pelo sistema de produção (metais, energia, óleo, dinheiro e informações) em uma única métrica: a energia solar joule (sej). Os sistemas em estudo podem ser comparados relativamente à sua eficiência em utilização de recursos utilizados, produtividade, impacto ambiental e sustentabilidade global (GIANNETTI; ALMEIDA; BONILLA, 2010; GIANNETTI; BARRELLA; BONILLA, 2007; GIANNETTI et al., 2009; BARRELLA; ALMEIDA; GIANNETTI, 2005; ALMEIDA et al., 2010a, b; BONILLA et al., 2010).

O procedimento de avaliação do sistema em estudo foi executado por meio de coleta de dados em documentos formais de aquisição, nos anos 2006 e 2007, e utilizados para os seguintes passos:

- Definição dos limites para a investigação;
- Estudo do contexto em que o sistema está inserido e execução do balanço de massa;
- Construção de diagramas de fluxos de energia;
- Construção da tabela em emergia com dados coletados; e

- Discussão para ações futuras de gerenciamento ambiental do processo de produção.

A pesquisa de campo foi efetuada tomando-se como estudo de caso a empresa Cast Metais e Soldas Ltda. Para cada liga, as quantidades de eletricidade consumida, o gás liquefeito de petróleo (GLP), papel e papelão, óleos lubrificantes, trabalho humano, carretéis, trapos de algodão foram calculadas pelo consumo médio dos anos 2006 e 2007. As quantidades dos ácidos utilizados para análise dos elementos de liga no laboratório químico foram calculadas com base nas notas fiscais referentes às compras nos mesmos anos. O consumo da água foi calculado pela consulta das contas de consumo, assim como as quantidades mensais de metais, materiais, insumos utilizados na implantação do sistema. A emergia associada a cada entrada de material no sistema é calculada de acordo com a Equação 1.

$$Em = Q \times Em/un. \quad (1)$$

Em que Q é a quantidade de material ou energia utilizada no processo de fabricação das soldas e Em/un., a emergia por unidade de cada quantidade.

2.3 O indicador de DALY

A fim de calcular os efeitos na vida do trabalhador da emissão de gases de chumbo na produção das soldas estudadas, foi utilizado o indicador DALY (*Disability Adjusted Life Years*). Este indicador foi originalmente desenvolvido para a Organização Mundial de Saúde (OMS) e calcula os efeitos de emissões na saúde humana, que levam à enfermidade ou morte (MIRAGLIA; SALDIVA, 2005). Considera-se que, em geral, os contaminantes contribuem para o indicador DALY com as duas porções, já que os efeitos de exposição a certos contaminantes não só causam mortalidade como um período com incapacidade antes da ocorrência da morte. A probabilidade de redução de vida devido à exposição a um contaminante em particular, inclui a probabilidade de morte causada por dano à saúde (AVP, anos de vida perdidos) e o estado mórbido, isto é, os efeitos na saúde que não levam para a morte imediata, mas causam dor, sofrimento ou uma diminuição na qualidade de vida (AVI, anos vividos com incapacidade).

Baseado nas concentrações dos contaminantes emitidos, é possível determinar a quantidade de uma substância a que pessoas são expostas e calcular quantos anos de vida são perdidos por inaptidão ou por morte prematura. A análise do dano à qualidade de vida ou morte prematura é expressa como uma unidade de dano, neste caso, o indicador DALY. As emissões por quilograma de solda produzida em todo o ciclo de vida das soldas foram retiradas de Socolof e Geibig (2005) e os valores do indicador DALY

para cada tipo de emissão de Itsubo et al. (2003) e de Zhang et al. (2009).

A Equação 2 apresenta o cálculo da emergência correspondente ao dano para a saúde humana ou ao número de anos perdidos (Em_{DANO}) devido à emissão de um contaminante (UKIDWE; BAKSHI, 2004).

$$Em_{DANO} = mj \times DALY \times Em_{BRASIL} \quad (2)$$

Em que mj é a massa de substância emitida (kg/ano); o indicador DALY apresenta os anos de vida perdidos dependendo da substância emitida (anos perdidos *per capita* por kg); Em_{BRASIL} é a emergência do Brasil, dividida por número de habitantes, $1,47 \times 10^{16}$ sej/habitante (COELHO; ORTEGA; COMAR, 2002).

Para melhor compreenderem-se os resultados, os valores obtidos na avaliação em emergência e os do indicador DALY foram convertidos em moeda corrente empregando-se o valor estatístico do impacto na vida humana (MIRAGLIA; SALDIVA, 2005). Este valor, no Brasil, é de US\$ 7.700,00 por ano (MIRAGLIA; SALDIVA, 2005) e foi estimado pelo levantamento com gastos com a saúde humana e os custos de hospitalizações.

3 Resultados e discussão

3.1 Primeira avaliação de aspectos e impactos

A Cast Metais e Soldas Ltda. obteve a certificação pela Norma ISO9001: 2000, em setembro de 2006, passando, a partir dessa data, a adaptar seus processos para a obtenção da certificação ISO14001. Procedeu-se a uma análise formal de aspecto e impacto ambiental, conforme exigido pela ISO 14001:2004 em seu item 4.3.1 – Aspectos ambientais. Para tanto, foi elaborado o procedimento de avaliação de aspectos e impactos ambientais e requisitos legais, que prevê o preenchimento do registro de avaliação de aspectos e impactos. A falta deste procedimento, assim como a não emissão do registro de análise inicial do Sistema de Gestão Ambiental, segundo as normas ISO 14001:2004, implica a não certificação da empresa.

Primeiramente, foi estabelecida a área de abrangência da avaliação, assim como as interfaces com outros ambientes e outras partes interessadas (órgãos públicos). O “Inventário Ambiental” incluiu:

matérias-primas químicas e materiais auxiliares de risco; efluentes líquidos e gasosos; resíduos sólidos; produtos intermediários/subprodutos e produtos acabados; e recursos naturais consumidos (água, eletricidade, combustíveis, gás, etc.). Todos os documentos e registros gerados neste levantamento foram retidos para auditoria, como memorial descritivo. Depois de identificar o maior número possível de impactos ambientais reais e potenciais, positivos e negativos, associados a cada aspecto identificado.

Depois da definição da probabilidade de Ocorrência de Impacto e da Gravidade do Impacto, que é utilizada para a votação da equipe de gestão do sistema, determinou-se o Grau de Significância de acordo com o critério apresentado na Tabela 1.

