



PCC USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Construção Civil

Vanderley M. John

# **RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL:**

Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade  
de São Paulo para a obtenção  
do Título de Livre Docente.

São Paulo, Fevereiro 2000.

**John, Vanderley M.**

Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000  
113p.

Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Reciclagem. 2. Meio Ambiente. 3. Metodologia. 4. Materiais de construção

Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

A Carina e a Cibele.

# AGRADECIMENTOS

---

Um trabalho técnico-científico é, cada vez mais, uma obra coletiva. Esta tese não seria possível sem o trabalho de orientandos e colegas com os quais tive o privilégio de conviver. A todos os que colaboraram direta ou indiretamente e registro aqui meu agradecimento. Gostaria, no entanto, de destacar a solidariedade e a competência dos meus incansáveis revisores, Aluizio Caldas e Silva, Cibele de Barros, Claudia Oliveira, Paula Ikematsu, Rubiane Antunes e Sérgio Angulo. Os colegas Salah E. Zoorob e Maria Alba Cincotto também colaboraram na revisão.

Parte importante da tese foi escrita durante visita ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Leeds, na Inglaterra em Janeiro e Fevereiro de 2000. Agradeço o apoio dos colegas desse departamento através da pessoa de John Tinker. Esta visita faz parte de um programa de intercâmbio de experiência entre o PCC e aquele departamento, que conta com o suporte da CAPES e do British Council. O intercâmbio revelou-se valioso para o desenvolvimento deste trabalho.

Este trabalho foi financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), através do Programa HABITARE. Os resultados experimentais e as bolsas de estudo de alunos de pós-graduação, no entanto, foram financiados pela FAPESP, Owens Corning, Companhia Siderúrgica de Tubarão, CAPES, CNPq e, mais uma vez, pela FINEP, agora através do Programa FINEP TEC.

# SUMÁRIO

---

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

**CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO..... 1**

**CAPÍTULO 2 CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL..... 5**

**2.1 DESENVOLVIMENTO DESBRAVADOR..... 5**

**2.2 O PARADIGMA ECOLÓGICO..... 6**

**2.3 O DESENVOLVIMENTO INSUSTENTÁVEL..... 7**

2.3.1 AQUECIMENTO GLOBAL..... 7

2.3.2 CONSUMO DE ENERGIA..... 8

2.3.3 DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO..... 8

2.3.4 POLUIÇÃO POR NUTRIENTES..... 8

2.3.5 POLUIÇÃO DO AR E CHUVA ÁCIDA..... 9

2.3.6 CONSUMO DE MATÉRIAS-PRIMAS NÃO RENOVÁVEIS..... 9

2.3.7 GERAÇÃO DE RESÍDUOS..... 10

2.3.8 EXCLUSÃO SOCIAL..... 11

**2.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL..... 12**

**2.5 IMPACTO AMBIENTAL DA CADEIA PRODUTIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL..... 15**

2.5.1 CONSUMO DE RECURSOS NATURAIS..... 15

2.5.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS..... 16

2.5.3 PERDAS E DESPERDÍCIO NA CONSTRUÇÃO CIVIL..... 19

2.5.4 CONSUMO DE ENERGIA..... 20

2.5.5 POLUIÇÃO AMBIENTAL..... 22

2.5.6 POLUIÇÃO DO AR DO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS..... 23

2.5.7 OUTROS..... 24

2.5.8 POLUIÇÃO AMBIENTAL E DURABILIDADE DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL..... 24

**2.6 CONCLUSÃO..... 25**

**CAPÍTULO 3 RECICLAGEM, CONSTRUÇÃO CIVIL E DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL..... 26**

**3.1 CLASSIFICAÇÕES DE RESÍDUOS..... 26**

**3.2 LIMITES DA POLÍTICA HIERÁRQUICA DE GESTÃO DE RESÍDUOS..... 27**

<b>3.3 VANTAGENS POTENCIAIS DA RECICLAGEM .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 POLÍTICAS DE INCENTIVO À RECICLAGEM .....</b>	<b>30</b>
<b>3.5 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS NO BRASIL.....</b>	<b>31</b>
<b>3.6 RECICLAGEM NA CADEIA PRODUTIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....</b>	<b>33</b>
3.6.1 FACILITADORES DA RECICLAGEM NA CADEIA PRODUTIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	34
3.6.2 BARREIRAS DA RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	36
<b>3.7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 4 METODOLOGIA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 IMPORTÂNCIA DA METODOLOGIA .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 POSSIBILIDADES DE EMPREGO DA METODOLOGIA .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3 IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO OS RESÍDUOS DISPONÍVES .....</b>	<b>41</b>
4.3.1 IDENTIFICANDO RESÍDUOS A PARTIR DAS ATIVIDADES INDUSTRIAIS.....	41
4.3.2 ESTIMANDO AS QUANTIDADES.....	42
<b>4.4 SELECIONANDO O RESÍDUO A SER INVESTIGADO .....</b>	<b>42</b>
4.4.1 RISCO DE CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL.....	43
4.4.2 INTERESSE DOS PRODUTORES DO RESÍDUO NA RECICLAGEM.....	44
<b>4.5 DETALHAMENTO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DO PRODUTO.....</b>	<b>45</b>
<b>4.6 CUSTOS ASSOCIADOS AOS RESÍDUOS .....</b>	<b>47</b>
<b>4.7 PROCESSO DE GERAÇÃO, TRATAMENTO E GESTÃO DOS RESÍDUOS .....</b>	<b>48</b>
4.7.1 PROCESSO INDUSTRIAL QUE GERA O RESÍDUO .....	48
4.7.2 MANEJO DO RESÍDUO.....	49
<b>4.8 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....</b>	<b>50</b>
4.8.1 AMOSTRAGEM .....	51
4.8.2 ANÁLISE QUÍMICA .....	52
4.8.3 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA .....	53
4.8.4 CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DO RESÍDUO .....	54
<b>4.9 SELEÇÃO DAS APLICAÇÕES A SEREM DESENVOLVIDAS .....</b>	<b>55</b>
4.9.1 SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS TECNICAMENTE VIÁVEIS.....	56
4.9.2 SELEÇÃO DA(S) ALTERNATIVA(S) PARA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO .....	59
<b>4.10 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO .....</b>	<b>64</b>
<b>4.11 AVALIAÇÃO DO PRODUTO.....</b>	<b>67</b>
4.11.1 A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO .....	67
4.11.2 DURABILIDADE.....	68
<b>4.12 ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL.....</b>	<b>71</b>
4.12.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA .....	72
4.12.2 LIXIVIAÇÃO DE ESPÉCIES QUÍMICAS.....	76
<b>4.13 VIABILIDADE ECONÔMICA .....</b>	<b>81</b>
<b>4.14 TRANSFERÊNCIA DA TECNOLOGIA .....</b>	<b>84</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2-1 Modelo de produção linear (a partir de CURWELL; COOPER, 1998 e CRAVEN <i>et al.</i> , 1996) .....	6
Figura 2-2 – CO <sub>2</sub> na atmosfera: (a) evolução da geração de CO <sub>2</sub> devido à queima de combustíveis fósseis e produção de cimento; (b) variação da concentração atmosférica de CO <sub>2</sub> (CDIAC, 2000) .....	8
Figura 2-3 – Ciclo de produção fechado (adaptado a partir de CURWELL; COOPER, 1998; CRAVEN <i>et al.</i> , 1996).....	14
Figura 2-4 – Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo (BRITO FILHO, 1999).....	19
Figura 2-5 – Evolução histórica da participação da indústria de cimento na geração de mundial de CO <sub>2</sub> . Dados obtidos pelo autor no CDIAC (2000).....	23
Figura 4-1 Variabilidade da composição dos agregados produzidos na central de reciclagem de Ribeirão Preto (ZORDAN, 1997).....	52
Figura 4-2 Exemplo de difração de Raios X de resíduo de serviços de saúde calcinado em tocha de plasma e resfriado lentamente. ....	54
Figura 4-3 Esquema geral para a seleção de alternativas para reciclagem.....	56
Figura 4-4 Combinação de aspectos necessários para garantir o sucesso de uma tecnologia de reciclagem (adaptado a partir de NEMMERS, 1997). ....	59
Figura 4-5 Ganho de valor das cinzas volantes no decorrer dos estágios da sua utilização (CORNELISSEN, 1997).....	61
Figura 4-6 Exemplo de matriz de decisão baseada na metodologia de análise hierárquica.....	63
Figura 4-7 Modelo hipotético de hierarquia para a seleção de alternativas para reciclagem..	64
Figura 4-8 - Comparação entre a resistência à compressão aos 28 dias de concretos com agregado de resíduo de construção (3 amostras) <i>versus</i> concretos contendo agregados naturais. A trabalhabilidade foi mantida constante e foram moldados os traços 1:3, 1:5 e 1:7. ....	65
Figura 4-9 – Expansibilidade de argamassas com agregado de cerâmica produzida pela calcinação de resíduo de serviços de saúde, quando expostas a temperatura de 80°C a uma solução de NaO (ASTM C 1260/94) .....	66

Figura 4-10 Influência dos ativadores e da carbonatação na alcalinidade da água do poro extraída sob alta pressão.....	66
Figura 4-11 – Influência do tipo de cimento e da carbonatação na variação da resistência à tração de feixes de fibras de vidro parcialmente embutidos em pastas de cimento. ....	70
Figura 4-12 Fluxos importantes em cada etapa da ciclo de vida de um produto ou serviço(adaptado de LIPIATI, 1998).....	73
Figura 4-13 – Ciclo de diferentes produtos durante o ciclo de vida e transformações de forma. ....	77
Figura 4-14 –Gráfico Preço x Oferta para resíduos e Preço x Demanda para o novo produto em um mercado competitivo (VRIJLING, 1991) .....	82
Figura 4-15 Determinação do prazo de retorno do investimento a diferentes taxas de retorno para produto com determinado preço líquido de mercado fixo. ....	84



# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2-1– Estimativas da geração de resíduos da construção civil em diferentes países .....	18
Tabela 2-2 Perdas de alguns materiais de construção civil em canteiros brasileiros (%). .....	20
Tabela 2-3 Consumo de energia estimado para a produção de diferentes materiais de construção (COLE; ROUSSEAU, 1992) MJ/ton. ....	21
Tabela 3-1 Redução do impacto ambiental (em %) da reciclagem de resíduos na produção em alguns materiais de construção civil, exceto transporte. ....	29
Tabela 3-2 Número de estabelecimentos que produzem diversos tipos de materiais. A maioria dos dados é oriundo do censo dos EUA de 1987 .....	34
Tabela 4-1 Exemplos de taxas de geração de resíduos industriais (kg resíduo/kg de produto final) para diferentes processos. ....	42
Tabela 4-2 Influência do processo de produção e da matéria-prima na composição de escórias de aciaria Européias (GEISELER, 19996) .....	49
Tabela 4-3 Variabilidade da composição da escória de aciaria (arco elétrico) durante um dia de produção (%). Dados fornecidos pela USIBA (Salvador, BA) .....	52
Tabela 4-4 Alguns resultados do ensaio de lixiviação realizado em resíduos brasileiros. ....	55
Tabela 4-5 Avaliação da potencialidade de reciclagem de agregados em função de alguns parâmetros geográficos. A escala de reciclabilidade varia de 1 a 4, onde 1 identifica localização onde a reciclagem é duvidosa até 4 onde ela é potencialmente lucrativa (LAURITZEN, 1998).....	62
Tabela 4-6 Requisitos do usuário, com base da ISO 6241, com exceção dos apresentados em itálico, que são ampliação proposta pelo autor e JOHN, KRAAYENBRINK & VAN VAMELEN (1996) .....	68
Tabela 4-7 Fatores de degradação segundo a ASTM 632 E .....	71

# RESUMO

---

Este trabalho discute a reciclagem de resíduos como materiais de construção. Partindo do conceito de desenvolvimento sustentável e de suas decorrências para a construção civil, foi elaborada uma proposta de metodologia para conduzir o processo de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia visando a transformação de um resíduo em material de construção.

A reciclagem é uma das condições para atingir o desenvolvimento sustentável. Sob o ponto de vista da cadeia produtiva da construção civil, a reciclagem de resíduos é uma das formas de redução do seu impacto ambiental, um dos maiores na sociedade.

A metodologia compreende as etapas de: (a) seleção do resíduo a ser estudado; (b) levantamento de dados sobre a produção do resíduo; (c) caracterização detalhada do resíduo, do ponto de vista da sua composição química completa, microestrutura e características físicas; (d) inventário das alternativas de reciclagem; (e) seleção da alternativa para pesquisa e desenvolvimento, a partir de aspectos de mercado, meio ambiente, técnicos e sociais; (f) desenvolvimento do produto; (g) avaliação do produto do ponto de vista do seu desempenho técnico e ambiental; (h) estudo da viabilidade econômica e (i) transferência da tecnologia para o mercado.

Em cada etapa, as ferramentas a serem utilizadas são discutidas. Dentre as ferramentas abordadas destacam-se a análise de desempenho, a análise do ciclo de vida e os ensaios de lixiviação. Exemplos de aplicação dos conceitos são fornecidos e necessidades de pesquisas futuras enfatizadas.

# ABSTRACT

---

This work presents a proposal of methodology for conducting multidisciplinary research and development projects aiming at recycle waste as building materials. The proposed methodology is based on the sustainable development Agenda 21 and on the particularities of the construction industry. The methodology includes the consideration of market and social constraints. It starts with the survey of statistics data and other relevant information about the waste. The next stage of the investigation is the development of an inventory on waste generation rates, waste management practices, current applications and their related costs and revenues. Waste characterisation must be comprehensive and include physical, environmental and chemical aspects. It should also include an evaluation of waste variability and the risk of waste contamination from transportation, handling and storage activities. Based on the previous results a broad forecast of potential applications must be developed. The selection of the best application can be carried based either on qualitative environmental and marketing considerations or on very simple rules, like minimisation of the number of industrial steps, reducing transportation distances and energy consumption, etc. Marketing evaluation is a very important step, frequently neglected when choosing the best applications for a particular waste. Other steps are product development and performance evaluation. Environmental evaluation of the new technology is very important because not all recycling is environmentally sound. This evaluation must be based on the life cycle assessment (LCA) and has to consider the environmental benefit of avoiding landfill disposal of the waste and could include leaching or other specific tests or simulations. Also, the technological dissemination phase must be carefully planned and developed.

Each proposed step is discussed, examples are given and needs for further research emphasised.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

Este trabalho tem por objetivo discutir a reciclagem de resíduos como materiais de construção a partir do conceito de desenvolvimento sustentável e propor uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos que contenham resíduos capazes de competir no mercado e contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Certamente a discussão da sustentabilidade do modelo de desenvolvimento criado pela humanidade é uma das principais discussões deste final de século. Ela é resultado de uma longa evolução da percepção de que a ação da raça humana tem causado transformações não previstas na natureza. Temas como aquecimento global, buraco na camada de ozônio, sobre os quais a ciência vem reunindo considerável quantidade de evidências, são exemplos destas conseqüências. Sendo o homem parte da natureza, estas transformações necessariamente afetam a sua qualidade de vida e, talvez, a sobrevivência da espécie. Nenhuma das outras discussões em andamento, como Internet, tem potencial para afetar tão profundamente a vida em geral e a engenharia civil em particular quanto a sustentabilidade. A contextualização deste tema para a construção civil é realizada no Capítulo 2.

A reciclagem é uma atividade que razões de ordem prática e econômica vem motivado desde a antigüidade. Atualmente a busca por um modelo de desenvolvimento sustentável, pode adicionar uma nova dimensão para a reciclagem. A demonstração da importância potencial da reciclagem, a discussão dos limites de sua contribuição para o desenvolvimento sustentável, das condições que a reciclagem precisa atender para colaborar no desenvolvimento sustentável e do papel da construção civil neste processo são objeto do Capítulo 3.

Estabelecida a importância do tema para o desenvolvimento sustentável e os seus condicionantes, no Capítulo 4 é apresentada uma proposta de metodologia sistêmica para pesquisa e desenvolvimento de produtos a partir de resíduos. Resultados de pesquisas desenvolvidas com a participação ou coordenação do autor, aliados a revisão bibliográfica em cada tema, servem de suporte para a metodologia proposta. A orientação de trabalhos de mestrado e doutorado forneceu boa parte dos dados aqui utilizados. Os trabalhos de Ailton Dias (mestrado, reciclagem de lodo de esgoto), Alexandre T. Machado (mestrado, reciclagem de escória de aciaria), Andréa Romando do Santos (iniciação científica, reciclagem de vidro como agregado), Fabrício M. Gomes (iniciação científica, reciclagem de cerâmica produzida por queima do lixo de serviços de saúde), Juliana de Carvalho (mestrado, metodologia de análise do ciclo de vida), Sérgio Cirelli Angulo (mestrado, reciclagem de resíduo de

construção e demolição) e Sérgio E. Zordan (doutorado, metodologia de seleção de alternativas para reciclagem) são os diretamente envolvidos no tema. Outra parte substancial do trabalho é oriundo de projeto de desenvolvimento de um compósito de cimento de escória reforçados com fibras de vidro E, coordenado pelo Prof. Dr. Vahan Agopyan do qual o autor participa. Deste projeto desenvolvem ou desenvolveram pesquisas de pós-graduação Maristela Gomes da Silva e Cláudia Oliveira – ambas sob orientação do Prof. Dr. Vahan Agopyan e Vanessa Gomes da Silva, sob orientação do autor, além de um grande número de bolsistas e estagiários.

Com o lançamento pelo governo Federal em 1999 do PBR (Programa Brasileiro de Reciclagem) espera-se que se iniciem políticas consistentes para promover um aproveitamento ambientalmente correto destes resíduos.

A recente discussão na imprensa brasileira do problema ambiental internacional causado pela reciclagem da cal residual produzida pela Solvay é uma demonstração da necessidade da metodologia de pesquisa e desenvolvimento que inclua os aspectos ambientais. Na verdade, como será demonstrado no decorrer do trabalho, o desenvolvimento de técnicas de reciclagem que combinem desempenho técnico com proteção ao meio ambiente é tarefa complexa e multidisciplinar. Do ponto de vista da engenharia ela exige a integração de conceitos relativamente novos como análise do ciclo de vida, estudo da durabilidade em longo prazo, análise de risco de contaminação ambiental por ensaios de lixiviação e aplicação de ciências a materiais novos e de complexidade inaudita. A integração destes conceitos e destas equipes multidisciplinares vai exigir metodologia genérica que sirva de linguagem comum, defina claramente as interfaces entre os diferentes atores.

A metodologia aqui proposta já possui condições para aplicação, mas não pode ser considerada uma proposta acabada, pois o atual estágio do conhecimento em muitos temas é limitado. Adicionalmente, dado o caráter multidisciplinar do tema, aspectos cuja área de especialização estão muito fora da área do autor são abordados apenas em seus conceitos fundamentais. O seu aprofundamento necessariamente será uma tarefa coletiva. O autor está tomando a iniciativa de propor à ISCOWA (The International Society for the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials), associação científica voltada a discussão da reciclagem de resíduo no âmbito da construção civil, a criação de um grupo de trabalho sobre o tema, da qual o autor é membro.

