

**XI SILUBESA*****Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental***

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

VI-063 - CÁLCULO DA TOXICIDADE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**Luciano Miguel Moreira dos Santos, Dr. (1)**

Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto
Doutor em Gestão e Tec. Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais
Mestre em Eng. Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais
Especialista em Eng. Sanitária e Ambiental pela PUC – MG
Especialista em Gestão Ambiental pela Helsink University of Technology.

Edwin Auza Villegas, PhD.

Professor da Universidade Federal de Minas Gerais
Pós-doutor pela Berkeley University - USA
Doutor em Geociências Aplicadas pela Stanford University - USA
Mestre em Eng. Metal. pelo New Mexico Inst of Minning and Technology - USA

Endereço⁽¹⁾: Rua Senador Bawden, 02 - centro – Mariana – MG CEP 35420-000**E-MAIL:** lumiguel@cefetop.edu.br Tel. 0xx 31 3557 3350 Fax 0xx 31 3559 2136**RESUMO**

A toxicidade é um efeito combinado de intoxicação crônica e aguda que, por sua vez, são função da bioacumulação e mobilidade no meio ambiente. Os impactos toxicológicos estão em uma categoria para a qual o transporte de substâncias entre os meios representa um papel importante. As substâncias químicas não permanecem estáticas no compartimento ambiental para o qual foram emitidas. Elas tendem a se espalhar para os outros compartimentos. Uma substância tóxica pode trazer mais riscos a outro compartimento ambiental do que para o qual foi emitida originalmente. Este trabalho apresenta a consolidação do desenvolvimento e modelagem da toxicidade humana crônica e aguda, utilizando os fatores de caracterização para metais pesados e compostos carcinogênicos, e os fatores para emissão de dioxinas e geração de resíduos sólidos perigosos. O modelo desenvolvido propiciará às indústrias calcular o índice de toxicidade de seus processos promovendo a melhoria ambiental contínua em conformidade com a norma NBR ISO 14001 de gestão ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Toxicidade, Compostos carcinogênicos, Dioxinas, Metais pesados, Gestão ambiental.**INTRODUÇÃO**

Os produtos químicos têm um papel essencial no progresso sócio-econômico mundial. Utilizados de maneira correta, podem ser rentáveis e não oferecerem riscos com sua utilização. Entretanto, para vários deles, ainda se deve definir em que condições cada um pode ser utilizado. A falta de dados científicos para avaliar os riscos inerentes à utilização de inúmeros produtos químicos e a falta de meios para avaliar aqueles para os quais já se dispõem, são barreiras a serem transpostas em direção a uma avaliação mais correta desta categoria de impacto ambiental.

A contaminação em grande escala por substâncias químicas, com graves prejuízos à saúde, às estruturas genéticas, à reprodução e ao meio ambiente tem-se verificado neste século nas principais regiões industrializadas do planeta. A recuperação destas regiões necessita de investimentos importantes e o desenvolvimento de novas técnicas. Somente agora se começa a compreender os efeitos a longa distância da poluição, que podem influenciar processos físicos e químicos fundamentais da atmosfera e do clima terrestre, e a se reconhecer a importância destes fenômenos na manutenção da vida terrestre. Diversos organismos internacionais participam de projetos visando ao emprego seguro de produtos químicos e numerosos países criaram programas de trabalho sobre esta questão com repercussão

internacional, pois os riscos ligados às substâncias químicas ultrapassam as fronteiras geográficas e políticas (Pereira, 1999).

Esta categoria de impacto engloba os impactos ecotoxicológicos e a toxicidade humana. A área de estudo é a saúde dos ecossistemas e a saúde humana. A toxicidade pode ser aguda ou crônica e milhares de substâncias químicas podem contribuir direta ou indiretamente para efeitos ambientais adversos. Pretende-se com esta categoria, avaliar os efeitos das substâncias tóxicas nos ecossistemas aquáticos, terrestres e na saúde humana.

O desenvolvimento desse trabalho possibilitará às organizações avaliarem e calcularem o índice de toxicidade de seus processos contribuindo para a identificação dos aspectos ambientais significativos, visando a melhoria ambiental contínua do sistema de gestão ambiental.