A empresa realizou uma Primeira Avaliação de Aspectos e Impactos (Tabela 2), que apresenta os resultados votados pelo grupo de implantação do Sistema de Gestão Ambiental, identificando os impactos classificados de acordo com o grau de significância para estabelecer metas, controles operacionais, monitoramento e medição ou planos de emergência. Os aspectos avaliados referem-se à poluição do solo e à escassez de recursos naturais. Observa-se na Tabela 2 que, para os aspectos referentes à poluição do solo, a empresa emprega controles operacionais para disposição de seus resíduos sólidos, seja pela separação e envio para coleta seletiva, seja pelo descarte regulamentado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb) por meio do CADRI (Certificado de Aprovação de Destinação de Resíduos Industriais). O CADRI é o instrumento que aprova o encaminhamento de resíduos sólidos industriais a locais de reprocessamento, armazenamento, tratamento ou disposição final.

Para os aspectos referentes à escassez de recursos naturais (Tabela 2), o grupo formado para implementação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) estabeleceu, após *brainstorming*, objetivos e metas visando a redução do consumo de eletricidade e GLP, além da redução do consumo da água, apesar do grau de significância baixo. Com esta Primeira Avaliação, iniciou-se o monitoramento dos processos que acabaram gerando os dados utilizados para a Avaliação em Emergência. Porém, constatou-se que, com a Primeira Avaliação, não é possível decidir sobre a utilização de soldas com ou sem chumbo.

Tabela 1. Grau de significância obtido pela multiplicação da gravidade do impacto pela probabilidade de ocorrência do impacto.

		Probabilidade de ocorrência de impacto		
		(3) Alta	(2) Média	(1) Baixa
Gravidade do impacto	(3) Alta	9	6	3
	(2) Média	6	4	2
	(1) Baixa	3	2	1

Tabela 2. Resultados da Primeira Avaliação de Aspectos e Impactos da Cast Metais e Soldas Ltda.

Aspecto	Ambiente de interação		Probabilidade	Gravidade	Grau de significância	Controle operacional existente
	Poluição do solo	Escassez de recursos naturais				
Consumo de água		X	1	2	2	-
Consumo de energia elétrica		X	3	2	6	-
Consumo de GLP		X	2	2	4	-
Descarte de papel e papelão	X		1	2	2	Coleta Seletiva
Descarte de componentes mecânicos de equipamentos	X		1	3	3	CADRI
Descarte de copos plásticos	X		1	3	3	Coleta Seletiva
Descarte de componentes elétricos de equipamentos	X		1	3	3	CADRI
Descarte de equipamentos obsoletos	X		1	2	2	Coleta Seletiva
Descarte de papel higiênico	X		1	3	3	Coleta Seletiva
Descarte de panos de limpeza	X		1	3	3	CADRI
Descarte de pilhas e baterias	X		1	3	3	Coleta Seletiva
Descarte de lâmpadas	X		1	3	3	CADRI
Borras de Estanho (Sn/Pb; Sn/Cu; Sn/Ag; Sn/ Zn; Sn/Sb)	X		1	3	3	CADRI

3.2 Avaliação em energia

Para a avaliação em energia na Cast Metais Soldas Ltda., foram estabelecidos os fluxos do processo com as entradas e saídas em massa, para a produção das três soldas. A Figura 1 mostra o fluxo de massa para a liga de 63Sn-37Pb.

Para a produção de 946 t da liga de solda 63Sn-37Pb, 237 t de borra retornam dos clientes e 124 t de sucata são captadas no mercado. O processo de recuperação interna tem um rendimento médio de 55% em massa e recupera a borra dos clientes e a sucata num total de 198 toneladas. Os restantes 45% são enviados para tratamento externo em um fornecedor homologado pelo órgão oficial do Estado (CETESB), o que gera um retorno de 114 t da liga de 63Sn-37Pb.

A Figura 2 apresenta o diagrama de energia do processo de produção das soldas baseadas em estanho e outros metais. Cada fluxo corresponde a uma linha na tabela de avaliação em energia (Tabela 3), em que os fluxos em energia, materiais e serviços quantificados em suas unidades correspondentes são convertidos

em fluxos de energia, quando multiplicados por sua energia por unidade (sej/un.).

Para a solda 63Sn-37Pb, o estanho participa com 71,7% do total em energia, o chumbo com 11,9% sej/sej e a sucata com 16,4% sej/sej. O total em energia para produzir 946 t deste tipo de solda é $9,47 \times 10^{20}$ sej/ano. Quando se avaliam as soldas livres de chumbo, observa-se que o estanho participa com 95% do total de energia na solda 96,5Sn-3Ag-0,5Cu e com 96,8% para a solda 99Sn-0,3Ag-0,7Cu. O total em energia para produzir 13,7 t da solda 96,5Sn-3Ag-0,5Cu é de $1,69 \times 10^{19}$ sej/ano e utilizam-se $9,13 \times 10^{19}$ sej/ano para produzir 72 t da solda 99Sn-0,3Ag-0,7Cu. Estes resultados evidenciam o impacto causado pelo aumento do consumo de estanho nas ligas livres de chumbo. Para os três tipos de solda, a energia investida para a implantação da fábrica está muito aquém daquela exigida pelo processo de operação.

Podem-se comparar os resultados obtidos pela avaliação em energia com aqueles obtidos na primeira avaliação de aspectos e impactos ambientais em alguns pontos. A Tabela 4 apresenta a comparação do grau de significância atribuído para estes três

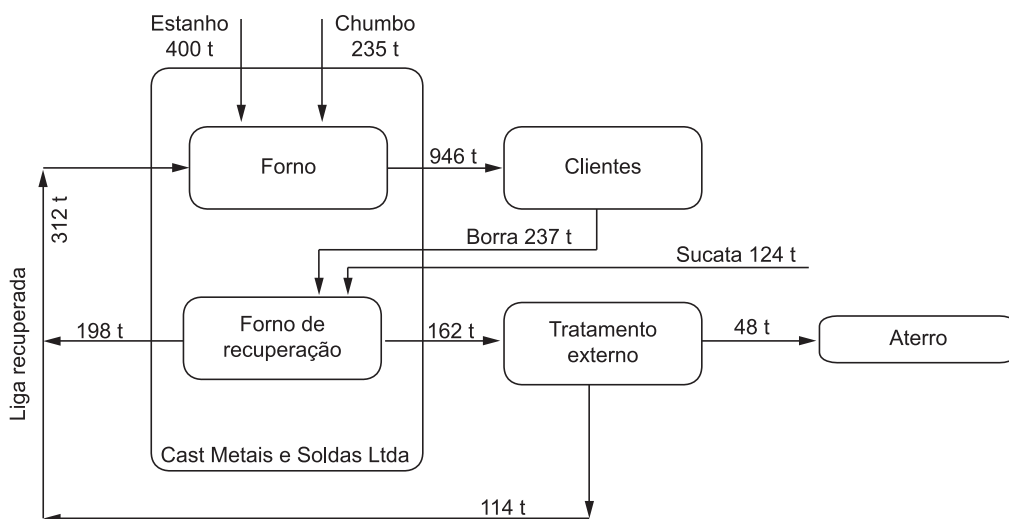


Figura 1. Balanço de massa para a solda 63Sn-37Pb. Valores médios para 2006/2007.