As pesquisas de reciclagem de resíduos como materiais de construção tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos. Desde 1991 a ISCOWA promove a cada três anos sua conferência internacional, denominada WASCON – Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials. Os anais destas conferências, publicados pela prestigiada editora científica Elsevier dentro da série “Studies on Environmental Science”, se constituem hoje na principal fonte de informações de aspectos metodológicos e também de resultados sobre resíduos específicos. A revista Waste

Management, vem se dedicando cada vez mais a aspectos de reciclagem de resíduos. O número de artigos que tratam da incorporação de resíduos em produtos a base de cimento tem crescido visivelmente em revistas como a *Cement and Concrete*.

Órgãos internacionais como a OECD, Comunidade Européia e Banco Mundial tem desenvolvido estudos prospectivos e elaborado propostas concretas visando incentivar a reciclagem.

A liderança das pesquisa sobre reciclagem esta na Europa, muito provavelmente na Holanda. Neste país as atividades de pesquisa e desenvolvimento na área de reciclagem romperam as barreiras das universidades, como a Delft University of Technology e a Rutgers University, e institutos de pesquisa como o TNO, tendo se convertido em negócio para significativo número de empresas privadas, que executam atividades de pesquisa e desenvolvimento, sendo responsáveis por grande número de publicações. Os países da Escandinávia, Alemanha, França, Inglaterra e Japão, este último especialmente na área de desenvolvimento de tecnologias de processo, também merecem destaque.

No Brasil o pioneirismo na pesquisa sobre reciclagem cabe a Profa. Dra. Maria Alba Cincotto, que iniciou os trabalhos nos anos 80, ainda no IPT, investigando aglomerantes. A primeira atividade do grupo de Resíduos da ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – que congrega os pesquisadores da área, foi um *Workshop*, coordenado pelo autor, organizado pelo coordenado pelo autor, no qual foram apresentados 20 trabalhos de pesquisadores brasileiros de 10 organizações de diferentes regiões do Brasil. Os grupos de pesquisa mais ativos na área de materiais são o do PCC USP, NORIE-UFRGS, NPC-UFSC, UFSM e CIENTEC-RS. No Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON) o grupo de trabalho de Meio Ambiente tem concentrado suas atenções em reciclagem. Parte significativa da pesquisa nacional tem sido promovida a partir de um edital do Programa Habitar de financiamento à pesquisa na área de Habitação, coordenado para a FINEP que possui linha de financiamento específica para a área de reciclagem.

Dentro do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP também cresce o número de pesquisas nos diferentes aspectos do tema reciclagem de resíduos na construção civil. Atualmente, além do autor, estão ativos no tema Professores Doutores Vahan Agopyan, Paulo Helene, Maria Alba Cincotto e Silvia M. S. Selmo. Atualmente estão em desenvolvimento mais de dez trabalhos de mestrado e doutorado diretamente relacionados com o tema de reciclagem. Outros departamentos da escola, como o de Materiais são também ativos no tema.

Esta tese é em grande parte produto do financiamento obtido pelo autor junto ao Programa Habitar para o desenvolvimento do estado-da-arte, banco de dados disponível na Internet ([www.reciclagem.pcc.usp.br](http://www.reciclagem.pcc.usp.br)) e metodologia de pesquisa e desenvolvimento. No entanto o envolvimento do autor com o tema de reciclagem iniciou-se em 1988 no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, onde trabalhou no desenvolvimento de um sistema de painéis

utilizando cimento de escória de alto forno – um resíduo, reforçado com fibras vegetais. Muitos dos conceitos que estruturam a metodologia proposta nesta tese foram delineados pelo colega Vahan Agopyan, que concebeu e dirigiu este projeto. Estas idéias foram a seguir aprofundadas no projeto de tese de doutorado realizado sob orientação da Colega Maria Alba Cincotto.

## CAPÍTULO 2

# CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

---

### 2.1 DESENVOLVIMENTO DESBRAVADOR

Na origem da sociedade industrial, o desenvolvimento econômico tem significado a transformação da natureza de maneira a melhorar a qualidade de vida da parcela da população beneficiada. Dentro desta sociedade a função da construção civil é a transformação do ambiente natural no ambiente construído, adequado ao desenvolvimento das mais diversas atividades. Esta sociedade é orientada pelo paradigma “*desbravador*” (LIDDLE, 1994), segundo o qual existe uma contraposição entre o meio ambiente e o desenvolvimento. A defesa do meio ambiente é vista como antidesenvolvimentista.

Esta cultura desbravadora está associada a um modelo de produção *modelo linear* (CURWELL COOPER, 1998): bens são concebidos, projetados, construídos, utilizados e, após sua vida útil, são acumulados no meio ambiente – ar, água, ou depósitos de lixo, juntamente com os resíduos do processo de produção. Isto é válido tanto para bens de consumo não durável e produtos descartáveis, quanto para edifícios e estradas. A lógica implícita nesta cultura industrial é que a quantidade de recursos naturais disponíveis é em termos práticos infinita e que a natureza é capaz de absorver ilimitadas quantidades de resíduos (LIDDLE, 1994). A Figura 2-1 resume graficamente este modelo.

Neste paradigma a preservação do ambiente esteve associada à criação de reservas de proteção, limitação da caça, comércio, como estabelecido na Convenção para a Preservação da Fauna e Flora em seu Estado Natural, de 1933 (THE FLETCHER SCHOOL, 2000).

---

<sup>1</sup> No original como *frontierism*, derivado de fronteira.



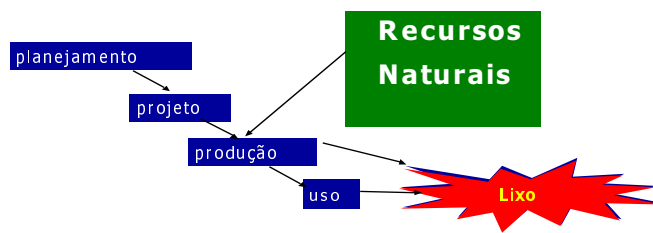


Figura 2-1 Modelo de produção linear (a partir de CURWELL; COOPER, 1998 e CRAVEN *et al.*, 1996)

## 2.2 O PARADIGMA ECOLÓGICO

A percepção das implicações ambientais do paradigma desbravador é geralmente associada com a publicação do livro *Silent Spring* de Rachel Carson, que destaca os efeitos adversos das alterações descontroladas do meio ambiente sobre a vida humana (LIDDLE, 1994). No entanto, outros autores como HILL e BOWEN (1997) apontam outras fontes, como os livros de LEOPOLD (1949) e o de CARSON (1962). A partir da percepção dos efeitos das alterações do meio ambiente sobre o homem (e a natureza em geral) desenvolve-se o que LIDDLE chama de paradigma *ecológico*<sup>2</sup> e HILL e BOWEN (1997) chamam de *preservacionista*.

Neste novo paradigma, a natureza é vista como tendo valor em si e estabelecem-se limites para a poluição gerada no processo de produção. A preservação ambiental é vista, principalmente, como a proteção do meio ambiente (flora e fauna) natural. O desenvolvimento ainda é visto em grande medida como algo contraditório a preservação ambiental (LIDDLE, 1994), o que poderia se chamar de um mal necessário.

A consolidação deste paradigma na sociedade levou a uma crescente regulamentação ambiental visando o controle de poluição e a ações mais amplas de proteção da natureza. A preocupação com deposição de resíduos, industriais ou de pós-consumo concentra-se principalmente no desenvolvimento de técnicas de deposição adequadas e de remediação de locais e cursos de água contaminada por poluentes. Trata-se de uma visão de melhoria da qualidade ambiental como resultado do controle. Fundamentalmente a forma de produção linear não é questionada. Praticamente todos os processos industriais são considerados aceitáveis, desde que os índices de poluição estejam dentro dos limites estabelecidos. Estes limites levaram ao surgimento da engenharia *end-of-pipe* (LINDSEY; CAMPBELL, 1991), especializada no tratamento dos resíduos.

É interessante notar que nesta abordagem as atividades de canteiro da construção civil não sofrem controle, exceto no que toca ao ruído. O resíduo de construção civil é considerado inerte por uma exceção ao procedimento geral da norma brasileira de

<sup>2</sup> No original como *environmentalism*.

resíduos, NBR 10004. Assim, para a construção civil, esta nova forma de ver o mundo significou oportunidades de negócios como a construção de aterros sanitários e estações de tratamento (LIDDLE, 1994). O início da preocupação ambiental como resultado das atividades de construção civil, foi resultado da crise de energia da década de 1970, que levou os países de clima frio a regulamentar as tecnologias construtivas de forma a permitir uma redução no consumo energético na fase de uso dos edifícios (KILBERT, 1994).

## **2.3 O DESENVOLVIMENTO INSUSTENTÁVEL**

No entanto, o crescimento da economia mundial, cujo tamanho quintuplicou entre 1950 e 1999, aliado ao crescimento da população, que passou de pouco mais de 2,5 bilhões em 1950 para quase 6 bilhões em 1999 (UNEP, 1999) e aos avanços na compreensão científica do funcionamento do planeta, tornaram evidente a não sustentabilidade do modelo linear de produção e do paradigma ecológico.

### **2.3.1 Aquecimento global**

O *aquecimento global*, também conhecido como efeito estufa, é resultado do acúmulo de gases capazes de absorver radiação infravermelha na atmosfera (UNEP, 1999b). O CO<sub>2</sub> é considerado o principal gás do efeito estufa, mas outros gases como o metano, CFCs, ozônio e os aerossóis também contribuem para o aquecimento. A produção do CO<sub>2</sub>, e o crescimento da sua concentração na atmosfera, é produto principalmente da queima de combustíveis fósseis, vem crescendo de forma exponencial, aliada com a redução da área de florestas. Dados do Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC, 2000) mostram que atualmente são gerados cerca de 7 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano (Figura 2-2). A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera vem crescendo exponencialmente, sendo que estudos de gás aprisionado em geleiras indicam que por volta de 1800 a concentração era de aproximadamente 280 ppm e que atualmente em Mauna Leoa (Havaí) a concentração encontra-se acima de 350 ppm. O que é mais significativo é que mais da metade deste crescimento ocorreu nos últimos 40 anos.

Embora não exista consenso sobre a gravidade das consequências do efeito estufa, existem poucas dúvidas de que ele esteja ocorrendo. Dentre os prováveis efeitos do aquecimento global dois tem interesse mais próximo da construção civil: a dissolução da calota polar que levará ao aumento do nível dos oceanos, e o aumento da velocidade máxima dos ventos (HAYASHI, 2000).

### 2.3.2 Consumo de energia

O efeito do *consumo de energia* no aquecimento global é um dos motivos mais importantes para as políticas de redução do consumo de energia (IEA, 1999), devido a utilização de termoelétricas como principal fonte geradora de energia. Segundo dados do WRI (1999), em 1995 62% da energia elétrica mundial era gerada por usinas termoelétricas. No Brasil, a energia elétrica é obtida em sua grande maioria através de tecnologia hidroelétrica, portanto sem a geração imediata de CO<sub>2</sub>. No entanto, este tipo de tecnologia gera outros tipos de impacto ambiental como a transformação de grandes regiões de florestas em lagos artificiais, influenciando no ciclo global do carbono.

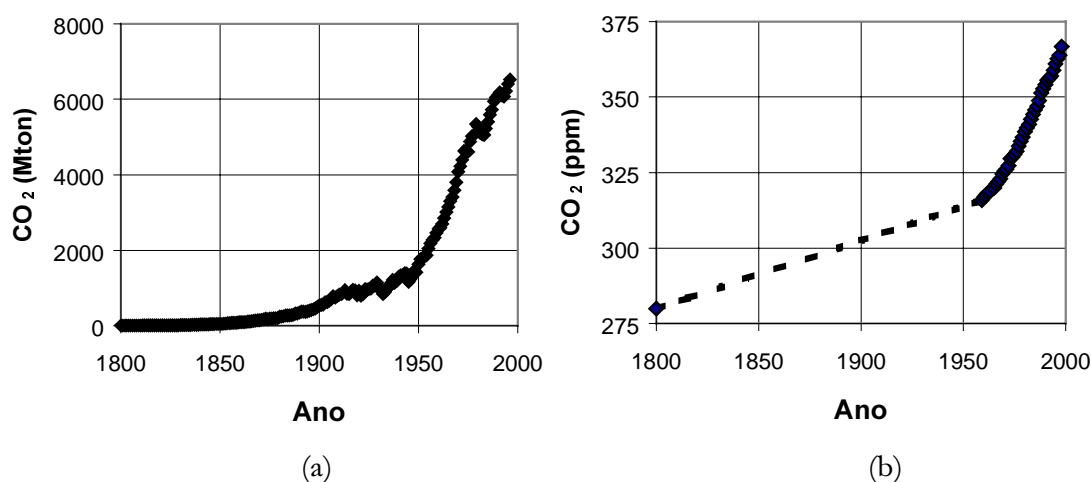


Figura 2-2 – CO<sub>2</sub> na atmosfera: (a) evolução da geração de CO<sub>2</sub> devido à queima de combustíveis fósseis e produção de cimento; (b) variação da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> (CDIAC, 2000)

### 2.3.3 Destruição da camada de ozônio

A destruição da *camada de ozônio* na estratosfera provoca o aumento da radiação UV-B expondo as pessoas ao câncer de pele. Esta destruição ocorre por um conjunto de gases denominados genericamente carbono-halogenados, contendo carbono, cloro e flúor. O exemplo mais conhecido são os CFCs (cloro-fluor-carbono) gases utilizados em refrigeradores e como propelentes de aerossóis (ENNIS, 1998).

### 2.3.4 Poluição por nutrientes<sup>3</sup>

O uso intensivo de fertilizantes e a queima de combustíveis fósseis têm levado a poluição por nutrientes, a elevação descontrolada do volume de nutrientes, que dobrou devido às atividades humanas. O aumento da concentração de nutrientes como o nitrogênio,

<sup>3</sup> Em inglês, *nitrification* ou, as vezes, *nitrification*, devido a importância do nitrogênio no processo.

fósforo e potássio tem inúmeros efeitos. Estes compostos podem facilitar o crescimento descontrolado de algumas espécies, rompendo o equilíbrio do ecossistema. O crescimento de algas pode, adicionalmente, levar a contaminação de cursos de água. O nitrogênio também está associado à chuva ácida e contribui para a geração do ozônio de baixa altitude, um dos principais problemas ambientais nas grandes cidades (UNEP, 1999, LIPIATTI, 1998).

### **2.3.5 Poluição do ar e chuva ácida**

Outros poluentes do ar como SO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, CO e material particulado trazem problemas de saúde, especialmente no sistema respiratório já quantificados em estudos epidemiológicos (STEDMAN *et al.*, 1999). O SO<sub>2</sub>, por exemplo, está também associado à chuva ácida, que provoca danos em florestas, entre outros.

Somem-se a estes a produção de elementos radioativos para finalidades diversas, a criação involuntária de substâncias orgânicas perigosas e biopersistentes, como a dioxina (RITTER *et al.*, 1995), que representam ameaça para a população.

### **2.3.6 Consumo de matérias-primas não renováveis**

O consumo de materiais naturais cresce na mesma medida do crescimento da economia e da população. O Japão estimou seu consumo de materiais (prontos para manufatura) em 2,6 bilhões de toneladas de materiais em 1995 (KASAI, 1998), cerca de 18,7 ton/hab.ano. Nos Estados Unidos o consumo de total de materiais cresceu mais 5 vezes entre 1900 e 1995, atingindo 2,8 bilhões de toneladas, cerca de 10 toneladas/hab.ano (MATOS; WAGNER, 1999). Neste mesmo período a participação de matérias primas renováveis foi reduzido de 40% para 8% do total (MATOS; WAGNER, 1999). Segundo estes autores, somente entre os anos de 1970 e 1995 o consumo de materiais no mundo cresceu de 5,7 bilhões de toneladas para 9,5 bilhões de toneladas, um pouco mais 1,6 ton/hab.ano.

A produção destes volumes imensos de materiais exige uma extração muito maior de matérias primas naturais, dada às perdas e resíduos dos processos. O WRI<sup>4</sup> (2000) cita estudo realizado por ADRIAANSE *et al.* (1977), que estima que países industrializados como Alemanha, Japão e Estados Unidos consomem entre 45 a 85 ton/hab.ano de matérias primas naturais, sem incluir água e ar.

As reservas de muitos materiais já começam a ficar escassas, especialmente junto aos grandes centros. As reservas potenciais de cobre, por exemplo, devem durar aproximadamente 105 anos e as de zinco entre 170 e 200 anos. Já as reservas de cobre

---

<sup>4</sup> WRI World Resources Institute.

atualmente demarcadas deverão durar apenas 40 enquanto que as de zinco cerca de 100 anos (DZIOUBINSKI; CHIPMAN, 1999). Além do risco de serem esgotadas as reservas mais convenientes de recursos naturais, a atividade extrativa, destrói a paisagem, prejudica flora e fauna.

### **2.3.7 Geração de resíduos**

O *volume de resíduos* gerado é outro problema. Estatísticas de resíduos são mais limitadas e a ausência de classificação padronizada dificulta comparações mais precisas.

Na Europa, a geração de lixo doméstico ou lixo sólido municipal varia entre 296 a 631 kg/hab.ano (FRANGIPANE *et al.*, 1999). No Brasil, a CETESB estima que o volume de resíduos sólidos domiciliares em cidades de mais de 500 mil habitantes é de 0,7 kg/hab.dia, ou de 255 kg/hab.ano (CETESB, 1999). No Canadá, o resíduo sólido municipal é estimado em 460kg/hab.ano em 1996 (STATISTICS CANADA, 1999). Nos EUA a EPA (1996) avalia que no ano 1993 foram produzidos em 207 milhões de toneladas de lixo sólido municipal, cerca de 2,5 vezes mais que em 1960, atingindo 720 kg/hab. ano.

No entanto apesar de ser certamente o mais visível, o resíduo sólido municipal é a menor parte do volume de resíduos gerados. Estatísticas sobre o total de resíduos gerados são raras, e de certo ainda menos precisas. ALLEN e ROSSELOT (1994), a partir de fontes diversas estimam que os EUA geraram em 1986 12 bilhões de toneladas (base úmida) de resíduos não agrícolas, enquanto CORSON (1996) estimou em 10 bilhões de toneladas. Admitindo uma população de 248 milhões de habitantes<sup>5</sup> a primeira estimativa resulta em 56 ton/hab.ano, cerca de 5 vezes o consumo anual estimado de materiais. Na Holanda a geração total de resíduos em 1991 foi estimada em 60 milhões de toneladas, cerca de 4,3ton/hab.ano, e apenas 374kg (8,8%) deste total foi de lixo sólido municipal (DELSEMAN, 1991). É importante observar que a soma das estimativas de resíduos com a de materiais consumidos é compatível com o de consumo de materiais naturais do WRI (1999). No entanto, a discrepância entre o volume *per capita* gerado na Holanda e Estados Unidos – países desenvolvidos – pode ter diversas razões, como a diferença na estruturação da economia. Por exemplo, do total de resíduos estimado por ALLEN e ROSSELET (1994) cerca de 35% (4 bilhões de toneladas) correspondem a resíduos de mineração e extração de petróleo, atividades que são menos desenvolvidas na Holanda, o que justifica pelo menos em parte o menor índice *per capita* do último.