DESENVOLVIMENTO DO INDICADOR DE TOXICIDADE

A toxicidade é um efeito combinado de intoxicação crônica e aguda que, por sua vez, são função da bioacumulação e mobilidade no meio ambiente. Os impactos toxicológicos estão em uma categoria para a qual o transporte de substâncias entre os meios representa um papel importante. As substâncias químicas não permanecem estáticas no compartimento ambiental para o qual foram emitidas. Elas tendem a se espalhar para os outros compartimentos. Uma substância tóxica pode trazer mais riscos a outro compartimento ambiental do que para o qual foi emitida originalmente. Por exemplo, uma substância tóxica volátil emitida para a água evapora em grande parte para o ar, onde pode trazer riscos à saúde dos indivíduos que vierem a respirar o ar contaminado. Vários autores recomendam incorporar a dispersão de poluentes nesta categoria (Heijungs et al, 1992; Lindfors et al, 1995; Hauschild & Wenzel, 1998; Guinée, 1998).

Heijungs et al (1992) elaboraram fatores de caracterização para emissão de substâncias tóxicas ao ser humano para os meios ar, água e solo, utilizando os consumos per capita diários de ar e água, a população mundial e os volumes de ar, água e solo terrestres. É usado também o consumo diário aceitável de uma substância por quilo de peso para o cálculo do indicador. A soma do produto dos três fatores de emissão para o ar, solo e água resulta no valor do indicador. Heijungs et al (1992) considera que estes fatores de caracterização para toxicidade humana deveriam ser considerados como uma indicação até que métodos melhores sejam desenvolvidos.

Hauschild & Wenzel (1998) e Huijbregts (1999) desenvolveram fatores de caracterização para a toxicidade humana, terrestre e aquática considerando a dispersão de poluentes em regiões de clima temperado. Estes fatores foram desenvolvidos considerando o sistema climático europeu e tendo como substância referência o composto 1,4-diclorobenzeno. Portanto, não é confiável utilizar este modelo em regiões tropicais. Além disso, os limites máximos de emissão da substância 1,4-diclorobenzeno não são definidos para nenhuma legislação ambiental estrangeira.

Seppälä (1999) avalia a ecotoxicidade nas sub-categorias toxicidade aquática aguda, toxicidade aquática crônica e toxicidade terrestre crônica. São utilizados na avaliação a emissão de metais pesados e compostos orgânicos persistentes, para a atmosfera e para a água.

Goedkoop et al (1995) utiliza os fatores de caracterização para metais pesados e compostos carcinogênicos. Os metais pesados são convertidos em chumbo equivalente e os compostos carcinogênicos em hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Santos (2001) utiliza estes fatores de caracterização para avaliar a toxicidade humana crônica devido à emissão de processos metalúrgicos.

O modelo desenvolvido neste trabalho avalia a toxicidade humana crônica e aguda, utilizando os fatores de caracterização definidos por Goedkoop et al (1995) para metais pesados e compostos carcinogênicos, e os fatores para emissão de dioxinas e geração de resíduos sólidos perigosos.

Os fatores de conversão para transformação dos compostos causadores de toxicidade em unidade equivalente são denominados de Potenciais de Toxicidade (PT). Eles têm sido desenvolvidos para comparar as emissões de diferentes compostos. O potencial de toxicidade é a relação entre o consumo per capita de ar ou água (CP) multiplicado pela população mundial (M), dividido pelo volume mundial de ar ou água (V) e pela ingestão diária máxima aceitável da substância tóxica (IDMA), como mostrado na equação 1 (Goedkoop et al, 1995; Guinée, 1998):

$$PT = \frac{CP}{V} \times \frac{M}{IDMA} \quad (1)$$

Onde :

PT = Potencial de Toxicidade;

CP = consumo per capita de ar ou água;

M = população mundial;

V = volume mundial de ar ou água;

IDMA = ingestão diária máxima aceitável da substância tóxica.

TOXICIDADE POR METAIS PESADOS

Os metais pesados são assimilados pelo corpo humano pela respiração de vapores, fumos ou poeiras e pela ingestão ou contato com a boca de alimentos, ferramentas, dedos ou outros objetos contaminados. A principal característica dos metais é a sua bioacumulação, que potencializa os efeitos toxicológicos. Segundo Mendes (1980), o principal efeito tóxico do chumbo realiza-se no tecido hematopoiético, fígado e rins. A ação dos metais também afeta o sistema nervoso em nível central e em nível periférico, causando encefalopatias e paralisias dos músculos extensores. Para metais pesados, os fatores de conversão são calculados para o chumbo, adotado como substância referência. A tabela 1 apresenta estes fatores para emissão de metais para o ar e para a água.