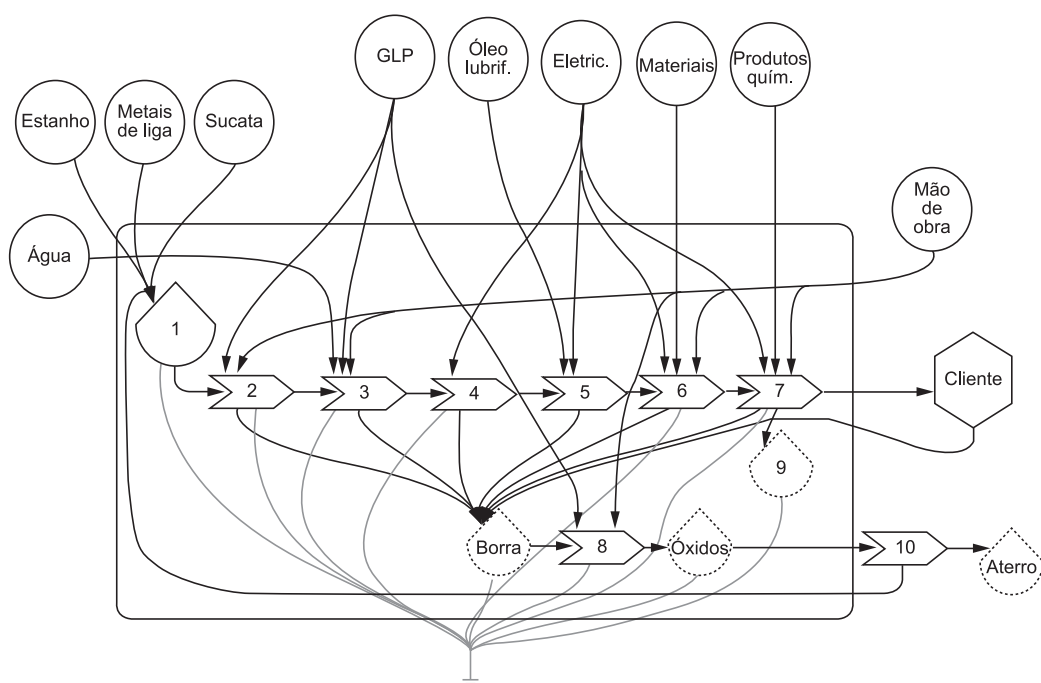


Figura 2. Diagrama de energia da produção de soldas brandas à base de estanho: (1) Estoque de recepção de matéria-prima, (2) Forno de fundição da liga, (3) Coquilhamento dos tarugos, (4) Extrusão do fio primário, (5) Trefilação dos fios, (6) Bobinagem em carretéis plásticos e embalagem, (7) Laboratório químico, (8) Forno para recuperação de borras, (9) Efluente de laboratório e (10) Empresa de recuperação de óxidos.

aspectos comparados com os resultados da avaliação em energia. Embora o consumo de eletricidade tenha sido eleito, pelo grupo de implantação do SGA, como o consumo de impacto mais significativo na produção (Tabela 1), pela avaliação em energia, o GLP apresenta-se com a maior contribuição, seguido pelo uso da água. O consumo de eletricidade é a entrada que menos contribui para o total em energia, o que contraria a percepção dos gestores.

3.3 Avaliação da substituição total da solda estanho-chumbo

Segundo a tendência dos mercados globais, em particular os europeus e o japonês, haverá a substituição total da solda estanho-chumbo. Para simular esta condição, considerou-se a quantidade de produção das soldas livres de chumbo substituindo totalmente a solda 63Sn-37Pb, que é a que atualmente representa 90% da produção da empresa (Tabela 5).

Tabela 3. Avaliação em Emergia da produção anual de soldas 63Sn-37Pb.

Itens para produção da Liga 67Sn-37Pb		Quant. ^(a)	Un.	Energia por unidade ^(b)	Energia Solar	
				(sej/unid.)	sej/ano	% (sej/sej)
Operação						
1	Estanho	$4,00 \times 10^8$	g	$1,70 \times 10^{12}$	$6,79 \times 10^{20}$	71,7
2	Chumbo	$2,35 \times 10^8$	g	$4,80 \times 10^{11}$	$1,13 \times 10^{20}$	11,9
3	Sucata	$1,24 \times 10^8$	g	$1,25 \times 10^{12}$	$1,55 \times 10^{20}$	16,4
4	Retorno de borra ^(c)	$2,37 \times 10^8$	g	$1,25 \times 10^{12}$	$2,95 \times 10^{20}$	31,2
5	Energia elétrica	$6,07 \times 10^9$	J	$1,60 \times 10^5$	$1,16 \times 10^{12}$	<0,1
6	Gás GLP	$1,05 \times 10^{11}$	J	$4,80 \times 10^4$	$5,03 \times 10^{15}$	<0,1
7	Papelão	$1,24 \times 10^6$	g	$3,90 \times 10^9$	$4,83 \times 10^{15}$	<0,1
8	Óleo	$1,84 \times 10^9$	J	$6,60 \times 10^4$	$1,21 \times 10^{14}$	<0,1
9	Mão de obra	$9,80 \times 10^{10}$	J	$4,49 \times 10^6$	$1,38 \times 10^{17}$	0,1
10	Carretéis plásticos	$1,90 \times 10^7$	g	$3,80 \times 10^8$	$7,21 \times 10^{15}$	<0,1
11	Panos de limpeza	$2,04 \times 10^3$	g	$2,31 \times 10^{10}$	$4,71 \times 10^{13}$	<0,1
12	Ácido Clorídrico	$8,91 \times 10^4$	g	$1,00 \times 10^9$	$8,91 \times 10^{13}$	<0,1
13	Ácido Sulfúrico	$3,47 \times 10^4$	g	$1,00 \times 10^9$	$3,47 \times 10^{13}$	<0,1
14	Ácido Nítrico	$1,59 \times 10^4$	g	$1,00 \times 10^9$	$1,59 \times 10^{13}$	<0,1
15	Ácido Fluorídrico	$5,85 \times 10^3$	g	$1,00 \times 10^9$	$5,85 \times 10^{12}$	<0,1
16	Consumo de água	$8,09 \times 10^7$	g	$6,64 \times 10^5$	$7,02 \times 10^{14}$	<0,1
Implantação						
17	Máquinas e Equipamentos	$1,26 \times 10^4$	g	$4,10 \times 10^9$	$1,22 \times 10^{15}$	<0,1
18	Caixas metálicas para manuseio de borras	$3,99 \times 10^3$	g	$2,77 \times 10^9$	$1,43 \times 10^{14}$	<0,1
19	Cadinho	$3,78 \times 10^4$	g	$3,06 \times 10^9$	$1,16 \times 10^{14}$	<0,1
20	Cadinho reserva	$1,26 \times 10^4$	g	$3,06 \times 10^9$	$3,85 \times 10^{13}$	<0,1
21	Estruturas Metálicas do Telhado	$2,98 \times 10^7$	g	$2,77 \times 10^9$	$8,25 \times 10^{16}$	<0,1
22	Construção civil	$2,12 \times 10^6$	g	$1,54 \times 10^9$	$3,26 \times 10^{15}$	<0,1
23	Mão de Obra	$6,56 \times 10^9$	g	$4,49 \times 10^6$	$2,95 \times 10^{16}$	<0,1
				Energia total	$9,47 \times 10^{20}$	