---

<sup>5</sup> Estimada a partir dos dados da população de 1998 (273754 milhões) e do incremento médio anual na população entre 1995-2000 (2142 milhões) e 1985-1990 (2450 milhões), conforme dados do WRI (199) p.243.

Poucos dados estão disponíveis sobre o volume de resíduos gerados no Brasil, destacando-se o inventário de resíduos elaborado pela CETESB no Estado de São Paulo, que estimou uma geração de 26 milhões de toneladas anuais de resíduos não inertes e perigosos.

Os resíduos considerados perigosos pelas diferentes legislações nacionais também apresentam estatísticas mais frequentes, mas as estimativas são igualmente variáveis, inclusive porque a classificação varia. Segundo a EPA (1999), os EUA produziram em 1991 cerca de 289 milhões de toneladas de resíduos classificados como perigosos. Para ALLEN e ROSSELOT (1994), os resíduos perigosos representam menos de 10% do total gerado, que ele estima em 0,75 milhões, bem acima da estimativa da EPA de 289 milhões de toneladas em 1994. No Canadá os resíduos perigosos foram cerca de 4,3% dos resíduos tratados em 1996.

Um dos problemas que agrava a questão do volume de resíduos é o encarecimento dos processos de tratamento e deposição (THE ECONOMIST, 1993), especialmente dos resíduos classificados como perigosos. Este encarecimento é devido a dois fatores: (a) concentração em torno de grandes cidades, onde as áreas para deposição são escassas e a recusa da população em aceitar um depósito de lixo em sua vizinhança tem ainda as tornado mais raras; (b) as crescentes exigências técnicas para tratamento e deposição (JOHN, 1999).

### **2.3.8 Exclusão social**

O atual modelo de desenvolvimento é mais sustentável devido à exclusão social. Boa parte da população está excluída deste crescimento, pois cerca de 25% da população sobrevive com vivendo com menos de US\$360/ano (UNEP, 1999), para uma renda per capita média superior aos US\$5000 anuais (2,6 vezes a de 1950 em termos reais). O padrão de consumo dos EUA é certamente aspiração de boa parte da humanidade e pode ser tomado como referência do que aconteceria se o modelo deste país fosse generalizado. Apesar de contar com apenas 4,6% da população mundial (WRI, 1999) os EUA consomem cerca de 30 % dos recursos naturais extraídos (MATOS; WAGNER, 1999), 20% da energia (WRI, 1999), e são responsáveis por 24% da emissão de CO<sub>2</sub> (CDIAC, 2000).

Admitindo-se os números acima, a generalização deste modelo para os demais habitantes do planeta, implicaria em um aumento de 6,5 vezes no volume de extração de matérias primas, 4,5 vezes o consumo de energia e 5,2 vezes a liberação de CO<sub>2</sub>. Se com os atuais níveis de consumo os efeitos no planeta começam a ser mensuráveis é evidente que a generalização deste padrão de desenvolvimento para todo o mundo não é sustentável, mesmo adotando-se uma versão rígida do paradigma *ecologista*.

## 2.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A formulação do conceito de desenvolvimento sustentável é geralmente atribuída a Brundtland Commission da Organização das Nações Unidas, que produziu o relatório denominado “Nosso futuro comum” (DESIMONE; POPOFF, 1997; KILBERT, 1994, HILL *et al.*, 1994; HILL; BOWEN, 1997). No entanto, este documento é resultado evolutivo de uma série de trabalhos internacionais anteriores, como a Conferência de Estocolmo, da ONU, em 1982 e do Clube de Roma que publicou em 1980 o texto “Limites do Crescimento” (HILL *et al.*, 1994).

A Conferência sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente das Nações Unidas (Rio 92) consolida através da AGENDA 21 a visão de que desenvolvimento sustentável não apenas demanda a preservação dos recursos naturais de maneira a garantir para as gerações futuras iguais condições de desenvolvimento – a igualdade entre gerações - mas também uma maior equidade no acesso aos benefícios do desenvolvimento – a igualdade intrageração (LIDDLE, 1994; ONU, 1992).

Assim, desenvolvimento sustentável pode ser definido como aquele que “permite atender às necessidades básicas de *toda* a população e garante a todos a oportunidade de satisfazer suas aspirações para uma vida melhor sem, no entanto, comprometer a habilidade das gerações futuras atenderem suas próprias necessidades.” (CHEN; CHAMBERS, 1999). Ou ainda, o desenvolvimento que “garante uma melhor qualidade de vida para *todos*, tanto hoje quanto para as gerações futuras” (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS, 1998).

O que o conceito significa em termos práticos é assunto polêmico por diversas razões. Em primeiro lugar, existe uma contradição semântica: sustentável implica em algo que possa ser mantido indefinidamente; o que contradiz o conceito de desenvolvimento, que implica em transformação (HILL *et al.*, 1994), especialmente quanto transformamos recursos não renováveis (HILL; BOWEN, 1997). Deve-se observar, no entanto, que esta contradição não pode ser considerada absoluta, uma vez que transformações também são inerentes ao mundo natural, como demonstram os ciclos climáticos com as eras glaciais e a evolução das espécies. (Estas transformações naturais podem ser mais lentas que as imprimidas pela ação humana). Em segundo lugar, não se conhecem as reais necessidades das gerações futuras, embora possamos assumir que necessitarão de recursos naturais em geral.

Independente de seu significado preciso ou de sua exequibilidade total, o paradigma de desenvolvimento sustentável certamente vai implicar na produção de uma maior quantidade de bens com uma menor quantidade de recursos naturais e menor poluição<sup>6</sup>.

Do ponto de vista físico, o desenvolvimento sustentável vai exigir a “*desvinculação*” entre o desenvolvimento (ou crescimento) e a geração de impactos ambientais (JANSSEN; VAN DER BERGH, 1999)<sup>7</sup>. Esta desvinculação entre a geração de riquezas e a produção de bens materiais deve incluir simultaneamente várias ações. A “*desmaterialização*” da produção, ou seja, redução do consumo de materiais e matérias-primas naturais para a produção de um mesmo bem. Este objetivo pode ser atingido pela redução e reciclagem dos resíduos, aperfeiçoamentos dos projetos, substituição dos materiais tradicionais por outros mais eficientes e até pelo aumento da durabilidade dos produtos (BROWN *et al.*, 1998). Além desta ação, são também condições para o desenvolvimento sustentável redução do consumo de energia, especialmente a produzida pela queima de combustíveis não renováveis e a redução global da poluição gerada, incluindo resíduos. Tudo isto combinado a uma distribuição mais igualitária dos benefícios do desenvolvimento.

A meta de desenvolvimento sustentável exigirá ações coordenadas tanto no nível macro (global, regional, nacional, local, setores empresariais), como no nível micro (empresas e consumidores individuais). Ela certamente implica não apenas em mudanças tecnológicas, mas também nas formas de relação entre nações e na cultura, pois os padrões de consumo certamente deverão mudar. Por esta razão, a necessidade de ampla participação social no processo, aliada a educação ambiental foi enfatizada na Agenda 21 (ONU, 1992).

A implantação deste novo paradigma de produção está propiciando o desenvolvimento de várias ferramentas de ação. A construção de indicadores de sustentabilidade a nível local, regional, nacional e global (OECD, 1993), como emissões totais de CO<sub>2</sub>, é fundamental. Conceitos como o da “*análise do ciclo de vida*” (ACV), estudos do fluxo de materiais, análises de “*metabolismo industrial*”, análise *input-output* entre outros (ALLEN; ROSSELOT, 1994; LEACH *et al.*, 1997; HENDRICKSON; HARVOATH, 2000) estão ganhando popularidade. Estas ferramentas são em última instância uma análise sistêmica dos processos e seus impactos ambientais (LEACH *et al.*, 1997).

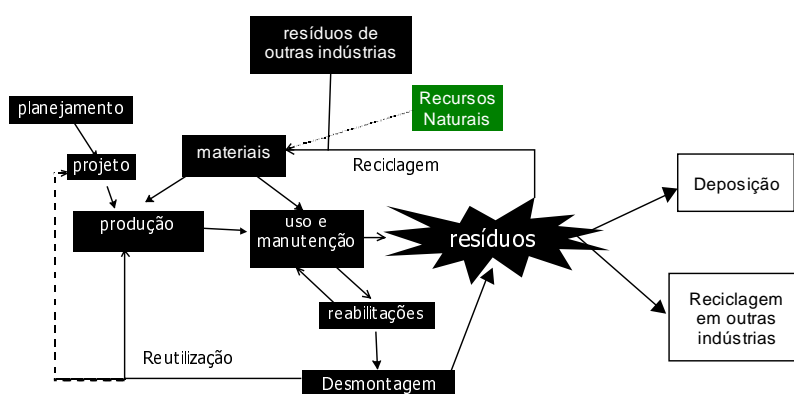
---

<sup>6</sup> Algumas formulações como produzir o dobro de benefícios sociais utilizando metade de materiais e energia tem sido propostas, mas constituem-se provavelmente em bom moto de propaganda (JANSSEN, VAN DER BERGH, [1999]).

<sup>7</sup> É interessante notar que apesar do crescimento econômico estar baseado atualmente - no que se poderia chamar de *produção virtual* - no setor de serviços o seu *produto* só é útil na medida que exista uma quantidade mínima de bens materiais, como estradas, alimentos, transporte, habitações e escritórios. Ou seja, a área de serviços pode ser a mais importante da economia, mas, *per si*, ela nunca será suficiente.



Assim, os desafios desta nova visão de desenvolvimento são, simultaneamente, o crescimento econômico, com preservação da natureza e justiça social. Este novo paradigma questiona padrões de produção e consumo. Conseqüentemente o modelo de linear de produção deve ser substituído por um modelo mais eficiente no aproveitamento dos recursos investidos. Este modelo é definido como de ciclo fechado<sup>8</sup> (CURWELL; COOPER, 1998) ou modelo cíclico de produção e consumo (CRAVEN *et al.*, 1996). Neste modelo a utilização de todos os recursos empregados é otimizada e a geração de resíduos reduzida a um mínimo reciclável. A Figura 2-3 apresenta uma adaptação do modelo de ciclo fechado ao caso da construção civil. Neste novo modelo os produtos, além apresentarem desempenho ambiental adequado durante a sua vida útil, não são mais projetados para serem destinados a aterros ao final de suas vidas úteis. Eles deverão ser projetados e construídos de forma a facilitar operações de reabilitação ou reformas<sup>9</sup>, e até mesmo desmontagem com reutilização dos componentes em outros produtos. Somente quando estas não forem mais possíveis, após a desmontagem os componentes serão destinados a operações de reciclagem, minimizando a deposição em aterros e o consumo de recursos naturais. O processo vai exigir uma ampliação da vida útil dos componentes, já que estão previstas várias reutilizações. Embora possa parecer surpreendente, esta abordagem já esta sendo empregada pelas grandes indústrias como Xerox (CURWELL; COOPER, 1998).



**Figura 2-3 – Ciclo de produção fechado (adaptado a partir de CURWELL; COOPER, 1998; CRAVEN *et al.*, 1996)**

Provavelmente o ciclo nunca chegará a ser totalmente fechado, pois perdas nos processos são inevitáveis. Além disso, o número de reciclagens que um produto pode

<sup>8</sup> Em inglês *closed loop*.

<sup>9</sup> Algumas vezes também chamados de *retrofit*.

sofrer, com algumas exceções como as dos metais, não poderá ser infinita, pois existe sempre uma degradação efetiva na maioria dos processos. No entanto, este modelo permitirá avanços significativos na busca do desenvolvimento sustentável.

## **2.5 IMPACTO AMBIENTAL DA CADEIA PRODUTIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

A cadeia produtiva da construção civil (o dito *construbusiness*) é um superior a 14,5% do PIB brasileiro (FIESP, 1999). Este tamanho reflete o papel gigantesco que o setor tem em proporcionar um ambiente construído adequado para *toda* a raça humana e suas complexas atividades econômicas. É fácil observar que praticamente nenhuma atividade humana prescinde de um ambiente construído adequado, com maior ou menor sofisticação: todos os edifícios e suas conexões viárias, hidráulicas e elétricas são, em maior ou menor grau, um produto da construção civil. A construção civil está presente em todas as regiões do planeta ocupadas pelo homem, na cidade ou no campo e até mesmo entre povos da floresta.

De maneira geral o impacto ambiental da construção civil é proporcional a sua tarefa social.

### **2.5.1 Consumo de recursos naturais**

Além do macro-setor ser um dos maiores da economia ele produz os bens de maiores dimensões físicas do planeta, sendo conseqüentemente o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia.

O consumo de recursos naturais na construção civil em determinada região depende de fatores como: (a) taxa de resíduos gerados; (b) vida útil ou taxa de reposição das estruturas construídas; (c) necessidades de manutenção, inclusive as manutenções que visam corrigir falhas construtivas; (d) perdas incorporados nos edifícios; (e) da tecnologia empregada.

Estimativas precisas são difíceis de serem realizadas. Para SJÖSTRÖM (1996), a construção civil consome entre 14% e 50% dos recursos naturais extraídos no planeta. No Japão, estimou-se que a construção civil consumiu em 1995 cerca de 50% dos materiais que circulam na economia (KASAI, 1998). Este valor permite estimar um consumo de 9,4 ton/hab.ano de materiais de construção. O DETR (1998), estima que a construção do Reino Unido consome cerca de 6 ton/hab.ano e 250 a 300 milhões de toneladas/ano de agregados. Já para MATOS e WAGNER (1999), o consumo de agregados para construção civil nos EUA é de cerca de 7,5 ton/hab.ano. O consumo anual de mais de 2 bilhões de toneladas representa cerca de 75% dos materiais consumidos na economia norte-americana.

No Brasil, como sempre, as estatísticas são escassas. Considerando que no Brasil são produzidas aproximadamente 35 milhões de toneladas de cimento Portland por ano. Assumindo que este cimento é misturado com agregados a um traço médio de 1:6, em massa, pode-se estimar um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas. A este valor é necessário somar o volume de agregados utilizados em pavimentação e as perdas.

No caso da madeira, estima-se que entre 26% (WRI, 2000b) e 50% (CONSTRUCTION & ENVIRONMENT, 1996) da madeira extraída no mundo seja consumida como material de construção e 50% seja utilizada como combustível. Embora se trate de um dos poucos materiais renováveis, a maior parte da extração da madeira é feita de maneira não sustentável (CONSTRUCTION & ENVIRONMENT, 1996).

O grande volume de materiais produzidos tem também outras implicações. Na Inglaterra, por exemplo, apenas o transporte e a produção dos materiais de construção consomem cerca de 10% da energia (DETR, 1998).

Este volume de materiais compreende somente os materiais que chegam no canteiro. A inclusão dos resíduos gerados nas indústrias e extração de matérias primas destinadas à fabricação dos materiais e componentes para construção civil aumentaria em muito este volume.

A melhoria e ampliação do ambiente construído com o emprego de um volume proporcionalmente inferior de recursos naturais é certamente o maior desafio da construção civil. Este desafio é maior nos países não desenvolvidos, onde é necessário construir uma quantidade maior de bens (CHEN;CHAMBERS, 1999).

### **2.5.2 Geração de resíduos**

O macro-complexo da construção gera resíduos na produção de materiais e componentes, na atividade de canteiro, durante a manutenção, modernização e, finalmente, na demolição. As atividades de manutenção têm como causa tanto a correção de falhas de execução –conhecidas como patologias – quanto à necessidade de reposição dos componentes que atingiram o fim da sua vida útil (JOHN, 1986). Neste item serão tratados apenas os resíduos gerados por atividades de construção e de manutenção e demolição, conhecidos por resíduos de construção e demolição (RCD) ou entulho de obra.

Estudo de PINTO (1999) estimou que nas grandes cidades brasileiras as atividades de canteiro de obras são responsáveis por aproximadamente 50% dos resíduos de construção e demolição (RCD), enquanto que a atividade de demolição e manutenção são responsáveis pela outra metade. BOSSINC *et al.* (1996), apresentam estimativas de países da Alemanha e Europa Oriental demonstrando que aproximadamente 2/3 dos resíduos são provenientes de manutenção e demolições e o restante de atividades de

construção. Nos EUA, a EPA (1998) estima que apenas 8% dos resíduos de construção sejam provenientes das atividades de construção, e que 33% provêm de demolições não residenciais. Naturalmente as diferenças na participação de cada fonte refletem a importância relativa das atividades de construção, manutenção e demolições em cada economia e também da taxa de perda de materiais em ambas atividades de construção.

A Tabela 2-1 resume os principais estimativas de produção de RCD encontrados na bibliografia. O valor de geração de resíduo depende da intensidade da atividade de construção em cada país, da tecnologia empregada, taxas de desperdícios e manutenção. Este volume pode crescer significativamente em função de desastres naturais ou guerra (LAURITZEN, 1998).

De maneira geral o volume de RCD gerado nas cidades é equivalente ou superior ao dos resíduos sólidos municipais (EU, 1999). Na Europa, a estimativa média de geração de entulho varia de 600 e 918 kg/hab.ano, superior a estimativa de 390 kg/hab.ano de resíduo sólido municipal (LAURITZEN, 1998). No Brasil, o trabalho sistemático apenas se inicia e os dados disponíveis são os de PINTO (1999). Dada a inexistência de dados estatísticos este autor propôs uma metodologia para estimar a geração de RCD em centros urbanos. Nas 10 cidades estudadas por este autor, a geração de RCD variou de 230 a 760 kg/hab.ano, representando entre 41% e 70% do resíduo sólido municipal, em aderência. Uma exceção parece ser os Estados Unidos, onde a geração estimada de resíduo de construção é inferior à do resíduo municipal: 463 kg/hab.ano de RCD (EPA, 1998) contra 720 kg/hab.ano (EPA, 1996). Esta disparidade da taxa de geração de resíduos per capita na economia norte-americana, pode ser atribuída a uma menor geração de resíduos nas atividades de construção, ou mesmo ao menor peso da construção na economia norte-americana, cerca de 6,5% do PIB (HENDRICKSON; HARVOATH, 2000).

Produtos de diferentes origens e natureza podem ser identificados dentro do termo genérico resíduo de construção e demolição. Para citar exemplos (PINTO, 1999) podem ser identificados: (a) solos; (b) rochas; (c) concreto, armado ou não; (d) argamassas a base de cimento e cal; (e) metais; (f) madeira; (g) plásticos diversos; (h) materiais betuminosos; (i) vidro; (j) gesso – pasta e placa; (k) tintas e adesivos; (l) restos de embalagens; (m) resíduos de cerâmica vermelha, como tijolos e telhas; (n) cerâmica branca, especialmente a de revestimento; (o) cimento-amianto; (p) produtos de limpeza de terrenos, entre outros, em proporções variáveis de acordo com a origem.