Tabela 1: Fatores de conversão para metais (PT).

Emissão para o ar	PT (kg Pb eq. / kg substância)
CdO	1
Cd	1,35
Hg	1,35
Mn	3,64
Pb	2,82
As	2,07
Emissão para a água	PT (kg Pb eq. / kg substância)
B	0,03
Ba	0,14
Cd	3
Cr	0,2
Cu	0,005
Hg	10
Mn	0,02
Mo	0,14
Ni	0,5

Pb	1
Sb	2

Fonte : Goedkoop et al, 1995.

TOXICIDADE POR COMPOSTOS CARCINOGÊNICOS

Para os compostos carcinogênicos, adotou-se como substância referência os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA). O benzeno é um destes compostos usado extensivamente como solvente na indústria química ou como matéria-prima para fabricação de outros produtos. Segundo Deichmann et al (1962), estes compostos, quando inalados, causam imediatamente edemas pulmonares, pneumonias e hemorragias. Quando ocorre exposição a altas concentrações, pode haver convulsões seguidas de paralisia e perda de consciência, além de irritar as membranas dos olhos, nariz e sistema respiratório. Entretanto, a médio e longo prazo são responsáveis pelo desenvolvimento de tumores cancerígenos. Os compostos carcinogênicos são convertidos em HPA equivalente pelos fatores da tabela 2.

Tabela 2 : Fatores de conversão para compostos carcinogênicos (PT).

Composto	PT (kg HPA eq. / kg substância)
As	0,044
Benzeno	0,000011
Benzopireno	1
Cr ⁺⁶	0,44
C _x H _y aromático	0,000011
Etilbenzeno	0,000011
Fluoranteno	1
Ni	0,44
HPA	1
Piche e alcatrão	0,000011

Fonte : Goedkoop et al, 1995.

TOXICIDADE POR DIOXINAS

As dioxinas somente recentemente têm despertado o interesse da comunidade internacional. Dioxina é o termo geral para os compostos aromáticos clorados, que consistem principalmente de policloro-para-dibenzodioxinas (PCDD's) e de policloro dibenzofuranos (PCDF's). As estruturas das dioxinas e furanos possuem dois anéis de benzeno com até oito átomos de cloro, ligados por um (dioxina) ou dois (furano) átomos de oxigênio.

As principais causas da formação de dioxinas são as atividades industriais, incineração de resíduos e queima de combustíveis. Jacomino et al (1999) afirma que a resíntese é a principal causa da formação das dioxinas, onde sob a influência de catalisadores as mesmas são formadas a partir de compostos orgânicos não-clorados e fontes de cloro. A faixa de temperatura em que há a formação da dioxina é de 200 a 450° C.

Vários incidentes internacionais têm ocorrido devido à contaminação por dioxinas. A alimentação contribui com aproximadamente 95 % do total de exposição de humanos às dioxinas. As principais fontes de absorção, via alimentação, são o leite e seus derivados (45%), gorduras (principalmente óleos de peixes) em produtos de origem industrial (22%) e produtos a base de carnes bovina e suína (33%). Através da exposição oral, PCDD's e PCDF's são absorvidos pelo aparelho gastrointestinal sendo altamente dependentes da matriz onde estes se encontram. A absorção

a partir de matrizes oleosas é de 30 a 100% e, quando a matriz é não-biológica, a absorção diminui consideravelmente. Os compostos se acumulam em tecidos com grande quantidade de gordura e o fígado é o principal órgão de armazenamento. A dioxina é considerada pela Agência Internacional de Pesquisa contra o Câncer como uma substância cancerígena (Pereira, 1999; Jacomino et al, 1999).

Das 210 dioxinas, somente 17 são consideradas tóxicas. As que contêm de um a três átomos de cloro não são consideradas como tal. A partir das que possuem quatro, somente as que apresentam o cloro nas posições 2,3,7 e 8 são consideradas tóxicas. A mais tóxica é a 2,3,7,8 Tetracloro-dibenzo-dioxina (TCDD), sendo adotada como substância referência para o cálculo dos fatores de conversão que são mostrados na tabela 3 (OTAN, 1998).

Tabela 3 : Fatores de conversão para dioxinas (PT).