^(a)Dados obtidos por meio do controle de consumo de materiais e insumos. ^(b)Referências: estanho, chumbo, prata, cobre, borra e sucata (COHEN et al., 2007); eletricidade (TILLEY, 2000); gás liquefeito de petróleo (WANG; ZHANG, 2005); papelão (ULGIATI; BROWN, 2002); óleo lubrificante (ODUM, 1996); trabalho no Brasil (COELHO; ORTEGA; COMAR, 2002); plástico (BRANT, 2002); limpando panos, ácido clorídrico, ácido sulfúrico, ácido nítrico e ácido fluorídrico (ODUM, 1996); água (CARUSO et al., 2001); máquinas e equipamentos, caixas de metal, cadinhos, telhados de metal e concreto do edifício industrial (BROWN; BURANAKHARN, 2003). Quando necessário, os valores da emergia por unidade foi multiplicado por 1,68 para a obtenção da emergia total na base $15,83 \times 10^{24}$ sej/ano (ODUM; BROWN; BRANDT-WILLIAMS, 2000). ^(c)Não contabilizado para evitar dupla contagem.

Pode-se notar que o aumento total na emergia da empresa é de aproximadamente 23% sej/sej para o caso da substituição total da liga estanho-chumbo por qualquer uma das ligas livres de chumbo. Ou seja, mais recursos são usados para produzir uma tonelada de solda livre de chumbo do que para produzir a solda tradicional que contém chumbo. É importante ressaltar que a contabilidade em emergia considera todos os recursos utilizados direta ou indiretamente para a obtenção de um produto ou serviço. Deste modo, em termos de eficiência na utilização de recursos, a solda 63Sn-37Pb é a melhor opção. Este resultado está de acordo com os resultados obtidos por Socolof e Geibig (2005) utilizando a ACV (Tabela 6). Estes

autores contabilizaram as quantidades de recursos não renováveis utilizados para a fabricação de 1 kg de solda com e sem chumbo e constataram que até a etapa de manufatura, a fabricação de soldas livres de chumbo emprega 3,5 vezes mais recursos que a solda 63Sn-37Pb. No total do ciclo de vida, a fabricação das soldas livres de chumbo consome 3,2 vezes mais recursos não renováveis que a solda tradicional que contém chumbo. É importante ressaltar que a contabilidade em emergia avalia, não somente a quantidade de materiais empregados para a produção de um bem ou serviço, mas também sua qualidade. Quando se compara o aumento no total de emergia para a produção de soldas livres de chumbo com o uso

Tabela 4. Comparação do grau de significância (análise de aspectos e impactos conforme ISO 14001:2004) e a contribuição em energia das três soldas em estudo (*).

Consumo	Grau de significância	Energia (10 ¹³ × sej/ano)		
		63Sn-37Pb	96,5Sn-3Ag-0.5Cu	99Sn-0,3Ag-0.7Cu
Água	2	70	5	26
Elettricidade	6	0,11	0,08	0,08
GLP	4	503	37	186

(*) os dados obtidos para a solda 63Sn-37Pb foram retirados da Tabela 3. As tabelas de dados referentes às soldas 96,5Sn-3Ag-0.5Cu e 99Sn-0,3Ag-0.7Cu podem ser encontradas em Madureira (2009).

Tabela 5. Simulação da substituição total da soldas estanho-chumbo pelas livres de chumbo.

Solda	Quantidade	Unidade	Energia por unidade / (sej/unidade)	Energia / (sej/ano)
63Sn-37Pb				
Estanho	4,00 × 10 ⁸	g	1,70 × 10 ¹²	6,79 × 10 ²⁰
Chumbo	2,35 × 10 ⁸	g	4,80 × 10 ¹¹	1,13 × 10 ²⁰
Sucata	1,24 × 10 ⁸	g	1,25 × 10 ¹²	1,55 × 10 ²⁰
			Energia total	9,47 × 10²⁰
96,5Sn-3Ag-0,5Cu				
Estanho	6,76 × 10 ⁸	g	1,70 × 10 ¹²	1,15 × 10 ²¹
Prata	2,10 × 10 ⁷	g	4,50 × 10 ¹¹	9,45 × 10 ¹⁸
Cobre	3,50 × 10 ⁶	g	9,80 × 10 ¹⁰	3,43 × 10 ¹⁷
Sucata	4,15 × 10 ⁵	g	1,65 × 10 ¹²	6,87 × 10 ¹⁷
			Energia total	1,16 × 10²¹
99Sn-0,3Ag-0,7Cu				
Estanho	6,92 × 10 ⁸	g	1,70 × 10 ¹²	1,18 × 10 ²¹
Prata	2,10 × 10 ⁶	g	4,50 × 10 ¹¹	9,44 × 10 ¹⁷
Cobre	4,89 × 10 ⁶	g	9,80 × 10 ¹⁰	4,79 × 10 ¹⁷
Sucata	1,79 × 10 ⁶	g	1,69 × 10 ¹²	3,02 × 10 ¹⁸
			Energia total	1,18 × 10²¹

de recursos não renováveis para a fabricação de 1 kg de solda, pode-se constatar que o maior consumo de materiais se dá na fase de extração/beneficiamento. Nesta fase, são empregados materiais de menor energia por unidade (ou menor qualidade), o que implica em aumento de apenas 23% na energia total.