**Tabela 2-1– Estimativas da geração de resíduos da construção civil em diferentes países**

País	Quantidade Anual		Fonte	Observações
	Mton/ano	Kg/hab.		
Suécia	1,2 - 6	136 – 680	TOLSTOY, BÖRKLUND & CARLSON (1998); EU (1999)	?, ?, 1996
Holanda	12,8 –20,2	820 – 1300	LAURITZEN (1998); BROSSINK; BROUWERS & VAN KESSEL (1996); EU (1999)	
EUA	136 - 171	463 – 584	EPA (1998); PENG, GROSSKOPF, KIBERT (1994)	(1996)
UK	50 – 70	880 a 1120	DETR (1998); LAURITZEN (1998)	1995, 1996
Bélgica	7,5 – 34,7	735 – 3359	LAURITZEN (1998), EU (1999)	?, 1990-1992
Dinamarca	2,3 – 10,7	440 –2010		
Itália	35-40	600-690		
Alemanha	79-300	963-3658		?,1994-1996
Japão	99	785	KASAI (1998)	1995
Portugal	3,2	325	EU (1999)	Exclui solos.
Brasil	na	230-660	PINTO (1999)	Algumas cidades apenas

A Figura 2-4 apresenta a composição média do RCD depositado no aterro de Itatinga na cidade de São Paulo (BRITO FILHO, 1999). O RCD tem constituição variável, depende da fonte geradora – construção ou reforma/demolição, fase da obra, tecnologia construtiva, natureza da obra, etc. Vários dados estão disponíveis, mas ainda não se dispõe de um estudo nacional mais abrangente. No entanto, os valores medidos no Brasil são similares à situação da Europa (PINTO, 1999), mas muito diferentes da situação norte-americana. Nos EUA, o teor de madeira na massa entulho oriundo de construções de edifícios foi estimado em 30% (EPA, 1995). Segundo a mesma fonte blocos de alvenaria e concreto representam entre 1% a 8% da massa de entulho em construções residenciais e 10% a 20% nas construções comerciais.

Na maioria das normalizações internacionais os resíduos de construção e demolição são considerados inertes apenas devido a uma exceção à regra de classificação de resíduos (NBR 10004; EPA 1998). No entanto, devido a sua composição variada, os resíduos de construção e demolição podem conter resíduos perigosos, como adesivos, tintas, óleo, baterias, biocidas incorporados em madeiras tratadas, tendo sido encontrado nos lixiviados dos aterros quantidades de substâncias tóxicas acima dos limites (EPA, 1995), o que permite levantar a suspeita que esta exceção a regra pode ser revista em médio prazo. Não se conhece investigação similar no Brasil.

A deposição irregular do RCD é um fenômeno internacional e no Brasil tem importantes efeitos na qualidade ambiental urbana e nos custos das prefeituras (PINTO, 1999). A deposição irregular do RCD na malha urbana tem sido relacionada com enchentes, causadas por assoreamento dos córregos por RCD, com prejuízos à paisagem, obstrução

de vias de tráfego e com a proliferação de doenças. A coleta e o transporte do RCD para áreas de depósito cada vez mais afastadas das regiões centrais congestionam o tráfego. Além disto, o recolhimento do RCD depositado ilegalmente representa um custo significativo para os municípios. As estimativas de PINTO (1999) variaram entre US\$5,4/ton e US\$14,8/ton de RCD recolhido para diferentes cidades e técnicas de recolhimento. A Prefeitura Municipal de São Paulo recolhe diariamente 4 mil toneladas de entulho, a um custo mensal de 4,5 milhões de reais (BRITO FILHO, 1999). Em cerca de dez anos a antiga pedreira de Itatinga em São Paulo, originalmente um buraco de 300 m de diâmetro e 80m de profundidade, foi convertida em uma montanha de 80 metros de altura, reduzindo ainda mais a já limitada área para deposição de resíduos.

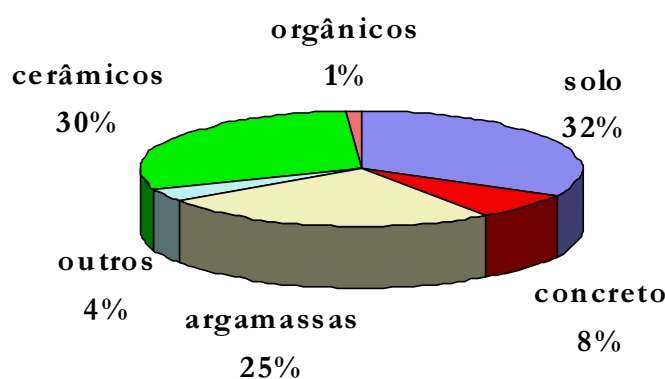


Figura 2-4 – Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo (BRITO FILHO, 1999)

### 2.5.3 Perdas e desperdício na construção civil

As perdas de materiais durante o processo de construção aumentam o impacto ambiental pois consistem em um consumo de materiais além do necessário à produção (ou manutenção) de um bem (ANDRADE, 1999; SOUZA *et al.*, 1999).

Em qualquer processo, devido à variabilidade natural, é inevitável que ocorra um determinado volume de perdas. A fração das perdas que excede a este limite mínimo característico da tecnologia é considerada desperdício. Os limites entre perda inevitável e o desperdício são difíceis de estabelecer e para uma mesma tecnologia variam com características regionais e no tempo. Parte das perdas permanecem incorporadas ao edifício na forma de espessuras excessivas e outra parcela é retirada na forma de resíduo de construção (ANDRADE, 1999).

As perdas tem origem nas diferentes etapas do ciclo de vida do edifício. A fase de planejamento, por exemplo, pode ser responsável por desperdício ao decidir a construção de uma estrutura não necessária. Na fase de projeto, a seleção de uma tecnologia inadequada ou o superdimensionamento da solução construtiva também podem causar desperdício ou necessidades de retrabalho (JAQUES, 1998).

A fase de execução é certamente geradora da parcela mais visível das perdas, inclusive porque é somente nesta fase que as decisões anteriores ganham dimensão física, consumindo recursos naturais.

Talvez a mais importante pesquisa sobre perdas na construção foi realizada no Brasil, financiada pelo Programa HABITARE<sup>10</sup>, que contou com a participação de 18 Universidades e 52 empresas (AGOPYAN *et al.*, 1998). A Tabela 2-2 resume alguns dos resultados obtidos pela pesquisa. A principal revelação principal talvez seja grande variação nas perdas entre as diferentes empresas e canteiros de uma mesma empresa, durante a fase de execução, algumas vezes da ordem de 100 vezes. Esta variação revela o potencial para a redução das perdas *sem mudança da base tecnológica*. Admitindo que 50% do cimento brasileiro é utilizado em atividades de construção de edificações e que estas atividades possuem perdas médias igual 56% (mediana da amostra), pode-se estimar que se as perdas fossem reduzidas para 6% (valor mínimo encontrado na amostra) seria possível aumentar em 25% a produção de edificações, mantendo-se constante a produção de cimento.

**Tabela 2-2 Perdas de alguns materiais de construção civil em canteiros brasileiros (%)**

	<b>Cimento</b>	<b>Aço</b>	<b>Blocos e tijolos</b>	<b>Areia</b>	<b>Concreto usado</b>
Min	6	2	3	7	2
Max	638	23	48	311	23
Mediana	56	9	13	44	9

## **2.5.4 Consumo de energia**

O macro-complexo da construção civil e os seus produtos, particularmente os edifícios, consomem grandes quantidades de energia, desde a construção até, e principalmente, na sua fase de uso.

A produção de materiais consome considerável quantidade de energia, especialmente quando se leva em conta o volume de produção. Poucos dados estão disponíveis no Brasil e os apresentados na Tabela 2-3 são referentes ao mercado dos EUA.

Outros fatores importantes que vão influenciar na energia incorporada nos materiais é a distância e o meio de transporte. Na Inglaterra, o consumo de energia associado à produção e transporte de materiais de construção civil é de cerca de 10% do consumo total de energia.

---

<sup>10</sup> Programa de fomento à pesquisa na área de habitação coordenado pela FINEP e que conta com recursos do CNPq (Bolsas RHAE), Caixa, SEBRAE, entre outros.

**Tabela 2-3 Consumo de energia estimado para a produção de diferentes materiais de construção (COLE; ROUSSEAU, 1992) MJ/ton.**

<b>Produto</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Cimento via seca <sup>1</sup>	1,2	2
Cimento via úmida <sup>1</sup>	4,9	7,4
Madeira Natural	4	7
Compensado	18	
Tijolo cerâmico	2,8	5,8
Gesso	1,4	7,4
Vidro plano	10,2	21,6
Tintas látex (base seca)	76,0	77,7
Poliestireno	105,0	122,8
Aço	25,7	39,0
Alumínio	145,0	261,7

<sup>1</sup>Os consumos energéticos da indústria cimenteira Brasileira são muito inferiores, seja pela superior eficiência energética do processo, seja elevado índice de reciclagem.

O simples conteúdo de energia por unidade de massa dos materiais não constitui em si um indicador do seu impacto ambiental, porque existe significativa diferença de eficiência entre os diferentes materiais para uma mesma função. Assim, o importante é a quantidade de energia ou material necessária para cumprir determinada função. Outro aspecto que também deve ser considerado é que diferentes materiais vão apresentar diferentes durabilidades (ou vidas úteis) em ambientes diferentes. Desta forma, uma durabilidade elevada pode compensar um elevado consumo de energia e vice-versa.

O consumo de energia durante a fase de uso das edificações, em iluminação, operação de equipamentos e condicionamento ambiental pode ser até mais importante que o consumo da fase de construção. Na Inglaterra, os edifícios consomem entre 40% a 50% da energia utilizada no país, sendo que metade deste valor é usado em habitações (DETR, 1998b). No Brasil, o PROCEL (ELETROBRÁS, 1998) estima que as edificações são responsáveis por 42% do consumo de energia elétrica, sendo que cerca de 17% destina-se à iluminação, incluindo a pública.

Mesmo em habitações populares o custo da energia durante a vida útil de 50 anos pode ser maior que o preço pago pela unidade habitacional (excluindo o terreno). Admitindo-se um consumo mensal de R\$20 de energia elétrica, o total gasto em 50 anos é de R\$12.000 superior ao preço médio das habitações populares. Em edifícios comerciais, especialmente aqueles com ar condicionado central, a simples adoção de equipamentos

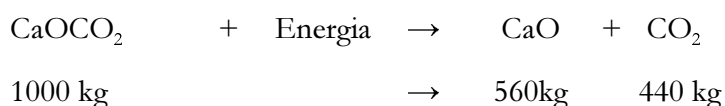


mais eficientes combinada com projeto adequado da fachada pode resultar em reduções no consumo de energia de até 50% (ELETROBRÁS, 1998)<sup>11</sup>.

### 2.5.5 Poluição ambiental

O macro-complexo da construção civil também é um gerador de poluição ambiental. As atividades de canteiro geram, entre outros, poluição sonora e material particulado respirável, esta última uma fonte séria de poluição do ar em São Paulo (CETESB, 1999). Material particulado também é gerado no processo de extração de agregados e moagem de matérias primas, como o cimento e a cal.

A produção dos materiais de construção se constitui talvez em uma mais importante fonte de poluição. A fabricação de cimento Portland e cal, por exemplo, implicam na calcinação do calcário ou dolomito, liberando grandes quantidades de CO<sub>2</sub>:



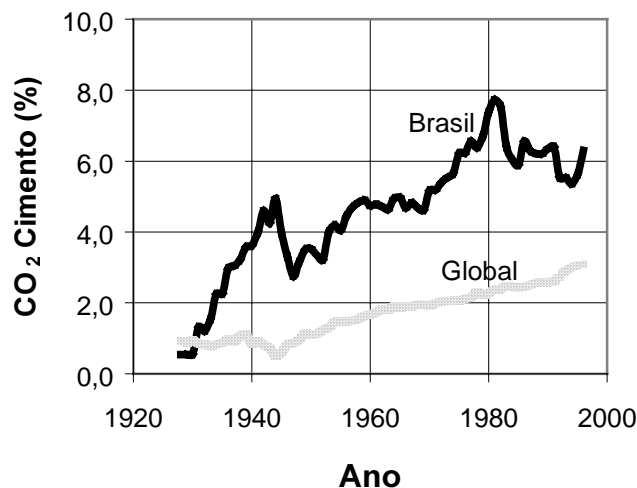
A produção de uma tonelada de cal hidratada cálcica (CaO.H<sub>2</sub>O) libera aproximadamente 785 kg de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, sem contar o CO<sub>2</sub> liberado pela queima de combustível. A produção de uma tonelada de clínquer pelo método da via seca libera aproximadamente entre 820 e 870 kg de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, dependendo do combustível e da eficiência do processo (YAMAMOTO *et al.*, 1997). Deste total, 66% é proveniente da descarbonatação do calcário. Uma parte deste CO<sub>2</sub> vai ser absorvido novamente na carbonatação de concretos e argamassas. Apesar de ser muito inferior que o volume de CO<sub>2</sub> gerado pelos automóveis e caminhões, a massa de CO<sub>2</sub> gerado pela indústria cimenteira é significativa, especialmente no Brasil, onde a produção de cimento contribui atualmente entre 6% e 8% do CO<sub>2</sub> emitido (CDIAC, 2000) (Figura 2-5).

Mesmo aspectos considerados menores do ponto de vista do processo construtivo, como a contaminação de água pela limpeza de caminhões betoneiras ao final do dia de trabalho tem recebido atenção de pesquisadores (CHINI; MBWAMBO, 1996) e de discussões na Câmara Ambiental da Construção Civil na CETESB.

A perda de CFC, fluido refrigerante ainda utilizado na maioria dos aparelhos de ar condicionado é um outro exemplo de poluição gerada pelos produtos da construção.

---

<sup>11</sup> Contato pessoal com Prof. Roberto Lamberts (UFSC).



**Figura 2-5 – Evolução histórica da participação da indústria de cimento na geração de mundial de CO<sub>2</sub>. Dados obtidos pelo autor no CDIAC (2000)**

### 2.5.6 Poluição do ar do interior dos edifícios

Além da poluição do ar externo a construção civil é responsável pela criação de ambientes interiores poluídos. Os poluentes do ar do interior dos edifícios são: (a) compostos orgânicos voláteis; (b) microrganismos patogênicos; (c) poeiras; (d) partículas e fibras; (e) radônio (EPA, 1998c). Estes produtos são liberados pelos materiais, pelo solo ou pelas atividades relacionadas ao uso e operação de equipamentos (fogões, máquinas de xerox, impressoras laser, etc.) e de produtos de limpeza.

O nível de poluição interno é controlado pela seleção de materiais, pelas taxas de ventilação e pelas atividades de limpeza e assepsia, particularmente dos sistemas de ar condicionado e ventilação. A máxima taxa de ventilação é definida em projeto, mas é o uso que determina a taxa real de renovação de ar durante a fase de uso.

O tema é crítico em edifícios condicionados. Em países frios como Canadá, Suécia e EUA o problema recebe atenção dos organismos de saúde pública a cerca de 15 anos. Em edifícios não condicionados em climas amenos como os observados no Brasil a importância do tema é discutível, exceto pelas possibilidades de contaminação dos ambientes por microrganismos.

A seleção dos materiais estabelece a quantidade de compostos orgânicos voláteis liberados pelos materiais e também pelas atividades de limpeza que cada material requer. Dentre os compostos orgânicos voláteis mais importantes encontram-se os formaldeídos, solventes orgânicos, oriundos de colas, tintas, plásticos e outros revestimentos orgânicos (YU; CRUMP, 1998). As fibras respiráveis podem ser oriundas de revestimentos tecidos como os carpetes, isolantes térmicos fibrosos e mesmo da abrasão de peças contendo fibras perigosas, como uma das formas de amianto. Os

efeitos destes poluentes dependem da natureza, intensidade e período de tempo de exposição. Podem variar de simples dores de cabeça que afetam a produtividade até câncer ou outros danos ao sistema respiratório (EPA, 1998c).

Microrganismos patogênicos são associados normalmente com a presença de água produzida por infiltrações ou evaporação de água durante o uso associada a baixas ventilações. Causam alergias ou afetam o sistema respiratório. Um caso específico é a doença do legionário, uma doença muito similar à pneumonia e por isto de diagnóstico difícil. Ela está associada à contaminação dos sistemas de distribuição de água (EPA, 1998c).

Atividades de produção podem gerar poluição do ambiente de trabalho, como a aplicação de asfalto (BURSTYN *et al.*, 2000), aplicação de tintas contendo de chumbo, etc.

### **2.5.7 Outros**

Além dos impactos antes listados, a cadeia produtiva da construção civil tem impactos. Destes os mais discutidos são os efeitos das obras de construção e de extração de matérias primas na destruição da flora, fauna, paisagem.

A água, embora abundante no planeta, é predominante não potável, concentrada em oceanos e mares ou encontra-se nas calotas polares. Menos de 1% do total da água é potável e acessível ao consumo humano, sendo que em grandes cidades mesmo fora de regiões desérticas ou semidesérticas a água potável é produto escasso e caro.

### **2.5.8 Poluição ambiental e durabilidade de materiais de construção civil**

Está provado que a concentração atmosférica de poluentes, como o SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> determinam em grande parte a velocidade de degradação dos materiais de construção, metálicos ou não metálicos (HAAGENRUD, 1997). O buraco na camada de ozônio ao aumentar a taxa da radiação ultravioleta no solo tem efeitos na velocidade de degradação dos plásticos. SHIRAKAWA *et al.* (1998), demonstram que microrganismos alimentados pelo óleo diesel que contaminava o lençol freático causaram significativos danos a um túnel do Metro de São Paulo. TILFORD *et al.* (2000), estudaram diversos tipos de obras norte-americanas que enfrentaram problemas com solos contaminados e concluíram que o acréscimo no custo da construção variou entre 0,1 a 360%, com mediana de 13,3%, tendo causado atrasos significativos em algumas obras.

## **2.6 CONCLUSÃO**

Existem sinais bastante claros de que o atual modelo de desenvolvimento, baseado na extração maciça de recursos naturais e geração de resíduos não é sustentável em longo prazo.

Em substituição a este modelo, está sendo proposto o modelo de desenvolvimento sustentável, que ainda necessita ser definido de maneira mais objetiva. Apesar de ser um conceito ainda difuso, o seu impacto na cultura, pesquisa, comércio e atividades produtivas já é uma realidade.

A cadeia produtiva da construção civil é provavelmente uma das maiores da economia e conseqüentemente possui enorme impacto ambiental. É a principal consumidora de matérias primas da economia, uma das maiores geradoras de resíduo, energia e também colabora significativamente na poluição ambiental, incluído o efeito estufa.

Assim, não será possível um desenvolvimento sustentável sem que toda a cadeia produtiva da construção civil sofra transformações significativas. Provavelmente estas mudanças serão muito mais profundas que as causadas recentemente pela adoção do paradigma de gestão da qualidade.

## **CAPÍTULO 3**

# **RECICLAGEM, CONSTRUÇÃO CIVIL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

---

### **3.1 CLASSIFICAÇÕES DE RESÍDUOS**

Os resíduos podem, em uma primeira avaliação, serem classificados como: (a) perigosos, em diferentes graus; (b) não perigosos.

A EPA (1999) define como perigoso um resíduo que possua propriedades que o torne perigoso ou capaz de causar um efeito danoso à saúde humana ou ao meio ambiente. Em termos genéricos, a classificação objetiva é realizada em função da: (a) toxicidade; (b) flamabilidade; (c) corrosividade; (d) reatividade; (e) patogenicidade; (f) radioatividade (NBR 10004; EPA, 1999).