Composto	PT (kg TCDD eq. / kg substância)
Monocloro-dibenzo-dioxina	0
Dicloro-dibenzo-dioxina	0
Tricloro-dibenzo-dioxina	0
2,3,7,8 Tetracloro-dibenzo-dioxina (TCDD)	1
2,3,7,8 Pentacloro-dibenzo-dioxina	0,5
2,3,7,8 Hexacloro-dibenzo-dioxina	0,1
2,3,7,8 Heptacloro-dibenzo-dioxina	0,01
2,3,7,8 Octacloro-dibenzo-dioxina	0,001

Fonte : Pereira, 1999; Jacomino et al, 1999; Otan, 1998.

TOXICIDADE POR RESÍDUOS SÓLIDOS

Para a avaliação da toxicidade dos resíduos sólidos são utilizadas as normas NBR série 10000 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A ABNT editou um conjunto de normas para padronizar, a nível nacional, a classificação dos resíduos :

- NBR 10004 : Resíduos Sólidos - Classificação
- NBR 10005 : Lixiviação de Resíduos - Procedimento
- NBR 10006 : Solubilização de Resíduos - Procedimento
- NBR 10007 : Amostragem de Resíduos - Procedimento

De acordo com a norma NBR 10004 os resíduos sólidos são classificados em:

- Classe I : Perigosos
- Classe II : Não-inertes
- Classe III : Inertes

São classificados como classe I ou perigosos os resíduos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e toxicidade, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento da mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. As listagens 1 e 2 desta norma fornecem uma relação de resíduos sólidos industriais reconhecidamente perigosos.

A propriedade de toxicidade é medida pelo ensaio de lixiviação definido pela norma NBR 10005. Os poluentes no

extrato lixiviado devem apresentar teores de poluentes superiores aos padrões constantes da listagem 7 da norma NBR 10004, para o resíduo ser classificado como perigoso.

O ensaio de lixiviação é essencial para se determinar a periculosidade de um resíduo. Ele é realizado em pH = 5,0 utilizando o ácido acético como retificador de pH. Este procedimento visa simular as condições impostas aos resíduos quando os mesmos são dispostos em lixões, em conjunto com o lixo doméstico, que contém quantidades significativas de matéria orgânica.

O sólido retido deve ser descartado enquanto que o filtrado deve ser estocado a 4° C e analisado para a verificação da toxicidade do resíduo. Os padrões constantes da listagem 7 da norma NBR 10004 são apresentados na tabela 4. Eles são os fatores de conversão para o composto pentaclorofenol equivalente e representam a emissão máxima permitida, sendo utilizados para a avaliação da toxicidade dos resíduos sólidos.

CÁLCULO DO ÍNDICE DE TOXICIDADE

O valor total do indicador de toxicidade (Vt) é calculado pela equação 2 cuja unidade é expressa em kg equivalente.

$$V_t = \sum_{j=1}^m PT_{1,j} \times m_{1,j} \quad (2)$$

onde :

$m_{1,j}$ = massa da substância emitida em kg.

O Índice de Toxicidade de cada tipo de contaminante é calculado dividindo as emissões totais do processo, medidas em Pb equivalente para metais, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) equivalente para compostos carcinogênicos, 2,3,7,8 tetracloro-dibenzo-dioxina (TCDD) equivalente para dioxinas e pentaclorofenol equivalente para resíduos sólidos, pela emissão máxima permitida. O Índice de Toxicidade total (IT) é calculado pela média aritmética dos índices individuais utilizados.

Tabela 4 : Fatores de conversão para resíduos sólidos (PT).

Substância	Emissão máxima permitida (mg/L)
As	5,0
Ba	100,0
Cd	0,5
Pb	5,0
Cr total	5,0
F ⁻	150,0
Hg	0,1
Ag	5,0
Se	1,0
Aldrin	0,003
Clordano	0,03
DDT	0,1
Dieldrin	0,003

Endrin	0,02
Epóxi-heptacloro	0,01
Heptacloro	0,01
Hexaclorobenzeno	0,001
Lindano	0,3
Metoxicloro	3,0
Pentaclorofenol	1,0
Toxafeno	0,5
Organofosforados	10,0
Carbamatos	10,0

Fonte : ABNT – NBR 10004, 1987.

Para o cálculo da toxicidade por metais pesados, deve-se entrar com os dados de emissão para os diversos metais tóxicos. Sugere-se adotar o valor de 0.1 mg/L, que é o valor máximo permitido de emissão definido pela DN nº10 de 16/12/1986 do COPAM-MG para efluentes líquidos. Porém, se não houver um valor para a emissão máxima de chumbo para o ar, sugere-se que se adote o valor de 4,5 mg/Nm³, que é o valor máximo permitido de chumbo definido pela Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos.