3.4 Avaliação da substituição das soldas 63Sn-37Pb com relação aos danos à saúde do trabalhador

Os esforços mundiais voltados à substituição das soldas de estanho-chumbo na manufatura e na indústria eletroeletrônica devem-se, principalmente, à tentativa de eliminar os danos potenciais à saúde humana causados pela exposição aos vapores de chumbo na manufatura e na montagem dos circuitos eletrônicos. O indicador DALY permite avaliar o dano causado pela emissão de poluentes como gases de chumbo, CO₂, SO_x e material particulado (MP). Itsubo et al. (2003) reportaram que a emissão de chumbo é de

0,6 g de chumbo por quilograma de solda produzida, desde a extração até a manufatura. Neste trabalho, esta emissão foi atribuída à etapa de manufatura e considerou-se a mesma quantidade emitida, tanto para a manufatura como para a etapa de aplicação da solda. A Cast Metais e Soldas Ltda. utiliza EPIs (Equipamentos de Proteção Individual), bem como emprega EPCs (Equipamentos de Proteção Coletiva) para captação dos gases e filtragem através de sistema exaustor com mangas, para recolhimento do pó, com eficiência nominal de 80%.

As emissões de CO₂, SO_x e material particulado foram retiradas de Socolof e Geibig (2005). Para avaliar a total substituição das soldas contendo chumbo na empresa em estudo, considerou-se a quantidade de solda livre de chumbo igual à da liga 63Sn-37Pb (946 t) produzida pela Cast Metais e Soldas Ltda. A Tabela 7 apresenta os indicadores DALY obtidos para a produção de cada tipo de solda e os custos anuais calculados com a utilização do valor estatístico do impacto na vida humana para o Brasil (MIRAGLIA; SALDIVA, 2005).

Tabela 6. Cálculo da quantidade de recursos não renováveis empregados na obtenção de 1 kg de solda ($\text{kg}_{\text{NR}}/\text{kg}_{\text{SOLDA}}$) para a produção da Cast Metais e Soldas Ltda.

Etapa do ciclo de vida	SnPb / ($\text{kg}_{\text{NR}}/\text{kg}_{\text{SOLDA}}$)	96,5Sn-3Ag-0,5Cu / ($\text{kg}_{\text{NR}}/\text{kg}_{\text{SOLDA}}$)	SnAgCu / SnPb
Extração/beneficiamento	262	1078	4,1
Manufatura	66	69	1,0
Subtotal	328	1147	3,5
Uso/Aplicação	35	21	0,6
Descarte	2	2	1,0
Total no Ciclo de Vida	365	1170	3,2

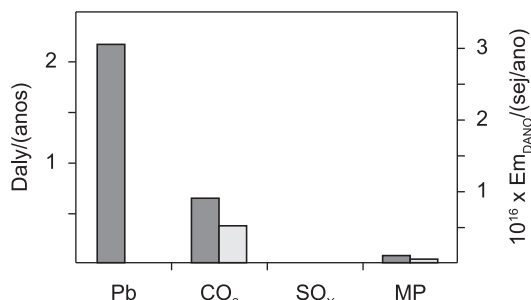
Adaptado de Socolof e Geibig (2005).

Tabela 7. Valores dos indicadores DALY e Em_{DANO} para as soldas 63Sn-37Pb e 96,5Sn-3Ag-0,5Cu na manufatura.

Tipo de solda	DALY/(anos)	$\text{Em}_{\text{DANO}}/(\text{sej/ano})$	US\$/ano
63Sn-37Pb	2,9	$4,28 \times 10^{16}$	22.330,00
96,5Sn-3Ag-0,5Cu	0,4	$6,02 \times 10^{15}$	3.080,00

Na manufatura, o indicador de anos de vida perdidos por inaptidão ou por morte prematura (DALY) mostra que a produção de soldas 63Sn-37Pb causa uma perda de 2,9 anos, enquanto que, se esta solda fosse substituída pelas soldas livres de chumbo, a perda seria de 0,4 anos. Estes valores, convertidos em moeda corrente, representam US\$ 22.330,00 e US\$ 3.080,00, respectivamente, o que poderia ser interpretado como uma redução de aproximadamente 85% nos gastos com a saúde humana e os custos de hospitalizações causados pelas emissões da produção de 946 t de solda.

A energia correspondente ao dano para a saúde humana ou ao número de anos perdidos (Em_{DANO}) devido à emissão dos contaminantes na manufatura é sete vezes maior para a produção de soldas 63Sn-37Pb. Esta energia pode ser associada aos serviços ambientais utilizados para mitigar os efeitos das emissões da manufatura de soldas na saúde humana. O ambiente tem uma capacidade de fornecer recursos (energia) para suporte das atividades humanas, mas quando esta energia é utilizada, não estará disponível para outros processos. Desta forma, se a manufatura de soldas utiliza recursos diretos ou indiretos devido aos danos causados à saúde humana por suas emissões, outros processos estarão impedidos de utilizar estes recursos, o que pode comprometer a capacidade de suporte local ou global. A Figura 3 mostra os valores do indicador DALY na manufatura para cada emissão considerada e a energia associada ao dano para a saúde humana para os dois tipos de solda. A contribuição das emissões de chumbo corresponde a 75% dos anos perdidos e da energia do dano e a contribuição das emissões de CO_2 é, também, significativa e corresponde a 22% do dano calculado. Desta forma, apesar de considerada a eficiência de 80% no desempenho dos EPIs e EPCs, observa-se que,

**Figura 3.** Valores do DALY e da energia associada ao dano para a saúde do trabalhador na manufatura para cada emissão considerada. Em preto os valores para a solda 63Sn-37Pb e em cinza os valores associados à solda 96,5Sn-3Ag-0,5Cu.

na manufatura, é aconselhável a produção das soldas livres de chumbo, o que pode explicar a pressão dos fabricantes de eletroeletrônicos japoneses e europeus pelo banimento das soldas à base de chumbo.