A NBR 10004 define três categorias de resíduos sólidos: (a) Resíduos Perigosos - Classe I, categoria da qual exclui expressamente os resíduos dos tratamentos de esgotos, resíduos sólidos domiciliares e os resíduos da construção civil; (b) resíduos não inertes ou de Classe II; (c) resíduos inertes, de Classe III, definidos como aqueles que em ensaio de solubilização dos resíduos, após 7 dias, a água solubilizada apresenta condições de potabilidade, exceto pela cor. A norma apresenta uma lista de resíduos sólidos reconhecidos como perigosos e uma metodologia, projetada para avaliar os riscos de contaminação pela deposição destes resíduos em aterros. No que toca à toxicidade, a hipótese central é que a percolação da água de chuva pelo aterro causaria a solubilização e lixiviação de parcelas dos resíduos, contaminando o lençol freático.

Uma outra forma de classificar os resíduos é segundo a sua origem. Os resíduos pós-consumo são os resíduos resultantes do consumo de um bem. Como característica típica eles são gerados de maneira difusa no ambiente construído. Ele é geralmente confundido com o resíduo sólido municipal. Eventuais tratamentos desses resíduos dependem do sistema de coleta, que pode ser dispendioso. Assim, a reciclagem de resíduos pós-consumo é viável quando o valor agregado ao produto é elevado. Isto explica o sucesso da reciclagem das latas de alumínio e o pouco sucesso da reciclagem das embalagens de

Tetrapack. Já os resíduos industriais são aqueles gerados em uma atividade produtiva. Via de regra, esses resíduos têm sua geração concentrada, sendo mais fácil a sua recuperação.

### **3.2 LIMITES DA POLÍTICA HIERÁRQUICA DE GESTÃO DE RESÍDUOS**

Na gestão de resíduos vigora uma hierarquia (LEACH *et al.*, 1997; GRÜBL; RÜHL 1998; EU, 1999) de objetivos:

- Reduzir a geração do resíduo na fonte;
- Reutilizar o resíduo;
- Reciclar
- Incinerar recuperando a energia;
- Depositar em aterros sanitários.

Esta hierarquia está presente nas principais legislações relativas a resíduos e vem sendo aceita sem maiores questionamentos (LEACH *et al.*, 1997; EPA, 2000; TOLSTOY *et al.*, 1998; VAN DER ZWAN, 1991). Esta formulação foi, provavelmente, elaborada a partir da experiência com os resíduos sólidos municipais, onde do ponto de vista do município, a redução do volume do resíduo implica em uma redução direta no custo e impacto ambiental do sistema.

Esta hierarquia, em tese, é questionável, uma vez que a melhor alternativa é, por definição, aquela de menor impacto ambiental global (TUKKER; GIELDEN, 1994) e é perfeitamente possível imaginar que existam situações onde a redução do volume de resíduos pode resultar em um impacto ambiental maior do que o benefício obtido. Por exemplo, ALLEN e ROSSELOT (1994) afirmam que muitas vezes técnicas de reciclagem requerem um volume mínimo de resíduo disponível em determinada região e uma concentração mínima da fase a ser reciclada no resíduo total. Nesta situação, pode ser desejável um aumento na produção do resíduo ou da concentração da fase a ser reciclada de maneira a tornar economicamente viável a sua reciclagem e assim evitar a deposição do resíduo em aterro. LEACH *et al.* (1997), demonstraram que, através de uma análise do ciclo de vida, a incineração de papel é provavelmente a alternativa de menor impacto ambiental que a reciclagem, para o caso da Inglaterra.

Ainda mais, a geração de resíduos é inevitável por várias razões. Em primeiro lugar porque a vida útil de um produto é sempre limitada, após a qual o produto se transforma em resíduo. Esta vida útil finita é uma característica mesmo dos produtos duráveis, porque as atividades de manufatura normalmente incorporam de grandes quantidades de energia nos materiais e a lei da Termodinâmica afirma que todos os produtos tendem ao seu mais baixo nível de energia (JOHN, 1995). Assim, por mais que o paradigma de obsolescência planejada seja abandonado, que os produtos sejam projetados para durar

mais, em algum momento eles, inevitavelmente transformar-se-ão em pós-consumo. Outro fator é a variabilidade intrínseca dos processos e matérias-primas, que faz com que alguns produtos sejam produzidos em não conformidade com o especificado e acabem se tornando resíduos. Assim, a reciclagem é condição para o desenvolvimento sustentável, pois é ela que permite fechar o ciclo.

Assim, é provável que a hierarquia tradicional dos resíduos precise ser re-interpretada como um conjunto de opções de ação, sendo em cada situação, utilizada-se a de melhor desempenho ambiental, do berço ao túmulo. Esta adequação pode ser julgada através de análises do ciclo de vida. Esta mudança de abordagem já é política governamental na Dinamarca (GLAVIND; HAUGAARD, 1998) e esta em discussão no Reino Unido, embora sob forte oposição (DETR, 1999).

Também não se pode considerar as quatro alternativas como mutuamente excludentes. Como um resíduo é algo bastante heterogêneo em função, tanto de sua origem, quanto em função das contaminações no processo de geração e manuseio, é muitas vezes muito mais lógico adotar, para diferentes frações, diferentes objetivos: reutilizar as íntegras, reciclar as parcialmente danificadas e incinerar ou depositar em aterro as muito contaminadas. Por exemplo, no caso de calcinação de cinza de casca de arroz em um forno de clínquer Portland, tanto a reciclagem das cinzas quanto à recuperação de energia ocorrem simultaneamente.

### **3.3 VANTAGENS POTENCIAIS DA RECICLAGEM**

Além de ser uma opção em relação às demais, a reciclagem de resíduos apresenta várias vantagens *potenciais* do ponto de vista da sustentabilidade. No entanto, a vantagem ambiental de um processo de reciclagem, somente pode ser dada como certa, após análise específica através de ferramentas como a da análise do ciclo de vida. Um dos graves riscos, quando se produzem novos materiais a partir de resíduos, é a contaminação ambiental interna e externa das construções que usam estes resíduos, seja pela contaminação da água, radiação ou pela volatilização de frações orgânicas (VAN DER ZWAN, 1991).

A primeira e a mais visível das contribuições ambientais da reciclagem é a *preservação de recursos naturais*, substituídos por resíduos, prolongando a vida útil das reservas naturais e reduzindo a destruição da paisagem, flora e fauna. Esta contribuição é importante mesmo nos casos onde os recursos naturais são abundantes, como é o caso do calcário ou argila, porque a extração de matérias primas prejudica a paisagem e pode afetar ecossistemas (EPA, 1998a; JOHN, 1999). Em 1996 a substituição do clínquer por cinzas volantes e escórias resultou em uma redução no consumo de combustível de 28% na indústria cimenteira nacional (YAMAMOTO *et al.*, 1997).

A redução do volume de aterros e incineração (EPA, 1998b; JOHN, 1999) nem sempre são consideradas quando se analisa o impacto ambiental da reciclagem. Aterros, especialmente aqueles com resíduos perigosos ou não inertes, concentram substâncias químicas em níveis que se tornam perigosos e podem contaminar o lençol freático. Muitos resíduos são estáveis e, as estruturas e o risco representado pelos aterros sanitários permanecerão ativos por centenas de anos.

A reciclagem de resíduos, na maior parte dos casos, permite a redução do consumo energético (EPA, 1998b; JOHN, 1999) para a produção de um determinado bem, porque muitas vezes os materiais já incorporam energia. Este é o caso da reciclagem do aço, alumínio e mesmo da reciclagem da escória de alto forno e da cinza volante como aglomerante (Tabela 3-1). Na indústria cimenteira este fato já é conhecido pelo menos desde 1981 (DUTRON, 1982; CALLEJA, 1982; AGUANELL *et al.*, 1982). Outras vezes, resíduos de composição parcialmente orgânica servem de fonte de energia, além de acrescentar massa ao produto final, como é o caso da casca de arroz, que contém cerca de 20% de cinza de composição predominante silicosa (METHA, 1992). MARCIANO e KHIARA (1997) estimam que a indústria cimenteira economizou entre 1976 e 1995 cerca de 750 mil toneladas de óleo combustível queimando resíduos, como casca de arroz, serragem e pedaços de madeira, pó de carvão vegetal, pedaços de pneus e borrachas, cascas de babaçu, entre outros. É também necessário lembrar que a deposição de um resíduo em um aterro também envolve consumo de energia, com o transporte e gestão do aterro.

A distância de transporte, a energia necessária para limpeza e classificação de um resíduo de forma a viabilizar a reciclagem e até mesmo a tecnologia envolvida na reciclagem podem torná-la ambientalmente indesejável.

**Tabela 3-1 Redução do impacto ambiental (em %) da reciclagem de resíduos na produção em alguns materiais de construção civil, exceto transporte.**

Impacto Ambiental	Alumínio <sup>1</sup>	Aço <sup>2</sup>	Vidro <sup>2</sup>	Adição de escória ao Cimento		
				20 %	30%	50%
Energia	97%	74	6	88 <sup>3</sup>	82 <sup>3</sup>	71 <sup>3</sup>
Matéria-prima		90	54	20	30	50
Água		40	50	-	-	-
Poluição do ar		86	22	20 <sup>4</sup>	30 <sup>4</sup>	50 <sup>4</sup>
Resíduos em geral		105	54			
Resíduos minerais		97	79			

<sup>1</sup> KINGTON (1979)

<sup>2</sup> UDAETA E KANAYAMA (1997)

<sup>3</sup> DUTRON (1982)

<sup>4</sup> Considera-se apenas a redução de poluentes no processo de clinquerização, como CO<sub>2</sub>.



Ela muitas vezes permite também a redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto (EPA, 1998b; JOHN, 1999). YAMAMOTO *et al.* (1997), estimam que em 1996, a indústria cimenteira brasileira, ao adotar a reciclagem maciça de cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno básicas, além da calcinação de argilas e adição de *filler* calcário, reduziu a geração de CO<sub>2</sub> em 29%.

A reciclagem também permite a *geração de empregos* e aumenta a competitividade da economia (EPA, 1998). Estudo realizado na Carolina do Norte (EUA) demonstrou que para cada 100 empregos criados na reciclagem são perdidos apenas 13 na indústria do lixo e que a reciclagem é hoje um negócio de vários bilhões de dólares (EPA, 1998b).

Muitas vezes, a incorporação de resíduos permite um aumento da *durabilidade* da construção em determinadas situações, como já está comprovado por inúmeros estudos na área de adições escória de alto forno e pozolanas ao cimento (JOHN, 1999).

A reciclagem, eventualmente, pode reduzir os custos da proteção ambiental, ou até mesmo viabilizar grau de proteção ambiental superior, pois permite gerar valor a partir de um produto que antes se constituía em despesas (VRIJLING, 1991). Uma última vantagem potencial, citada pela SCIENCE RESEARCH COUNCIL inglesa (KINGTON, 1979), que parece atual para o Brasil de hoje, é a economia de divisas, na eventualidade da importação de alguma das matérias-primas recicladas.

### **3.4 POLÍTICAS DE INCENTIVO À RECICLAGEM**

A percepção da importância da reciclagem para a sustentabilidade tem levado diferentes países a adotarem políticas específicas visando criar condições para que ela aconteça. Nos EUA o governo federal estabeleceu critério de compra ordem executiva 12873 (20 Out. 1993), periodicamente atualizada e aperfeiçoada (por exemplo, Ordem Executiva 13301 de 14 Set. 1998), uma política nacional para a compra de produtos e serviços "ambientalmente preferíveis", definidos como aqueles que possuem menor efeito nocivo ao ambiente ou à saúde, quando comparados com seus competidores e durante todo o ciclo de vida (CLINTON, 1993). Coerentemente, grande destaque é dado para produtos contendo resíduos ou que previnam a geração resíduos. A EPA (Environmental Protection Agency) estabeleceu metas de conteúdo mínimo de resíduos para itens como cimento Portland (15% de cinzas volantes e 25% de escória de alto-forno), carpetes, isolantes térmicos, tintas látex (de 10% a 50%, dependendo da cor), papel, etc. (EPA, 1999b).

O governo inglês lançou em 1995 a sua diretiva<sup>12</sup> “*Making Waste Work*”, uma estratégia para o gerenciamento sustentável de resíduos, que tem como um dos objetivos: (a) fazer o melhor uso do lixo que nossa sociedade produz; (b) reduzir a quantidade de resíduos; (c) reduzir o risco de poluição imediata ou futura pela deposição dos resíduos (DESAI, 1998). Atualmente está em discussão o aperfeiçoamento dessa política através do documento *A way with waste*, (DETR, 1999b) onde enfatiza mais claramente que reciclagem é crítico para melhorar o desempenho ambiental do processo de gestão de resíduos e está comprometido em buscar meios para o crescimento da reciclagem. Nesta linha, o governo está investigando na possibilidade de remover barreiras para a reciclagem, como viabilizando contratos de longo prazo para a reciclagem de resíduos, exigência de valores mínimos de resíduos em determinados materiais e para melhoria do mercado de produtos contendo resíduos. Dentre as políticas adotadas na Inglaterra, está a imposição de uma taxa sobre todo o material enviado para aterro (DESAI, 1998).

No mundo industrial está sendo definido o conceito de sinergia entre diversas indústrias, agricultura e comunidades, de maneira a maximizar a reciclagem de resíduos e promover o desenvolvimento sustentável (WBSC-GM, 1997). Neste conceito, existe uma integração entre diferentes indústrias, onde uma utiliza o resíduo da outra como matéria-prima. O conceito recebe diferentes denominações, como *sinergia através de resíduos*, *simbiose industrial*, *resíduos zero – emissões zero – 100% produto* e *simbiose verde*<sup>13</sup>.

### **3.5 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS NO BRASIL**

Comparativamente a países do primeiro mundo, a reciclagem de resíduos no Brasil, como materiais de construção, é ainda tímida, com a possível exceção da intensa reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e de aço.

Este atraso tem vários componentes. Entre eles, os repetidos problemas econômicos e os prementes problemas sociais ocupam a agenda de discussões políticas, deixando pouco espaço para discussões mais de longo prazo, como a questão do desenvolvimento sustentável.

Mesmo a discussão mais sistemática sobre resíduos sólidos é recente. No Estado de São Paulo só recentemente foi iniciada a discussão de uma Política Estadual de Resíduos Sólidos. Este projeto de Lei, aprovado pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente propõe uma política abrangente de resíduos, incluindo ferramentas para minimização e

---

<sup>12</sup> No original “white paper”.

<sup>13</sup> No original *By-product synergy, industrial symbiosis, zero-waste/zero emissions/100% product operation* e *green twinning*.

reciclagem de resíduos. Em termos nacionais existe uma discussão no Conselho Nacional de Meio Ambiente, e vários projetos de lei em tramitação no Congresso Nacional<sup>14</sup>.

Assim, em larga medida, a questão ambiental no Brasil, ainda é tratada como sendo um problema de preservação da natureza, particularmente florestas e animais em extinção, deposição em aterros adequadamente controlados e controle da poluição do ar, com o estado exercendo o papel de polícia. A recente lei federal de crimes ambientais (nº9.605, 13 Fev. 1998) revela um estado ainda mais voltado à punição das transgressões à legislação ambiental vigente do que em articular os diferentes agentes sociais na redução do impacto ambiental das atividades, mesmo que legais, do desenvolvimento econômico. Um contraponto a esta ação predominantemente policial foi à iniciativa pelo Governo do Estado de São Paulo, através da CETESB, de implantação de 17 Câmaras Ambientais setoriais, inclusive construção civil.

O governo federal criou através da portaria nº92 (06 Ago. 1998) do antigo Ministério da Indústria, Comércio e Turismo, um grupo de trabalho interministerial com o objetivo de elaborar a proposta do Programa Brasileiro de Reciclagem, a partir de um documento base já produzido. Este programa deverá desenvolver mecanismos que permitem incrementar e valorizar a utilização como matérias-primas, de resíduos industriais, minerais e agropecuários, bem como o desenvolvimento do parque industrial nacional reciclador (MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO E TURISMO, 1998). Embora a portaria tenha estabelecido um prazo de 90 dias para o encerramento dos trabalhos, até o momento estes trabalhos ainda não foram iniciados.

Inexistem no mercado Brasileiro de entidades emitindo certificados ou de certificação ambiental, algumas vezes chamados de "selos verdes" tanto para produtos de consumo imediato quanto para edifícios. No caso de edifícios, programas de certificação como o inglês BREEAM (BALDWIN *et al.*, 1998) e o americano LEED (US GREEN BUILDING COUNCIL, 1999) incluem requisitos de conteúdo mínimo de produtos reciclados. Para um edifício receber o selo americano uma das exigências é que produtos que representem 20% do custo dos materiais sejam constituídos com um mínimo 20% de resíduos pós-consumo ou 40% de resíduos industriais. A ausência deste selo no mercado brasileiro é, ao mesmo tempo, um indicador do atraso de uma agenda ambiental mais pró-ativa e mais uma dificuldade na introdução de produtos contendo reciclagem.

Uma medida positiva foi à promulgação no dia 12 de Maio de 1999 da Lei nº10.311 do Estado de São Paulo, que cria o Selo Verde, um certificado de qualidade ambiental, a ser conferido pela CETESB, a estabelecimentos sediados no Estado de São Paulo que executem programas de proteção e preservação do meio ambiente, com efetivo

---

<sup>14</sup> Contato pessoal com a Dra. Lúcia Sena, Secretária do Meio Ambiente de São Paulo. Em 25 de Maio de 1999.

cumprimento das normas ambientais (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1999). Apesar de não ser voltada para a certificação de produtos, trata-se de um avanço significativo.

A inexistência destas marcas de qualidade ambiental de produtos demonstra que, diferente de outros países, as empresas brasileiras que eventualmente reciclem não utilizam sua contribuição ambiental como ferramenta de marketing, apesar do consumidor, mantido o preço e a qualidade, preferir produtos com menor impacto ambiental (MORENO, 1998). Uma das causas possíveis para este aparente desinteresse é um eventual receio de que o público consumidor leigo associe o produto reciclado a produto de baixa qualidade. Esta dúvida somente pode ser resolvida através de pesquisa de mercado.

As experiências, de maior sucesso na reciclagem brasileira, se devem, em sua grande maioria, a benefícios econômicos evidentes, aliado a alguma influência de pressões dos serviços de coleta de lixo urbano. Este é o caso das latas de alumínio, onde o benefício elevado da reciclagem do alumínio, resultado do elevado preço da matéria-prima no mercado e do alto consumo de energia para a produção do alumínio a partir da bauxita, fez com que os produtores da lata desenvolvessem estratégia original de reciclagem de sucesso inquestionável. Papel, sucata de aço, escória de alto-forno, entre outros, apresentam também vantagens econômicas bastante evidentes.

### **3.6 RECICLAGEM NA CAD EIA PRODUTIVA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

A cadeia produtiva da construção civil apresenta muitas vantagens que a credenciam a ser uma grande recicladora. Por outro lado, enquanto setor, a oportunidade de reduzir o significativo impacto ambiental através da reciclagem é extremamente interessante. No momento ela se constitui em uma abordagem pró-ativa, até porque o setor é um dos principais geradores de resíduo da economia. Dada a grande dimensão econômica e ambiental do problema dos RCD (resíduos de construção e demolição) é provável que nos grandes centros urbanos brasileiros as municipalidades em breve estarão tomando medidas que forcem a construção civil no sentido da reciclagem, de seus próprios resíduos. É sintomático que cidades de grande e médio porte, como Belo Horizonte, Ribeirão Preto e Salvador a municipalidade já esteja agindo ativamente na reciclagem de resíduos (PINTO, 1999).