Para os compostos carcinogênicos, divide-se os dados de emissão para o ar dos respectivos poluentes pela emissão máxima permitida. Se não houver um valor para uma emissão máxima de HPA para o ar, sugere-se que se adote o valor de 0,02 mg/Nm³, que é o valor máximo permitido de HPA definido pela Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos.

A toxicidade das dioxinas é calculada entrando com os dados de emissão dividindo pela emissão máxima de TCDD para o ar. Sugere-se que se adote o valor de 1ng/Nm³, que é o valor máximo permitido adotado pelos países industrializados.

A toxicidade dos resíduos sólidos é calculada utilizando-se os resultados do ensaio de lixiviação. Eles serão divididos pelos valores máximos admitidos pela norma NBR 10005. Após o cálculo do índice de cada resíduo selecionado, deve-se obrigatoriamente conhecer a geração de cada um. O índice de toxicidade é calculado pela média dos índices individuais de cada resíduo ponderada pela geração.

CONCLUSÕES

A toxicidade expressa os poluentes perigosos dos processos industriais e sua gestão efetiva reflete o compromisso das organizações com a melhoria ambiental contínua. Este trabalho também alerta para o necessário gerenciamento de compostos tóxicos que ainda não têm um controle efetivo em processos industriais, tais como dioxinas, compostos carcinogênicos e metais pesados.

A metodologia desenvolvida neste trabalho serve como subsídio para empresas de variados ramos industriais gerenciarem seus aspectos e impactos ambientais relacionados a compostos tóxicos. O índice de toxicidade de um processo industrial pode ser calculado, pela entrada com os dados de emissão do processo e da emissão máxima permitida, proporcionando alternativas para uma efetiva melhoria dos indicadores ambientais de uma organização, visando ao atendimento às normas da série ISO 14000 de gestão ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GOEDKOOPT, M. et al. **Eco-Indicator 95**; Manual for designers. Nederland : Pré-Consultants, 1995. 33p.

GUINÉE, J. B. et al. **Environmental Life Cycle Assessment**. Draft Backgrounds. Nederland : Leiden University.

October, 1998. 133p.

HAUSCHILD, M. et al. **Environmental assessment of products**; scientific background. London : Chapman & Hall, V. 2. 1998.

HEIJUNGS, R. et al. **Environmental Life Cycle Assessment of products**. Nederland : Leiden University, Centre of Environmental Science, 1992.

SANTOS, L. M. M. **Desenvolvimento de uma metodologia e um software para avaliação ambiental de processos metalúrgicos**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, abril de 2001. 384p.

MENDES, R. et al. **Medicina do trabalho. Doenças profissionais**. São Paulo : Sarvier, 1980. 573p.

DEICHMANN, W. B. et al. **Industrial hygiene and toxicology**. New York : John Wiley & Sons, V. 2, 2 ed., 1962. 2377.

PEREIRA, E. A. C. **Dioxinas e suas implicações na área de redução de minério de ferro**. In: XXX Seminário de Redução de Minério de Ferro da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Belo Horizonte, 29/11 a 01/12 de 2000.

SEPÄLÄ, Jyri. **Decision analysis as a tool for Life Cycle Assessment**. Germany : Ecomed publishers, 1999.

OTAN. **International toxicity equivalency factor method for risk assessment for complex mixtures of dioxins and related compounds**, Repot n° 176, Bruxelas, Bélgica, 1998.

JACOMINO, V. M. F et al. **Dioxina : formação, fontes e emissão**. In: XXX Seminário de Redução de Minério de Ferro da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Belo Horizonte, 29/11 a 01/12 de 2000.

GUINÉE, J. B. et al. **Environmental Life Cycle Assessment**. Draft Backgrounds. Nederland : Leiden University. October, 1998. 133p.

HAUSCHILD, M. & WENZEL, H. **Environmental assessment of products**; methodology, tools and case studies in product development. London : Chapman & Hall, V. 1. 1998.

HEIJUNGS, R. et al. **Environmental Life Cycle Assessment of products**. Nederland : Leiden University, Centre of Environmental Science, 1992.

HUIJBREGTS, M. A. J. **Priority assessment of toxic substances in the frame of LCA**. Nederland, University of Amsterdam : Faculty of Environmental Sciences, 1999.

LINDFORS, V. et al. **Nordic guidelines on Life Cycle Assessment**. Arhus : AKA-PRINT A/S, 1995.