3.4.1 Avaliação da substituição das soldas 63Sn-37Pb com relação aos danos à saúde do trabalhador em todos os estágios do ciclo de vida do produto

Considerando, por outro lado, que a produção de soldas livres de chumbo utiliza 23% mais energia que a produção das soldas à base de chumbo, é recomendável que uma avaliação mais ampla, incluindo outras etapas do ciclo de vida da fabricação das soldas, seja efetuada. O relatório de Socolof e Geibig (2005) mostra as quantidades de emissões de CO_2 , SO_x e MP para o ar por quilograma de solda para todo o ciclo de vida dos dois tipos de solda, o que permite calcular o indicador DALY desde a extração das matérias-primas até o descarte do produto para a produção da Cast Metais

e Soldas Ltda. Na Tabela 8, pode-se constatar que, mesmo considerando uma eficiência de 80% de EPIs e EPCs para todo o ciclo, o indicador DALY para as emissões de CO₂ na etapa de extração/beneficiamento das soldas livres de chumbo é aproximadamente três vezes maior que aquele calculado para as emissões de chumbo na manufatura. Da mesma forma, observam-se aproximadamente 7,5 anos perdidos por inaptidão ou por morte prematura devido à emissão de material particulado na etapa de extração/beneficiamento das soldas livres de chumbo em contraste com os 4,36 anos perdidos pela emissão dos vapores de chumbo nas etapas de manufatura e uso/aplicação das soldas 63Sn-37Pb.

A Figura 4 mostra a comparação entre os valores do DALY para os dois tipos de solda, para cada etapa do ciclo de vida, considerando-se o total das emissões

associadas à produção de 946 t de cada tipo de solda, com e sem o uso de EPIs e EPCs. É importante ressaltar que a emissão de chumbo desde a extração até a manufatura reportada por Itsubo et al. (2003) está incluída na etapa de manufatura.

Para a solda 63Sn-37Pb, observa-se que os anos perdidos devido às emissões de chumbo para a atmosfera são mais importantes nas etapas de manufatura e aplicação da solda, mas que, na etapa de extração/beneficiamento, os anos perdidos devido às emissões de CO₂, SO_x e MP são comparáveis àqueles associados à emissão de vapores de chumbo nas etapas posteriores. No ciclo de vida das soldas livres de chumbo, observa-se, na etapa de extração/beneficiamento, que o valor do DALY associado às emissões de CO₂, SO_x e MP é aproximadamente

Tabela 8. Valores dos indicadores DALY calculados para as soldas 63Sn-37Pb e 96,5Sn-3Ag-0,5Cu, considerando-se a eficiência de 80% dos EPIs e EPCs desde a extração até o descarte.

	DALY / (anos)			
	Pb	CO ₂	SO _x	MP (**)
63Sn-37Pb				
Extração/Beneficiamento		3,354	0,057	0,89
Manufatura (*)	2,18	0,651	0,01	0,072
Uso/Aplicação (*)	2,18	0,698	0,145	0,591
Descarte		0,035	0,001	0,004
96,5Sn-3Ag-0,5Cu				
Extração/Beneficiamento	-	6,233	1,822	7,647
Manufatura	-	0,365	0,008	0,037
Uso/Aplicação	-	1,433	0,176	0,717
Descarte	-	0,042	0,001	0,004

(*) emissões de chumbo na atmosfera de acordo com Itsubo et al. (2003).

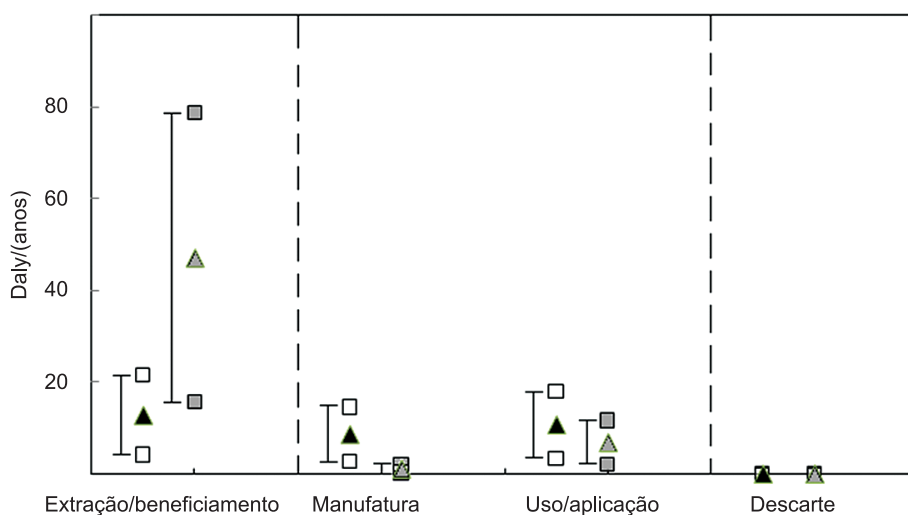


Figura 4. Comparação entre os valores do DALY para os dois tipos de solda e para cada etapa do ciclo de vida das soldas 63Sn-37Pb e 96,5Sn-3Ag-0,5Cu. As barras verticais mostram a variação dos valores quando se considera o uso de EPIs e EPCs com 80% de eficiência e sua ausência. Os triângulos representam a média das duas condições. MP: material particulado.

Tabela 9. Valores dos indicadores DALY calculados considerando-se o total das emissões para todo o ciclo de vida para os dois tipos de solda e os correspondentes valores estimativos de vida e valores de emergência associada ao dano (Em_{DANO}).

Etapa do ciclo de vida	DALY/(anos) com EPIs e EPCs	US\$/(ano) com EPIs e EPCs	$Em_{DANO} \times 10^{16}/(sej/ano)$ com EPIs e EPCs	DALY/(anos) sem EPIs e EPCs	US\$/(ano) sem EPIs e EPCs	$Em_{DANO} \times 10^{16}/(sej/ano)$ sem EPIs e EPCs
63Sn-37Pb						
Extração/Beneficiamento	4,3	33.110,00	6,34	21,505	165.588,50	33,22
Manufatura	2,9	22.330,00	4,28	14,565	112.150,50	22,50
Uso/Aplicação	3,6	27.720,00	5,31	18,07	139.139,00	27,91
Descarte	<0,1			0,2	1.540,00	0,03
	10,9	83.930,00	16,08	54,34	418.418,00	83,94
96,5Sn-3Ag-0,5Cu						
Extração/Beneficiamento	15,7	120.890,00	23,17	78,51	604.527,00	121,28
Manufatura	0,4	3.080,00	0,59	2,05	15.785,00	31,66
Uso/Aplicação	2,3	17.710,00	3,39	11,63	89.551,00	17,96
Descarte	<0,1			0,235	1.809,50	0,03
	18,5	142.450,00	27,30	92,425	711.672,50	142,78

quatro vezes maior que o valor do DALY associado à emissão de chumbo na manufatura. Sem a utilização de equipamentos de proteção, o total de anos perdidos para o ciclo de vida da solda de estanho-chumbo apresenta um DALY total de 54,3 anos. Entretanto, totalizando-se os anos perdidos para a manufatura das soldas livres de chumbo obtém-se o valor de 92,4 anos, sendo que, deste valor, 40 anos correspondem às emissões de CO_2 e 42 anos à emissão de material particulado. O total de anos perdidos por incapacidade ou morte prematura mostra-se maior para as soldas livres de chumbo, mesmo com a utilização de equipamentos de proteção individuais e coletivos. A Tabela 8 mostra o total de anos perdidos por morte prematura ou incapacidade para cada etapa do ciclo de vida dos dois tipos de solda e os correspondentes valores do valor estatístico do impacto na vida humana (MIRAGLIA; SALDIVA, 2005) e do indicador Em_{DANO} .