A indústria cimenteira recicla aproximadamente mais de 5 milhões de toneladas por ano de escória de alto-forno, cinzas volantes, pneus, etc. O setor siderúrgico é também um grande reciclador, com pelo menos 6 milhões de sucata reciclada anualmente<sup>15</sup>. Boa parte

---

<sup>15</sup> Palestra de Maria Cristina Yuan, IBS no PCC USP em 26/11/1998

do aço destinado a reforço de concreto armado produzido no país é proveniente do processo de arco elétrico, que utiliza como matéria-prima principal a sucata de aço. A reciclagem desta sucata permitiu economizar em 1997 cerca de 6 milhões de toneladas de minério de ferro, evitou a geração de cerca de 2,3 milhões de toneladas de resíduos e de cerca de 11 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub><sup>16</sup>.

### 3.6.1 Facilitadores da reciclagem na cadeia produtiva da construção civil

A capacidade da cadeia produtiva da construção civil de reciclar resíduos se deve a vários fatores. Esta capacidade se estende a resíduos de outros processos e cadeias produtivas.

Em primeiro lugar, a construção civil *é a maior consumidora de materiais* na economia e, portanto, tem maiores possibilidades de reciclar (MATTOS; WAGNER, 1999; SJÖSTRÖM, 1996).

Em segundo lugar, os diferentes ramos da cadeia produtiva estão *presentes em todas as regiões*, o que facilita projetos de *simbiose industrial* permite uma reciclagem local, já que a questão geográfica é crítica neste tipo de trabalho (WSBC-GM, 1997). É interessante observar que uma parcela significativa dos materiais que a construção consome são *agregados* (MATTOS; WAGNER, 1999) para pavimentos, concretos e argamassas e elementos de alvenaria, cuja produção é eminentemente regional. A Tabela 3-2 mostra a quantidade de estabelecimentos de fabricação de diferentes materiais nos EUA. A produção de agregados juntamente com a de componentes aglomerados com cimento e gesso é a que apresenta maior número de estabelecimentos, com os dados revelando a sua dispersão pelo país.

**Tabela 3-2** Número de estabelecimentos que produzem diversos tipos de materiais. A maioria dos dados é oriundo do censo dos EUA de 1987

<b>Tipo de produto</b>	<b>nº</b>	<b>Fonte</b>
Vidro plano	44	EPA (1995a)
Cimento	237	EPA (1995a)
Cerâmica vermelha	587	EPA (1995a)
Produtos de gesso e cimento	9643	EPA (1995a)
Produção de agregados (areia e brita)	9914	EPA (1995b)
Produtos plásticos (> 20 empregados)	5999	EPA (1995c)

A construção civil consome uma enorme *variedade de materiais* – sejam minerais/silicosos, poliméricos ou metálicos - e este número de materiais vem aumentando (SMITH, 1973; AGOPYAN, 1988) em diferentes graus de industrialização, para diferentes aplicações, tipos de obra, que conseqüentemente apresentam exigências técnicas específicas, embora

<sup>16</sup> Estimativa da liberação de CO<sub>2</sub> considerando que a produção de 1 ton ferro gusa libera 2,2 ton CO<sub>2</sub> (MARCIANO & KHIARA, 1997)

atualmente estas diferentes situações sejam atendidas por um material padrão, como o cimento etc. Isto acrescenta uma grande flexibilidade para buscar oportunidades para desenvolver materiais especializados. O setor é o maior consumidor de materiais silicosos e a sílica é a espécie atômica mais comum no planeta. Por esta razão, muitos resíduos de processos térmicos (cinzas), metalúrgicos e de tratamento ambiental possuem sílica. Mas o setor também consome plástico, produtos de origem vegetal, metais diversos, e está desenvolvendo uma linha muito interessante para compósitos.

Boa parte dos componentes de construção é de *produção simples*, como os componentes produzidos com agregados e aglomerantes inorgânicos. Requisitos como esterilidade, purezas elevadas, etc. são dispensáveis na maioria das aplicações comuns da construção civil, simplificando os processos. A reciclagem de vidro na produção de vidro, por exemplo, requer classificação de cor, enquanto que sua reciclagem como agregado para concreto asfáltico não exige qualquer classificação. Os agregados, por exemplo, são materiais granulares, compatíveis com o aglomerante, em que estão embebidos e com resistência e densidade apropriadas a aplicação. É possível produzir grânulos com muitos materiais diferentes através de técnicas simples como a pelotização ou mesmo trituração. Agregados, muito diferentes dos tradicionais, podem ser adequados a aplicações especializadas, como concretos leves, concretos pesados, base de rodovias, etc. Esta produção mais simples pode significar que a quantidade de capital para a implantação da unidade de reciclagem seja reduzida.

Existe grande possibilidade de utilização grandes volumes de produtos com *resistência mecânica* baixa se comparada com outros setores de engenharia, o que torna possível a convivência com materiais com grande quantidade de defeitos micro-estruturais e impurezas. As resistências mecânicas dos aços para a indústria mecânica são muitas vezes superiores aos 5 a 10MPa necessários a um elemento de alvenaria de vedação, por exemplo, ou a capacidade de suporte de uma base de pavimentação.

Do ponto de vista da construção civil, a reciclagem de resíduos vai resultar no *oferecimento de uma maior quantidade* de produtos alternativos para uma mesma função e, possivelmente, de soluções mais adequadas para situações específicas, com ganhos de eficiência geral do processo.

Do ponto de vista estratégico, é prioritário que o macro-complexo desenvolva capacidade de reciclar seus próprios resíduos, o resíduo de construção e demolição, cujo volume e forma de deposição atualmente apresenta grandes conseqüências ambientais. Não é por acaso que o relatório técnico que embasa o Programa Brasileiro de Reciclagem estabelece este resíduo como uma das suas prioridades (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO, 1999).

### 3.6.2 Barreiras da reciclagem na construção civil

Existem várias barreiras a serem vencidas para a introdução de novos produtos contendo resíduos: legais/ regulamentares, educação e informação, tecnológicas, econômicas e geográficas (BCSD-GM, 1999; LAURITZEN, 1998). A seguir serão discutidas as mais importantes para a construção civil, além de algumas especificidades do setor, juntamente com propostas para superação destes problemas.

Em primeiro lugar é necessária a superação dos limitadores legais, regulamentares e de educação. Segundo LAURITZEN (1998) a superação deste problema depende da existência de políticas de longo prazo, como no caso da Holanda e EUA (Esta condição implica em uma continuidade da política entre vários governos, feito que provavelmente pode ser obtido nas condições brasileiras com um grande envolvimento da sociedade. As Câmaras Ambientais Setoriais de São Paulo, o CONAMA e, possivelmente, o Programa Brasileiro de Reciclagem, parecem ser bons embriões desta articulação Estado-Sociedade.

Uma limitação da construção civil muito discutida é a *difículdade de introdução de novas tecnologias* na construção civil. Várias razões têm sido apontadas, como: (a) o baixo impacto da inovação tecnológica nos custos do empreendimento imobiliário, especialmente devido ao preço da terra, uma razão *econômica*; (b) dois fatores *técnicos*: a existência de normas prescritivas, que especificam a adoção de uma determinada solução específica e não de um desempenho (PRIES; URIJTHOFF, 1989; HESEGUER, 1989, JOHN, 1995); e o histórico Brasileiro recente de novas tecnologias que resultaram em desempenhos insatisfatórios (JOHN, 1995).

A causa *econômica* pode ser superada, tanto tecnologicamente pelo desenvolvimento de produtos que apresentem outras vantagens competitivas frente aos tradicionais (JOHN, 1995b), quanto por ações do poder público. Dentre estas ações, pode-se destacar: (a) a criação de mercados usando o poder de compra do estado (CLINTON, 1993) ou o estabelecimento da obrigação de um conteúdo mínimo de materiais reciclados em um determinado produto (DETR, 1999c); (b) o encarecimento da deposição do resíduo, como por exemplo, através do estabelecimento de taxas para deposição do resíduo como na Inglaterra (DESAI, 1998) e Dinamarca (LAURITZEN, 1998); (c) pela redução do custo dos produtos reciclados, como através de isenções fiscais para produtos contendo resíduos (PINTO, 1999); (d) outros incentivos ou compartilhamento de riscos (VRIJLING, 1991).

Um dos problemas que precisa ser enfrentado é a eventual concepção de consumidores e até técnicos da área de que um produto contendo resíduo possui qualidade inferior (LAURITZEN, 1998). No entanto, pesquisa realizada na Inglaterra demonstrou que apenas 3% dos consumidores desistiriam de uma compra se soubessem que o produto é reciclado (DETR, 1999c) enquanto 37% seriam afetados favoravelmente pelo conteúdo reciclado. Não existem pesquisas específicas sobre este fato no Brasil, mas dados de

MORENO (1998), revelam que, mantido o preço e a qualidade, o consumidor prefere produtos com menor impacto ambiental. No restrito círculo de engenheiros e arquitetos brasileiros são freqüentes os questionamentos sobre a baixa qualidade do cimento contendo escória e pozolana<sup>17</sup>, embora não seja observada qualquer reação contra as latas de alumínio e mesmo o aço. Talvez esta percepção tenha impedido que os maiores recicladores nacionais, a indústria siderúrgica e a cimenteira, não tenham divulgado os benefícios ambientais que trazem.

As *barreiras técnicas* tanto devido à existência de normalização prescritiva quanto à sensação de risco de baixo desempenho com relação de novas tecnologias. VRIJLING (1991), discutindo reciclagem de resíduos, sugere que as resistências técnicas podem ser vencidas pela demonstração, através da condução de pesquisa desenvolvida por entidade de terceira parte, de que o material apresenta desempenho técnico e ambiental igual ou superior à alternativa tradicional. Além do envolvimento de uma terceira entidade na pesquisa e desenvolvimento existe a opção dos documentos de Aprovações Técnicas, sistemas de certificação que tem por base a teoria de desempenho (HEWLETT, 1996; JOHN, 1995b) e as certificações de produtos (LAURITZEN, 1998).

Também podem ser tomadas medidas para tornar a *reciclagem fácil e mais barata*. *Projetar para a reciclagem* (LAURITZEN, 1998) ou para a *desmontagem ou desconstrução*<sup>18</sup> (WYATT, 1994) e *demolição para a reciclagem* (LAURITZEN, 1998) e uma gestão de resíduos adequada de forma a simplificar o processo de reciclagem, são um bom exemplo dessas medidas.

### **3.7 CONCLUSÕES**

A reciclagem é essencial para o desenvolvimento sustentável, uma vez que é impossível pensar em uma sociedade que não gere resíduos.

A reciclagem apresenta muitas vantagens potenciais – como redução do consumo de energia, redução da poluição e aterros - mas em cada situação específica deverá ser objeto de análise sistêmica da situação concreta, com a análise do ciclo de vida, buscando verificar as melhores opções.

Dada a importância da reciclagem para o desenvolvimento sustentável, vários países desenvolveram políticas de incentivo à reciclagem, com resultados importantes. O setor

---

<sup>17</sup> Experiência pessoal do autor. Uma demonstração deste preconceito foi a resposta de um fabricante de blocos de concreto brasileiro ao convite formulado pelo autor para participação de uma pesquisa sobre produção de blocos de concreto com agregados de RCD: “Nossa empresa só trabalha com materiais de primeira qualidade...”

<sup>18</sup> Em inglês *deconstruction*.



industrial desenvolveu também seus conceitos, como o da simbiose industrial onde uma indústria utiliza o resíduo da outra como matéria-prima. No Brasil as políticas de incentivo à reciclagem estão se iniciando e existe um longo caminho a percorrer.

A cadeia produtiva da construção civil já é a maior recicladora da economia, mas possui enorme potencial para aumentar o volume de materiais que recicla, dada a massa de materiais de consome, sua capilaridade regional, e as características dos seus materiais. Neste sentido a reciclagem dos resíduos de construção e demolição é um desafio importante a ser enfrentado.

## **CAPÍTULO 4**

# **PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS**

---

Na experiência do autor as atividades de pesquisa e desenvolvimento dificilmente seguem uma seqüência lógica linear, embora o planejamento das pesquisas normalmente se constitua em uma seqüência linear de atividades. A resolução de problemas e a confirmação de novas descobertas, muitas vezes, exigem a retomada de uma etapa anterior resultando um processo interativo.

Coerentemente uma metodologia para P&D não pode ser entendida como uma seqüência rígida de atividades, mas como algo a ser adequado às condições reais de cada trabalho.

Uma metodologia que tenha por objetivo orientar atividades de pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos como materiais de construção deve, então, reunir e articular os conceitos e ferramentas relevantes ao desenvolvimento das diferentes atividades.

### **4.1 IMPORTÂNCIA DA METODOLOGIA**

Um processo de pesquisa e desenvolvimento de um novo material ou produto a partir de um resíduo, que venha a se estabelecer como uma alternativa de mercado ambientalmente segura, é uma tarefa complexa envolvendo conhecimentos multidisciplinares. Uma demonstração da complexidade é a descoberta de contaminação por dioxina da cal química da Solvay no grande ABC, reciclada e vendida no mercado de construção civil e de ração animal durante anos. Vários acidentes em obras civis já aconteceram devido à expansão da escória de aciaria reciclada como agregado na produção de pavimentos e concretos. MASUERO (1997) apresenta rica documentação fotográfica de um caso.

Não são apenas os novos produtos contendo resíduos que causam problemas na construção civil. Para JOHN (1995) as falhas são freqüentes quando se adotam novas tecnologias, especialmente pela ausência de uma metodologia de desenvolvimento e avaliação. Para VRIJLING (1991) a viabilização de um novo material reciclado no mercado será muito mais provável se seu produtor provar que o material possui desempenho equivalente, ou melhor, que o material que visa substituir e seja ambientalmente seguro, preferencialmente por entidade de terceira parte. A existência de uma metodologia que ajude a organizar o processo é certamente importante.

A pesquisa e desenvolvimento de um novo produto contendo resíduo é mais complexa que a envolvendo matérias-primas naturais. Ela envolve uma gama mais ampla de conhecimentos multidisciplinares de áreas diferentes: legal, social, ciências de materiais, química, economia, *marketing*, engenharia de produto, engenharia de processo, saúde e meio ambiente. A integração de profissionais com diferentes formações gera dificuldades de comunicação. Essa dificuldade de comunicação é agravada devido à interferência de diferentes agentes no processo, como os técnicos da empresa produtora do resíduo, técnicos da empresa interessada na reciclagem, técnicos das agências ambientais, e a equipe técnica de terceira parte, encarregada de realizar a pesquisa. Neste cenário de trabalho a existência de uma metodologia unificadora pode auxiliar os integrantes da equipe a se comunicarem.

Os aspectos de economia, mercado, *marketing*, etc., têm sido desprezados nos trabalhos acadêmicos na área de materiais de construção. No entanto, conforme enfatizado por SKINNER (1994) e VRIJLING (1991), os benefícios de uma pesquisa se realizarão apenas se o novo produto vier a se estabelecer no mercado. Assim, essa metodologia deverá certamente incluir estes aspectos.

Finalmente, a proposição de uma metodologia sistemática permitirá detectar aspectos dos métodos de trabalho que necessitam ser aprimorados.

Não existem trabalhos abrangentes na área de metodologia. Neste universo limitado, destaca-se o pioneiro trabalho de CINCOTTO (1988), que com base em relatório da OECD propõe os seguintes critérios gerais “para avaliação do resíduo para uso na construção civil:

- a) a quantidade disponível em um local deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte;
- b) as distâncias de transporte envolvidas devem ser competitivas com os materiais convencionais;
- c) o material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação na estrutura.”

CINCOTTO (1988), adicionalmente, propõe uma classificação dos resíduos 4 categorias, de acordo com o seu potencial de aplicação na construção civil.

Estes princípios propostos continuam válidos e proposta de metodologia que será esboçada adapta a cada um destes requisitos diferentes ferramentas de trabalho específicas existentes.

## **4.2 POSSIBILIDADES DE EMPREGO DA METODOLOGIA**

A reciclagem de resíduos pode ser o objeto da ação de profissionais com posições bem diferentes: (a) o formulador de políticas de gestão ambiental, interessado em selecionar quais os resíduos mais importantes, seja do ponto de vista da quantidade quanto da agressividade ambiental; (b) o pesquisador ou formulador de políticas públicas, interessado em buscar

dentre os resíduos existentes na sua região um adequado à produção de um produto específico; (c) o gerador de um resíduo específico, que busca alternativas para a reciclagem do mesmo.

A metodologia aqui proposta está voltada prioritariamente para o pesquisador. No entanto, ela pode ser utilizada tanto pelo formulador de políticas públicas, que pode utilizar a parte inicial da metodologia na seleção dos resíduos a serem priorizados em um programa de incentivo à reciclagem, quanto pelo produtor do resíduo.

### **4.3 IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO OS RESÍDUOS DISPONÍVES**

Os *inventários de resíduos* são certamente as fontes mais fáceis de obtenção de informações sobre os resíduos disponíveis e suas quantidades geradas. Todavia, eles ainda são raros em boa parte das regiões do planeta e, como a maior preocupação das agências ambientais está voltada para os resíduos perigosos, podem ser imperfeitos (PINTO, 1999). No Estado de São Paulo, a CETESB possui um levantamento de fontes de resíduos sólidos gerados publicado no ano de 1996 (CETESB, 1996). No documento disponibilizado ao público, no entanto, são apresentados somente as massas gerados dos resíduos classe I e II do resíduo, região do estado e setor industrial. Os resíduos não são identificados. Resíduos inertes, provavelmente os de reciclagem mais fácil, não estão incluídos.

Caso inventários de resíduos não estejam disponíveis existe a possibilidade de levantar os dados a partir de *fontes indiretas*. CASTILHOS *et al.* (1997) apresentam resumidamente a metodologia que utilizaram para realizar um inventário dos resíduos industriais do Estado de Santa Catarina. Esses autores combinaram dados do IBGE, com levantamentos da Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina (FIESC) para identificar as indústrias. Para delimitar o universo a ser pesquisado, utilizaram com uma resolução do CONAMA, que estabelece critérios de classificação das indústrias segundo o potencial de geração de resíduos a partir do número de empregados em cada setor industrial. A coleta dos dados foi realizada através do envio de questionário às empresas.

#### **4.3.1 Identificando resíduos a partir das atividades industriais**

Uma alternativa ao questionário é identificar a partir da bibliografia os resíduos típicos de cada atividade industrial. A EPA norte-americana, no entanto possui uma coleção de documentos denominada *Sector Notebook Project*. Essa coleção consiste em documentos voltados a diferentes setores industriais. Cada documento embora enfatize principalmente os poluentes do ar e água, apresenta dados estatísticos sobre o setor industrial em análise, um resumo do processo de produção e os principais resíduos gerados. Exemplos destes documentos podem ser encontrados em EPA (1995 a – c). Outra opção é a consulta a bibliografias que tratam da gestão industrial, a *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*

(BCSD-GM, 1999), ou congressos da área como os da ISCOWA (GOUMANS, *et al.*, 1991; GOUMANS, *et al.*, 1997). Outra possibilidade é acessar a base de dados *Reciclagem de Resíduos como Materiais de Construção Civil (R&C)* – [www.reciclagem.pcc.usp.br](http://www.reciclagem.pcc.usp.br).