Observa-se, na Tabela 9, que os gastos com a saúde humana e os custos de hospitalizações associados ao ciclo de vida da solda de 63Sn-37Pb podem variar de US\$ 20.000,00 a US\$ 110.000,00 por ano, dependendo da utilização ou da eficácia dos equipamentos de proteção individual e coletiva. Para a mesma etapa do ciclo de vida das soldas livres de chumbo, os gastos variam de US\$ 3.000,00 a US\$ 16.000,00 por ano. A tomada de decisão, com base nesta análise, levaria à substituição total das ligas de chumbo, considerando a saúde do trabalhador mais importante que o uso de reservas naturais (Tabela 5).

Entretanto, se estas soldas forem totalmente substituídas por soldas livres de chumbo, os gastos com a saúde humana podem atingir mais de US\$ 700.000,00. Vale a pena ressaltar que, na etapa

de manufatura há uma redução de mais de 80% nas possíveis despesas com saúde e hospitalizações. O mesmo ocorre na etapa de uso e aplicação, em que as despesas com saúde sofrem uma redução de aproximadamente 37%. Entretanto, esta redução aparente é compensada por um grande aumento nos gastos anuais devidos aos impactos provenientes da etapa de extração/beneficiamento. A emergência associada ao dano causado à saúde humana pela emissão de poluentes na atmosfera durante o ciclo de vida das soldas 96,5Sn-3Ag-0,5Cu pode chegar a $1,42 \times 10^{18}$ sej/ano, o que corresponde à emergência necessária para manter produtivos 203 hectares por ano para a produção de café (OGURA, 2009) ou aproximadamente 1.700 hectares por ano para a produção de bambu (BONILLA et al., 2010).

4 Conclusão

A síntese em emergência foi utilizada para avaliar a produção dos três tipos de ligas na Cast Metais e Soldas Ltda. e determinar a intensidade de utilização dos recursos naturais no processo de produção destas ligas. O indicador de DALY foi empregado para avaliar os danos para a saúde humana causados pelas emissões ao ar. A emergência associada ao dano à saúde humana também foi calculada. Na manufatura:

- A avaliação em emergência mostrou que a utilização intensiva dos recursos naturais e, em especial, o uso de estanho, é o fator que contribui mais fortemente com o total em emergência. Entre os insumos utilizados, o GLP tem maior contribuição no total em emergência, para todas as ligas estudadas;

- Em termos de eficiência na utilização de recursos, a solda 63Sn-37Pb é a melhor opção, já que a fabricação das ligas livres de chumbo apresenta energia total aproximadamente 23% superior; e
- O cálculo dos indicadores DALY mostra que pode haver cerca de 3 anos perdidos, devido à produção de solda 63Sn-37Pb, com $Em_{DANO} = 4,28 \times 10^{16}$ sej/ano. Para ligas livres de chumbo, há 0,41 anos perdidos associados à etapa de manufatura ($Em_{DANO} = 6,02 \times 10^{15}$ sej/ano). O valor estatístico de vida mostra um custo anual de US\$ 22.330,00 para a liga 63Sn-37Pb, que é aproximadamente sete vezes maior que o obtido para a produção de ligas livres de chumbo.

A avaliação efetuada na etapa de manufatura leva a resultados ambíguos. De um lado, a produção de soldas 63Sn-37Pb mostra-se mais eficiente no uso de recursos naturais e, levando-se em conta este resultado, seria recomendável optar pela continuidade da produção das soldas contendo chumbo. Por outro lado, o cálculo do indicador DALY e da Em_{DANO} mostram que a opção pelas ligas livres de chumbo é preferível.

Quando se avalia apenas uma parte da cadeia produtiva (manufatura), os resultados obtidos não permitem decidir, com base nos indicadores quantitativos, qual a solda mais adequada para evitar o impacto. Tomando-se uma decisão subjetiva e antropocêntrica, pode-se optar pela substituição total das soldas de estanho-chumbo pelas soldas livres de chumbo, levando em consideração que a saúde humana é mais importante que a preservação dos recursos naturais. Esta, de fato, foi a decisão tomada pela Comunidade Europeia e pelo Japão, que concentram as atividades de produção de solda e montagem de circuitos eletrônicos.

Entretanto, quando a avaliação é ampliada para levar em consideração todo o ciclo de vida da produção dos dois tipos de solda, observa-se que, na etapa de extração/beneficiamento, a produção das soldas livres de chumbo é menos eficiente no que se refere ao uso de recursos naturais não renováveis e, também, causa maior dano à saúde humana. Este dano ocorre nos locais em que se extrai e beneficia o minério necessário para a produção destas soldas, geralmente em países em desenvolvimento ou países que têm sua economia baseada na extração e exportação de recursos naturais não renováveis.