No entanto, no melhor dos casos, estas ferramentas vão produzir uma visão apenas parcial do problema, que deverá ser aprofundada no estudo de campo, já dirigido às empresas de maior interesse.

### 4.3.2 Estimando as quantidades

Alternativamente à pesquisa direta com as empresas, a quantidade de resíduos pode ser estimada através de correlações entre o volume de produção de determinado bem com índices médios de produção de resíduos publicados em bibliografias (VRIJLING, 1991) especializadas de cada área industrial. A Tabela 4-1 apresenta exemplo de dados disponíveis na bibliografia.

**Tabela 4-1 Exemplos de taxas de geração de resíduos industriais (kg resíduo/kg de produto final) para diferentes processos.**

Produto/processo	Resíduo	Produção (kg/kg)	Fonte
Arroz	Casca do arroz	0,2	MEHTA (1992)
	Cinza da casca do arroz	0,04	
Queima do carvão mineral <sup>1</sup>	Cinza volante	<0,4 <sup>2</sup>	SILVA, CHIES, ZWONOK (1997)
	Cinza de grelha	<0,2 <sup>2</sup>	
Ferro gusa (coque)	Escória de alto-forno básica	0,2 a 0,3	JOHN (1995)
Ferro gusa (carvão vegetal)	Escória de alto-forno ácida	0,17 a 0,19	SOARES (1982)
Aço (BOF)	Escória de aciaria	0,1	Estimativa IBS – Contato com Cristina Yuan (26 Nov1998)
Aço (Elétrico)	Escória de aciaria	0,2	

<sup>1</sup>Altamente dependente da fonte de carvão.

<sup>2</sup>Valores máximos no Brasil, expresso em kg de cinzas/kg de carvão queimado

Além das quantidades produzidas, é sempre interessante verificar os volumes existentes em aterros que, dependendo das condições de estocagem, podem também ser reciclados.

## 4.4 SELECIONANDO O RESÍDUO A SER INVESTIGADO

Para a seleção do resíduo a ser investigado são sugeridos diferentes critérios, que podem utilizados isoladamente ou em combinação: (a) risco de contaminação ambiental; (b) aspectos sociais (HARTLEN, 1995), como geração de emprego e renda; (c) impacto nas finanças do setor público (PINTO, 1999); (d) quantidade em massa (CINCOTTO, 1988) ou volume<sup>19</sup>; (e)

<sup>19</sup> Alguns resíduos podem apresentar densidades excepcionalmente baixas, ocupando grandes volumes. Um exemplo são as garrafas PET.

facilidade (CINCOTTO, 1988) ou oportunidade de reciclagem; (f) custo elevado de deposição (HARTLÉN, 1995); (g) interesse do gerador do resíduo, entre outros.

#### 4.4.1 Risco de contaminação ambiental

Dentre os critérios destaca-se a priorização de acordo com o risco de contaminação ambiental. Uma forma interessante de analisar o potencial de contaminação ambiental parece ser a dosagem de espécies tóxicas passíveis de lixiviação, ponderadas de acordo com a sua toxicidade. Um exemplo de metodologia simplificada, cuja utilidade deverá ainda ser objeto de avaliação futura será a seguir proposto.

Esta proposta de metodologia parte do princípio de que o potencial de contaminação ambiental que o resíduo oferece pode ser estimado de maneira simplificada comparando-se à concentração de elementos perigosos (metais pesados, produtos persistentes, etc.) com as concentrações limites estabelecidos na normalização de resíduos (NBR 10004) para classificar o resíduo como perigoso ou classe I. Aceita-se, a princípio, que as diferentes concentrações limites para diferentes espécies químicas foram estabelecidas de forma a garantir uma toxicidade uniforme, uma vez que elas estão baseadas nas doses ou concentrações letais para 50% das cobaias. Outro princípio é que o poder de contaminação vai crescer na razão direta da massa ou volume de resíduo gerado ou existente.

Desta forma o potencial de contaminação do resíduo ( $C_p$ ) pode ser estimado pela equação pela equação:

$$C_p = \sum \frac{C_i}{L_i} M$$

onde:

$C_i$  a concentração do elemento perigoso  $i$  por unidade de massa ou volume;

$L_i$  é a concentração limite do elemento  $i$  a partir da qual o resíduo passa a ser perigoso;

$M$  é a massa do resíduo ou volume do resíduo.

A contaminação ambiental efetiva ( $C_e$ ) causada pelo resíduo vai depender do tratamento que ele, ou parcelas dele, recebe. Para a parcela do resíduo que é depositado em desacordo com a legislação ( $F_z$ ) todo o potencial de contaminação ambiental é realizado. Em outro extremo, a fração do resíduo que já é reciclada ( $F_r$ ) apresenta contaminação ambiental que pode, a princípio, ser considerada nula – uma vez que passou a ser matéria-prima para outro processo admitindo que o processo. Na situação intermediária, onde o resíduo é depositado em aterros tecnicamente adequados ( $F_a$ ) apenas uma parcela ( $p$ ) da contaminação ambiental deve ser considerada em decorrência do risco de contaminação do entorno por falha nos sistemas de segurança do aterro. A equação abaixo resume a proposta:

$$C_e = \sum \frac{C_i}{L_i} M(F_i - F_a.p)$$

onde

$$F_i + F_r + F_a = 1$$

$$p < 1$$

O valor de  $p$  deve ser fixado caso a caso, conforme o risco julgado.

PINTO (1999) justifica a importância do estudo de novos métodos de gestão de resíduo de construção e demolição a partir de uma combinação de argumentos ambientais e econômicos. Os efeitos ambientais destacados pelo autor são decorrentes da deposição irregular deste resíduo na malha urbana, e incluem a degradação das paisagens, a promoção ou agravamento de inundações, a proliferação de vetores como ratos, escorpiões. O impacto financeiro da remoção destes resíduos depositados irregularmente nas finanças dos municípios é outro argumento importante.

Ainda que um resíduo, mesmo se pouco importante quando julgado pelos critérios sugeridos, sua reciclagem pode ser interessante se for constatada uma oportunidade de reciclagem com sucesso comercial. Uma de reciclagem de sucesso pode ser útil em atividades de educação ambiental, aspecto importante em uma política de resíduos sólidos (SKINNER, 1994).

#### 4.4.2 Interesse dos produtos do resíduo na reciclagem

Conforme ressaltado pelo BCSD-GM (1999) se não houver a firme disposição da direção da empresa, seguida da definição dos objetivos da empresa em relação ao resíduo e o envolvimento da equipe da empresa, a reciclagem do resíduo dificilmente será concretizada.

Vários fatores colaboram com isto. Em primeiro lugar, o processo de reciclagem somente será possível se o reciclador tiver confiança na estabilidade do fornecimento de sua matéria-prima (o resíduo) por período suficientemente longo para amortizar o investimento. Em segundo lugar, para desenvolver o processo de reciclagem são necessárias informações sobre processos internos da empresa que definem as características dos resíduos. Em terceiro lugar, a reciclagem vai exigir uma mudança na cultura da empresa geradora. Embora dificilmente o resíduo venha a ser o negócio principal, ele terá que ser tratado de maneira dual: como resíduo, por imposição legal; e como produto, pois ele passará a contar com consumidor(es), interessados em prazos, manutenção da qualidade, etc. Em quarto lugar, a maximização dos benefícios da reciclagem do resíduo poderá requerer mudanças no processo de produção ou gestão dos resíduos, de forma a aumentar a *reciclabilidade*<sup>20</sup> (DE SIMONE &

---

<sup>20</sup> No original *recyclability*. E em benefício da concisão esta expressão foi preferida à “capacidade de ser reciclado”.

POPOFF, 1998) ou até mesmo o *mix* de produção. Neste último caso, tem-se o exemplo da sugestão apresentada por um grupo de trabalho inglês de alterar a distribuição de cores das embalagens de vidro produzidas na Inglaterra, de maneira a possibilitar a reciclagem inclusive das embalagens importadas, já que um vidro colorido somente pode ser reciclado para um vidro da mesma cor (DETR, 1999c).

Caso não exista este interesse imediato, o resíduo poderá ser objeto de política pública visando criar condições para reciclagem, inclusive através de dispositivos fiscais (HARTLÉN, 1995). Nesta situação, a pesquisa dirigida explorar as possibilidades de reciclagem poderá ser adotada como uma linha auxiliar às políticas públicas.

## **4.5 DETALHAMENTO DOS DADOS ESTATÍSTICOS DO PRODUTO**

Nesta etapa é necessário confirmar e detalhar os dados sobre a geração do resíduo na empresa ou na região em estudo, conforme o exemplo apresentado por CINCOTTO & KAUPATEZ (1988). Além da quantidade de resíduos anual ou mensal gerada é também importante neste estágio detectar eventual sazonalidade na geração do resíduo e o volume existente em estoque.

A disponibilidade do resíduo vai ser um importante dado para (a) determinar a estrutura necessária para reciclar; (b) definir a tecnologia viável para a reciclagem em função da escala mínima de produção das diferentes opções; (c) estimar a produção máxima do novo material. Disponibilidade reduzida (ALLEN; ROSSELOT, 1994; CINCOTTO 1988) ou sazonalidade são condicionantes importantes de uma estrutura de reciclagem.

Limites de disponibilidade de resíduos gerados por uma empresa podem ser, eventualmente, superados (a) desenvolvendo produtos onde a participação do resíduo na composição final seja pequena; (b) desenvolvendo um projeto integrando o resíduo gerado por diversas empresas; (c) compondo um produto com vários resíduos ou com misturas de resíduos e matérias-primas naturais. A mistura de resíduos com matérias-primas pode, em determinadas condições, espalhar a contaminação ambiental (HARTLÉN, 1995), exigindo, portanto, cuidados especiais. Nos dois últimos casos é fundamental que as distâncias de transporte sejam analisadas, tanto devido ao seu efeito no custo do produto quanto pelo seu impacto ambiental (CINCOTTO; KAUPATEZ, 1986; HARTLÉN, 1995).

Já a sazonalidade da produção, como é o caso de boa parte dos resíduos da agro-indústria, vai exigir a formação de estoques que permitam a unidade de reciclagem operar de maneira contínua, ou o desenvolvimento de um esquema operacional que permita o funcionamento intermitente, por exemplo, utilizando os recursos humanos desmobilizados durante a parada do processo produtivo que origina o resíduo.



Em muitas indústrias a apropriação do volume de resíduos gerados não é feita de maneira detalhada. Assim, uma verificação simplificada pode ser feita através do estudo de fluxo de materiais, ou balanço de massas do processo por um período de tempo determinado (t):

$$R = Mp - Pr - P$$

onde R é a massa dos resíduos

Mp - massa de matérias-primas, descontado os estoques;

Pr – massa de bens produzidos;

P – massa de poluição (gases, vapores, líquidos) liberada;

todos durante um mesmo período de tempo t.

Abordagem semelhante foi empregada por AGOPYAN *et al.* (1999) no estudo de perdas de materiais de construção em canteiros de obra brasileiros. TOLSTOY *et al.*, (1998) utilizaram a metodologia para estimar o volume de resíduos e a composição dos resíduos gerados pela construção civil sueca.

Nesta etapa do trabalho é importante analisar as tendências futuras de mercado do produto que gerou o resíduo e também eventuais tendências de mudanças no processo de produção.

Conforme já mencionado, o volume de geração do resíduo corresponde aproximadamente a uma proporção do volume de produção. Assim, a disponibilidade do resíduo é função da demanda do mercado do produto que o gerou. Disso decorre que o suprimento do resíduo é independente da sua eventual demanda (VRIJLING, 1991). Portanto, disponibilidade de resíduo vai depender das flutuações na demanda do produto final.

Outro fator que deve ser considerado é a possibilidade de mudanças tecnológicas no processo, pois elas podem afetar tanto o volume quanto a natureza do resíduo gerado. Em consequência, o fato de um resíduo estar disponível com determinadas características em determinada quantidade de produção em um determinado momento não oferece garantia qualquer sobre a sua disponibilidade futura, o que introduz adicional risco ao processo de reciclagem. Um bom exemplo da importância do efeito da mudança tecnológica na produção do resíduo é o caso do lodo de tratamento esgoto gerado pela SABESP em São Paulo. Esta empresa prepara atualmente uma mudança dos agentes de coagulação, abandonando a combinação de cal e cloreto férrico por polímeros. Esta mudança é resultado da pesquisa de MIKI (1998), que apontou, entre outras vantagens de processo, uma redução na massa de torta de lodo gerada (após secagem) de até 27%. Além da redução do volume, a composição química será também afetada.

## 4.6 CUSTOS ASSOCIADOS AOS RESÍDUOS

Segundo um levantamento da EPA boa parte das empresas não realizam apropriação direta dos custos ambientais, especialmente porque os sistemas de contabilidade não prevêem esta rubrica (DESIMONE; POPOFF, 1998). Segundo este estudo, os custos ambientais podem chegar até a 20% do custo total. Por via de regra, estão alocados em algum departamento como mais um custo de produtos e processos, o que dificulta a sua identificação. Custos de contingência para atividades de remediação das áreas de deposição, multas ambientais etc. não são consideradas.

Além dos custos de deposição de resíduos é necessário contabilizar os custos de embalagem, pré-tratamentos, transporte, licenciamento ambiental, além de eventuais multas por acidentes ou desrespeito a legislação. Quando o resíduo é comercializado, o eventual faturamento obtido deve ser também apropriado separadamente, assim como a proporção real entre o comercializado e o estocado.

É bastante comum existirem diferenças significativas na destinação e composição de um mesmo resíduo entre diferentes plantas industriais, especialmente se forem localizadas em diferentes regiões. Por exemplo, a escória de alto-forno produzida pela COSIPA em São Paulo é totalmente comercializada, mas o mesmo não acontece em outras regiões, onde a indústria não consegue consumir o total gerado<sup>21</sup>. Assim sendo, os resultados de um estudo em uma indústria ou região não são necessariamente válidos para as demais<sup>22</sup>.

O custo total com a gestão do resíduo é geralmente um bom indicador do interesse da empresa geradora em criar condições para a sua reciclagem. ALLEN e ROSSELOT (1994) demonstram que no mercado norte-americano os resíduos não perigosos possuem uma taxa de reciclagem pequena quando comparada à taxa dos resíduos mais perigosos. Segundo esses autores o alto custo do tratamento e deposição dos resíduos perigosos seria um incentivo importante para a reciclagem. HARTLEN (1995) também considera que um elevado custo de deposição em aterros é fundamental para motivar o gerador do resíduo para fazer a reciclagem, ou para a adoção de medidas para a redução da geração de resíduos.

Além dos custos diretos, existem os custos indiretos como o desgaste da imagem da empresa devido a sua gestão ambiental ineficiente, o que pode levar a conflitos com organizações sociais e a perda de consumidores; esses fatores podem determinar o interesse pela reciclagem (DESIMONE; POPOFF, 1998).

---

<sup>21</sup> Contato pessoal com as equipes de comercialização e gestão de resíduos das grandes siderúrgicas brasileiras.

<sup>22</sup> Esta variabilidade das condições de mercado de um resíduo é um dos problemas da diferenciação entre resíduos e subprodutos, proposta por vários autores, inclusive CINCOTTO (1988).

## 4.7 PROCESSO DE GERAÇÃO, TRATAMENTO E GESTÃO DOS RESÍDUOS

A compreensão do processo que leva a geração do resíduo fornece informações imprescindíveis à concepção de uma estratégia de reciclagem com viabilidade no mercado.

### 4.7.1 Processo industrial que gera o resíduo

Um bom processo de partida para o entendimento do processo industrial é a bibliografia relativa ao processo específico. No entanto, não se pode esquecer que freqüentemente existe mais de um *processo* para a produção de um mesmo bem, além de diferentes versões de um mesmo produto.

Por exemplo, nomes genéricos como escória de aciaria englobam escórias produzidas por pelo menos dois processos diferentes, arco elétrico e oxigênio ou LD, além de uma grande variedade de aços. A variedade de processos e produtos gera escórias de composição muito diferente, com relação  $2 < \text{CaO}/\text{SiO}_2 < 4,5$  e teores variáveis de cal livre (GEISELER, 1996).

As escórias de alto-forno podem ser ácidas ou básicas, de acordo com a relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  que varia entre 0,5 e 1,4. . A basicidade depende de detalhes do processo: processos que empregam carvão vegetal resultam em escórias ácidas ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$ ), enquanto que processos que empregam coque geram escórias mais básicas (JOHN, 1995b). SAKAI e MASAKATSU (1997), LAMERS e BORN (1997) discutem a influência de diferentes tecnologias de calcinação de resíduo sólido municipal nas características da cinza gerada. O teor de potássio na cinza de bagaço de cana é governado pela eficiência do processo de extração do caldo<sup>23</sup>. Dada a especificidade do processo em cada unidade de produção, é fundamental que o estudo inclua uma verificação *in-loco* das condições operacionais.

É também importante investigar a variabilidade das fontes de fornecimento de matérias-primas; é possível operar com matérias-primas bastante variáveis mantendo sob controle as características do produto principal variando, no entanto, a composição dos resíduos. GEISELER (1996) demonstra a influência da variação entre calcário e dolomito como matéria-prima do processo de produção do aço na composição da escória (Tabela 4-2). BEEKES *et al.* (1994) demonstraram que a co-combustão de madeira residual e carvão mineral em caldeiras de leito fluidizado, aumenta a presença de metais pesados nas cinzas volantes.

---

<sup>23</sup> Comunicação pessoal com Prof. Dr. Wesley Jorge Freire (UNICAMP).

**Tabela 4-2 Influência do processo de produção e da matéria-prima na composição de escórias de aciaria Européias (GEISELER, 19996)**

Processo	Fundente	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>tot</sub>	CaO livre
Oxigênio	Calcário	44-55	12-18	<3	<3	<5	<2	14-20	<10
	Dolomito	42-50	12-15	<3	5-8	<5	<2	15-20	<10
Arco elétrico	Calcário	30-40	12-17	4-7	4-8	<6	<1,5	18-28	<3
	Dolomito	25-35	10-15	4-7	8-15	<6	<1,5	20-29	<3

Uma investigação de campo visando estudar o processo de geração de lodo esgoto, realizada na SABESP (São Paulo), revelou a existência de um outro resíduo, constituído principalmente de areia. Nenhuma menção a esta areia, que é separada para a evitar desgaste dos equipamentos, foi encontrada na bibliografia consultada.

#### 4.7.2 Manejo do resíduo

A investigação deverá incluir também o manejo que o resíduo recebe após a sua geração, pois este, freqüentemente, vai afetar as características do produto determinando as possibilidades de aplicação. Mesmo as etapas de *transporte e estocagem*, podem afetar decisivamente a *reciclabilidade*<sup>24</sup> do resíduo (WBCSD, 1998).