Referências

- ALMEIDA, C. M. V. B. et al. Emery as a tool for Ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 32-43, 2010a.
- ALMEIDA, C. M. V. B. et al. Identifying improvements in water management of bus-washing stations in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 11, p. 821-831, 2010b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.001>
- ANDRAE, N. S. G. et al. Life cycle assessment of Japanese high-temperature conductive adhesives. **Environmental Science Technology**, v. 42, p. 3084-3089, 2008. <http://dx.doi.org/10.1021/es0709829>
- BARRELLA, F. A.; ALMEIDA, C. M. V. B.; GIANNETTI, B. F. Ferramenta para tomada de decisão considerando a interação dos sistemas de produção e o meio ambiente. **Produção**, v. 15, n. 1, p. 87-101, 2005.
- BONILLA, S. H. et al. Sustainability assessment of a giant bamboo plantation in Brazil: exploring the influence of labor, time and space. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 83-91, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.07.012>
- BROWN, M. T.; BURANAKARN, V. Emery indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 44, n. 6, p. 419-419, 2003.
- CARUSO, C. et al. Emery based analysis of Italian electricity production system. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 66, p. 265-272, 2001. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1012412420744>
- CIOCCI, R.; PECHT, M. Impact of environmental regulations on green electronics manufacture. **Microelectronics International**, v. 23, n. 2, p. 45-50, 2006. <http://dx.doi.org/10.1108/13565360610659716>
- COELHO, O.; ORTEGA, E.; COMAR, V. **Balço de Energia do Brasil**. UNICAMP, 2002. Disponível em: <<http://www.fea.unicamp.br/docente-ortega-livro-C05-Brasil-COC.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2009.
- COHEN, M. J.; BROWN, M. T.; SHEPERD, K. D. Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emery synthesis. **Agricultural Ecosystems & Environment**, v. 114, p. 249-269, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.10.021>
- ROMM, D.; ABBOTT, D. Pb-free solder joint evaluation. **Surface mount technology**, v. 12, p. 84-88, 1998.
- DEUBZER, O. et al. **Lead-free soldering, toxicity, energy and resource consumption**. Berlin: Fraunhofer IZM, 2001. p. 290-295.
- FUJIMO, M.; SUGA, T. Evaluation of energy consumption of lead-free soldering process. In: ECODSIGN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 3., 2003, Toquio. **Proceedings... IEEE**, 2003. p. 831-835. <http://dx.doi.org/10.1109/ECODIM.2003.1322782>
- GARCIA, L. R. et al. Correlação entre propriedades mecânicas e arranjo dendrítico de ligas Sn-Zn utilizadas em solda sem a presença de chumbo. **Revista Matéria**, v. 14, n. 2, 2009.
- GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B.; BONILLA, S. H. Comparing emery accounting with well-known sustainability metrics: The case of Southern Cone Common Market, Mercosur. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3518-3526, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.027>

- GIANNETTI, B. F.; BARRELLA, F. A.; BONILLA, S. H. Aplicações do diagrama emergético triangular na tomada de decisão ecoeficiente. **Produção**, v. 17, n. 2, p. 246-262, 2007.
- GIANNETTI, B. F. et al. The reliability of experts' opinions in constructing a composite environmental index: The case of ESI 2005. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2448-2459, 2009. PMID:19285781. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.018>
- ITSUBO, N. et al. Damage assessment of human health of lead-free based on endpoint-type lcia methodology. In: ECODESIGN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 3., 2003, Toquio. **Proceedings... IEEE**, 2003. p. 836-838.
- KU, A. et al. Lead-free solders: issues of toxicity, availability and impacts of extraction. In: IEEE ELECTRONIC COMPONENTS AND TECHNOLOGY CONFERENCE PROCEEDINGS, 53., 2003, New Orleans. **Proceedings... IEEE**, 2003. p. 47-53.
- MA, J.; CHEN, G. Lead-free solder materials for sustainable development of green electronics in China. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC PACKAGING TECHNOLOGY, 6., 2005, Beijing. **Proceedings... IEEE**, 2005. p. 1-6.
- MADUREIRA, M. A. **Avaliação em emergia para tomada de decisão na substituição das soldas à base de estanho e chumbo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Paulista, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.advancesincleanerproduction.net/papers/dissertations/madureira_ma.pdf>.
- MIRAGLIA, S. G. K.; SALDIVA, P. H. N. An evaluation of air pollution health impacts and costs in São Paulo, Brazil. **Environmental Management**, v. 35, n. 5, p. 667-676, 2005. PMID:15920669. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-004-0042-9>
- ODUM, H. T.; BROWN, M. T.; BRANDT-WILLIAMS, S. **Handbook of Emergy Evaluation**: a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Gainesville: University of Florida, Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, 2000. Fólio # 1: Introduction and Global Budget.
- ODUM, H. T. **Environmental accounting**: emergy and environmental decision making. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- OGURA, Y. **Estudo da sustentabilidade ambiental da produção de café**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Paulista, São Paulo, 2009.
- OKAMOTO, M. et al. Overall Technological Results of IMS-EFSOT. **Japanese Project in Environmental Impact of Lead-Free Soldering**, p. 554-558, 2005.
- PERASSI, N. C. P. **Manual de soldas brandas**: estanho – chumbo: A teoria da Soldagem (Soldering). Gráfica de Edições Paulinas, 1994.
- REUTER, M. N.; EVERHOEF, W. V. A dynamic model for the assessment of the replacement of lead in solders. **Journal of Electronic Materials**, v. 33, n. 12, p. 1567-1580, 2004. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-004-0100-3>
- SEGERBERG, T.; HEDEMALM, P. Life cycle assessment of tin-lead solder and silver-epoxy conductive adhesive. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND THE ENVIRONMENT, 1996, Dallas. **Proceedings... IEEE**, 1996. p. 64-65.
- SOCOLOF, M. L.; GEIBIG, J. R. Life-cycle impacts of lead and lead-free solder used in wave. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND THE ENVIRONMENT, 2005, Bethesda. **Proceedings... IEEE**, 2005. p. 96-101.
- TILLEY, D. R. **Emergy basis of forest systems**. 1999. 310 f. Thesis (Doctoral)-University of Florida, 1999.
- TURBINI, L. J. Processing and material issues related to lead-free soldering. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 18, n. 1-2, p. 147-154, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-006-9014-6>
- TURBINI, L. J. et al. Examining the environmental impact of lead-free soldering alternatives. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND THE ENVIRONMENT, 2000, New York. **Proceedings... IEEE**, 2000. p. 146-153.
- UKIDWE, N. U.; BAKSHI, B. R. Thermodynamic accounting of ecosystem contribution to economic sectors with application to 1992 U.S. economy. **Environmental Science & Technology**, v. 38, p. 4810-4827, 2004. <http://dx.doi.org/10.1021/es035367t>
- ULGIATI, S.; BROWN, M. T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions – The case of electricity production. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, p. 335-348, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00044-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00044-0)
- WANG, L.; ZHANG, J.; NI, W. Emergy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP plant EIP). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 189, p. 233-240, 2005.
- ZHANG, X. et al. Emergy evaluation of the sustainability of Chinese steel production during 1998-2004. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 1030-1038, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.014>
- ZHOU, X.; SCHOENUNG, J. M. An integrated impact assessment and weighting methodology: evaluation of the environmental Consequences of Lead-Free Solder Alternatives. **Journal of Environmental Management**, v. 83, n. 1, p. 1-24, 2007. PMID:16714079. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.01.006>