No caso da escória de alto-forno, a existência ou não do processo de resfriamento brusco conhecido como granulação, governa a microestrutura do produto – especificamente o seu teor de vidro- com implicações nas possibilidades de aplicação (JOHN, 1995b). Devido a limitações operacionais, em muitas siderúrgicas uma parte variável da escória não é submetida à granulação, gerando-se desta maneira dois resíduos em um só processo. Ainda mais, existem diferentes tipos de granulação: com água e por pelotização (JOHN, 1999). Esta última resulta em um produto granular, de densidade mais baixa. Nesse processo, os grãos de maior diâmetro possuem um teor de vidro menor e são normalmente reciclados como agregados leves, enquanto que os grãos de menor diâmetro, que resfriam mais rápido, possuem um teor de vidro mais elevado sendo utilizados na produção de aglomerantes. As escórias de aciaria normalmente sofrem um processo de beneficiamento por comunicação e retirada das frações metálicas por separação magnética. A eficiência deste processo vai determinar o teor de metal no produto, uma característica importante quando se trata de reciclagem.

Enquanto não houver a intenção de reciclar o resíduo, ele não receberá tratamento de produto<sup>25</sup>, sendo freqüentemente estocado em conjunto com outros, o que pode resultar em

<sup>24</sup> No original *recyclability*.

<sup>25</sup> E muitas vezes, nem mesmo quando existe a intenção de reciclar.

contaminações recíprocas. O tempo de estocagem pode tanto implicar transformações indesejáveis no resíduo, como tornar mais intenso o processo de contaminação.

Nestas condições, a reciclagem dos resíduos pode exigir alterações no processo de manejo. Estas alterações podem ser dificultadas por limitações de espaço na planta, por exigirem investimentos ou até devido a problemas culturais na indústria produtora.

Caso a segregação na geração não seja possível, será necessária a inclusão de uma etapa de classificação das fases na planta de reciclagem. No caso de resíduos pós-consumo o processo de classificação é inevitável. Foi constatado pelo autor durante visita realizada em uma das plantas de Reciclagem de Resíduos Urbanos da cidade de Leeds (Inglaterra) que, quase 50% da equipe estava envolvida na separação manual das fases, apesar dos diversos equipamentos de classificação automática existentes.

CIRELLI (1998) demonstrou que as diferentes fases que fazem parte do resíduo de construção são geradas isoladamente, mas são misturadas posteriormente na caçamba de coleta ou nos equipamentos de transporte. Nesta situação, uma mudança nas condições de manejo dos resíduos no edifício poderia resultar em um resíduo já classificado, facilitando a reciclagem. Atualmente existem várias alternativas para classificar o resíduo em obra, de modo que as principais barreiras são os custos da mudança cultural. SCHLUTMANN *et al.* (1997), de maneira similar, demonstraram a importância dos processos de demolição na presença de contaminantes em agregados de concreto reciclado.

PECHIO & BATTAGIN (1999) mostraram que cimentos produzidos com as escórias granuladas de alto-forno estocadas ao ar livre durante 10 anos resultam em cimentos com resistência mecânica inferior quando comparados àqueles que empregam escórias recém produzidas. A perda do potencial aglomerante se deve tanto à contaminação do produto, constatada através da elevação do teor de resíduos insolúveis, quanto à hidratação superficial dos grãos, medida pela perda ao fogo. Já no caso das escórias de aciaria, o envelhecimento possibilita uma hidratação do CaO e MgO presentes, gerando expansão (MAZUERO, 1997). Quando a hidratação estiver concluída, em um prazo que depende da granulometria e das condições do microclima, o processo expansivo será estabilizado permitindo o emprego seguro das escórias de aciaria..

As possibilidades de remoção do resíduo do local em que ele se encontra depositado é também um aspecto que pode interferir significativamente no custo do processo de reciclagem, se não inviabilizá-lo.

## **4.8 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO**

Na maioria dos casos as informações disponíveis sobre o resíduo são apenas aquelas importantes no controle do processo ou as requeridas pelas agências de controle ambiental. Boa parte das empresas possui resultados de ensaios necessários à classificação do resíduo

segundo a NBR 10004 (Classe I, Classe II ou Classe III). Embora esta informação seja muito importante, ela não é suficiente para uma decisão no processo de reciclagem.

A caracterização do resíduo deve compreender:

- a) análise química completa do produto, inclusive teor de umidade, conteúdo e natureza dos materiais voláteis;
- b) caracterização da sua *microestrutura* – mineralogia de suas fases, porosidade;
- c) características físicas como densidade, dimensões de apresentação (granulometria), viscosidade em líquidos, ponto de fusão;
- d) caracterização ambiental, de acordo com a normalização vigente.

Muitas vezes o prosseguimento da pesquisa vai tornar necessária o aprofundamento da caracterização, de forma que esta etapa deverá ser interativa com as etapas subsequentes.

A seguir serão discutidos com maiores detalhes aspectos considerados mais importantes na caracterização.

#### **4.8.1 Amostragem**

Quando se trata da caracterização de qualquer produto, é fundamental trabalhar com uma amostra representativa.

A NBR 10007 apresenta as condições para amostragem do resíduo em função do seu estado (líquido ou sólido), da forma de estocagem e do objetivo: determinar a composição média ou a variabilidade. A norma ainda fornece sugestões de equipamentos e processos de amostragem. VAN DER VEEN e NATER (1994) alertam para o risco de segregação e discutem técnicas de amostragem específicas para resíduos.

No caso de estudos visando reciclagem, a estimativa da *variabilidade* da composição é importante, pois ela afeta a qualidade do resíduo enquanto matéria-prima. Para esta situação a norma prevê a coleta de uma série entre 3 e 20 amostras. Mas, como se trata de estudo visando a reciclagem e não a classificação do resíduo para deposição em aterro, a obtenção de uma amostra representativa da produção pode exigir amostragem mais complexa. Em certos casos é necessário realizar um processo de amostragem abrangendo um tempo de produção mais longo, visando inclusive detectar efeito da variação das matérias-primas.

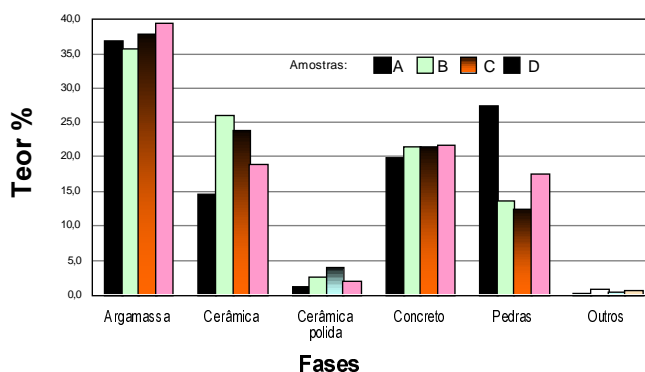
Do ponto de vista estatístico é também importante garantir que a amostra seja aleatória (BOX *et al.*, 1988).

A título de exemplo da importância da amostra representativa devido às condições extremas de variabilidade que alguns processos podem atingir, a Tabela 4-3 apresenta a variabilidade da composição química da escória de aciaria da USIBA (Salvador, BA) durante um dia de produção.

**Tabela 4-3** Variabilidade da composição da escória de aciaria (arco elétrico) durante um dia de produção (%). Dados fornecidos pela USIBA (Salvador, BA)

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Max.	58,56	28,42	6,41	9,87	0,5	32,94	5,03	0,844	0,244	0,508
Min.	34,12	14,98	2,38	6,69	0,33	0,98	0,08	0,318	0,00001	0,045

ZORDAN (1997) estudou a variabilidade da composição dos agregados produzidos na central de reciclagem de Ribeirão Preto e a Figura 4-1 resume os resultados. A variabilidade pode ser considerada pequena em comparação à da composição da escória de aciaria apresentada anteriormente, especialmente se considerarmos que a origem do entulho processado é desconhecida. Esta menor variabilidade é em parte resultado do processo de homogeneização durante o estoque e britagem do entulho.



**Figura 4-1** Variabilidade da composição dos agregados produzidos na central de reciclagem de Ribeirão Preto (ZORDAN, 1997)

## 4.8.2 Análise química

A caracterização química pode ser feita através de uma variedade de técnicas analíticas, como ensaio por via úmida, espectroscopia, entre outros. A seleção da técnica mais apropriada para cada determinação deve ser realizada por um profissional especializado em química analítica.

É fundamental que a análise dos resíduos seja realizada de forma completa, incluindo metais pesados bem como as demais espécies listadas na NBR 10004 classificadas como nocivas. A seleção das espécies a serem investigadas vai depender do conhecimento do processo de geração do resíduo. Uma caracterização simplificada da cal da Solvay não revelaria a presença da dioxina, cuja concentração é da ordem de ppb. Somente um profissional especializado capaz de relacionar o processamento de cloro com a geração do contaminante poderia ter detectado a sua presença no resíduo.

Estudo recente mostra que as cinzas volantes, dependendo do tipo do carvão que lhe dá origem e das condições de processo, podem apresentar teores de Cd, Ge, Mo, Pb capazes de provocar contaminações ambientais significativas quando recicladas (MEIJ, 1997).

A caracterização deve incluir também o teor de voláteis, bem como a natureza dessas fases, pois o controle da presença de compostos orgânicos voláteis é fundamental para o processo. Processos simplificados de determinação de voláteis sem a determinação da composição dos gases, como o método de perda ao fogo, somente são admissíveis quando há informação suficiente sobre o resíduo.

No caso de resíduos de demolição, a necessidade de caracterização vai depender tanto da localização, quanto da função da obra que gerou o resíduo. HANSEN (1996) relatou a presença de elementos radioativos, cloretos, entre outros, dependendo da origem do resíduo de demolição

### 4.8.3 Caracterização da microestrutura

A caracterização da microestrutura dos resíduos sólidos é tão importante quanto a sua caracterização química.

Alguns resíduos podem conter fases metaestáveis e sofrer alterações alotrópicas que geram expansão. Outras fases podem reagir com elementos do meio ambiente aumentando de volume. Por exemplo, nas escórias descritas na Tabela 4-3, uma parcela do CaO se encontra nas formas de óxido de cálcio e em uma das formas alotrópicas do  $C_2S$  que são espécies potencialmente expansivas. Outra parcela do CaO está combinada em formas mineralógicas estáveis, como o silicato tricálcico (GEISELER, 1998).

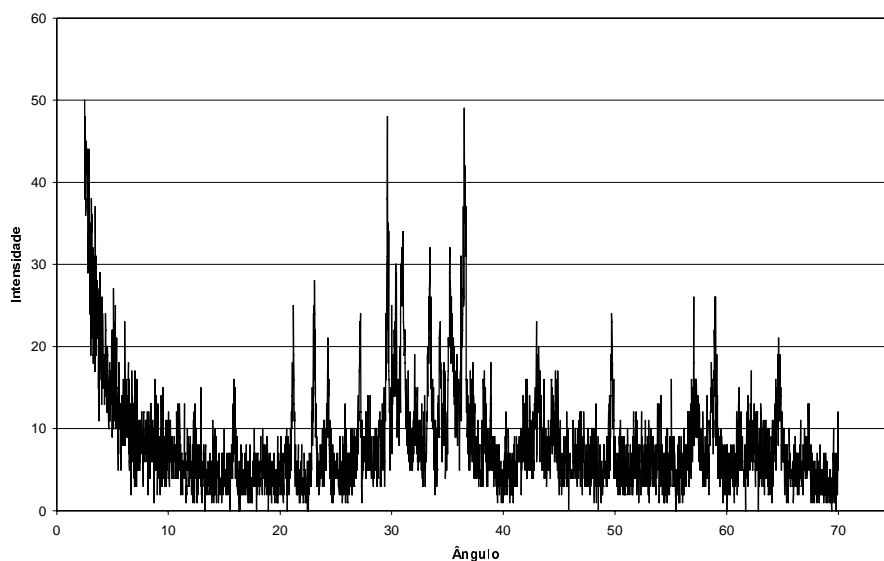
A Figura 4-2 apresenta a difração de Raios X de resíduo de serviços de saúde tratados em tocha de plasma e resfriados lentamente<sup>26</sup>. As condições de interpretação do difratograma são difíceis, uma que vez inexistem informações disponíveis sobre esse resíduo. Análise do difratograma revela a presença de  $NaAlSiO_4$  (Nefelina),  $CaFeSiO_4$  (Kirschsteinita),  $FeAl_2O_4$  (Hercynite), e periclásio (MgO) e, possivelmente,  $K_{0,29}Ca_{5,8}Al_{18,7}Si_{4,15}$ ,  $Ca(Fe_{1,4}Al_{0,6})SiO_6$  além de fases amorfas ou cripto-cristalinas. Este mesmo resíduo, se resfriado rapidamente em água, assume estrutura predominantemente amorfa ou cripto-cristalina. Como o estudo investiga a possibilidade de reciclagem do resíduo cerâmico como agregado para concreto, a estabilidade dimensional do resíduo é requisito fundamental. Neste sentido, a identificação de periclásio – óxido potencialmente expansivo – traz a suspeita de risco de expansão por hidratação. A presença de fases mal cristalizadas, a base de sílica, permite sugerir a existência de risco de reação álcali-agregado. Estes aspectos passariam despercebidos se a caracterização fosse limitada à análise química.

A determinação quantitativa das fases mineralógicas de materiais artificiais como os resíduos pode ser complexa. A interpretação de difrações de Raios X das escórias de aciaria, por exemplo, são extremamente difíceis, inclusive porque as fases encontram-se mal cristalizadas.

---

<sup>26</sup> Esta investigação está sendo conduzida em conjunto com o Dr. Roberto N. Szente, do IPT.





**Figura 4-2 Exemplo de difração de Raios X de resíduo de serviços de saúde calcinado em tocha de plasma e resfriado lentamente.**

O teor de vidro é determinante na reciclagem de escórias e cinzas, sempre que se pretende reciclagem como aglomerante. Ele pode ser analisado por microscopia óptica ou por difração de Raios X. Aspectos como porosidade e morfologia também podem ser muito importantes.

#### **4.8.4 Classificação ambiental do resíduo**

Caso a caracterização ambiental do resíduo nos termos da série de normas NBR 10004 não esteja disponível, é imprescindível realizá-la, uma vez que alguns tipos de resíduos perigosos estão sujeitos a restrições de manejo, o que pode dificultar muito a sua reciclagem.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados de ensaios de lixiviação de alguns resíduos do mercado brasileiro. Os dados sobre lixiviação das escórias são resultados de estudo que o Instituto Brasileiro de Siderurgia realizou no conjunto das escórias brasileiras. Os valores apresentados são relativos às maiores concentrações obtidas. Os resultados demonstraram que as escórias não podem ser consideradas resíduos perigosos (classe I). No entanto, as escórias não podem ser consideradas resíduos inertes uma vez que a água resultante do ensaio de solubilização não atende os critérios de dureza e pH. Já as cinzas de queima de resíduo hospitalar em incineradores convencionais são classificadas como resíduo perigoso (classe I). No entanto, dados do IPT demonstram que se essa cinza for calcinada em forno de plasma, a altas temperaturas, a concentração das espécies solúveis são reduzidas para valores muito abaixo dos limites da norma.

**Tabela 4-4 Alguns resultados do ensaio de lixiviação realizado em resíduos brasileiros.**

	Escórias			Cinzas de resíduo hospitalar	Padrão NBR 10004
	Alto Forno	Aciaria LD	Aciaria Elétrica		
Arsênio	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,15	5,0
Bário	0,1 – 4,0	0,3 – 5,0	0,9 – 6,0	Nd	100,0
Cádmio	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,15	0,5
Chumbo	< 0,05	< 0,05 – 0,3	< 0,05 – 0,3	4,80	5,0
Cromo total	< 0,02	< 0,02 – 2,3	< 0,02 – 1,0	0,65	5,0
Mercúrio	< 0,001	< 0,001	< 0,001	Nd	0,1
Prata	< 0,01	< 0,01	< 0,01	Nd	5,0
Selênio	< 0,5	< 0,5	< 0,5	Nd	1,0
Fluoretos	< 0,1 – 2,6	1,1 – 42,8	1,0 – 56,7	Nd	150,0
Cobre	nd	nd	nd	0,11	2,0
Zinco	nd	nd	nd	0,5	2,0
Mercúrio	nd	nd	nd	<0,01	0,02

## 4.9 SELEÇÃO DAS APLICAÇÕES A SEREM DESENVOLVIDAS

Como regra geral, as aplicações possíveis são aquelas que melhor aproveitam as características físico-químicas que o resíduo apresenta. Assim, a aplicação do resíduo não deve ser feita em torno de idéias pré-concebidas.

Esta etapa requer criatividade (BCSD-GM, 1997) e uma grande variedade de conhecimentos técnicos, científicos e de mercado, exigindo o envolvimento de uma equipe realmente multidisciplinar. Mesmo no caso de resíduos que disponham de tecnologias de reciclagem bem estabelecidas, é possível e desejável buscar outras opções. CATALFAMO *et al.* (1997), por exemplo, sugerem a aplicação das cinzas volantes na produção de zeólitas, capazes de absorver metais pesados em estações de tratamento de resíduos. SILVA *et al.* (1996) discutem novas aplicações para os cimentos de escória de alto-forno. VAN LOO (1998) analisa uma nova possibilidade de reciclagem integral do RDC, onde após a britagem, os agregados são submetidos a calcinação entre 650 a 700°C. Esta temperatura causa a decomposição dos produtos hidratados e a desagregação da pasta de cimento, inclusive devido à expansão do quartzo. Esta tecnologia permite reciclar a fração grossa como agregado e as partículas finas como aglomerante.

Do ponto de vista da empresa geradora do resíduo a existência de um maior número de aplicações é importante porque permite: (a) minimizar riscos de perder o mercado; (b) criar alguma competição pelo resíduo, o que maximiza as possibilidades de obtenção de benefícios

financeiros (JOHN, 1995b). A diversificação dos mercados e dos usos da escória de alto-forno é um dos objetivos da indústria siderúrgica brasileira hoje.

A Figura 4-3 resume de uma forma simplificada e linear o fluxograma para a seleção de alternativas para a reciclagem. Na prática, o processo provavelmente será muito mais interativo que o sugerido pelo fluxograma.

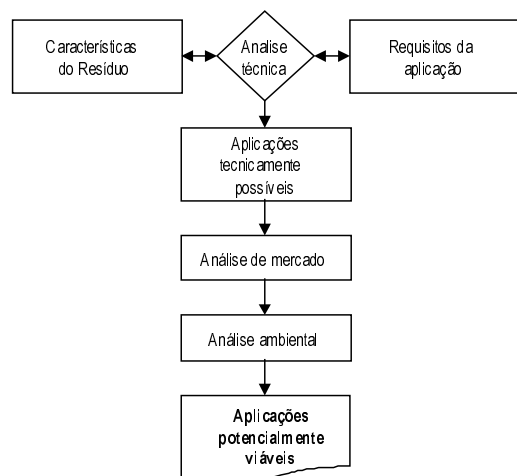


Figura 4-3 Esquema geral para a seleção de alternativas para reciclagem

#### 4.9.1 Seleção de alternativas tecnicamente viáveis

Este processo consiste na comparação sistemática das características físicas e químicas do resíduo, ou de uma das suas fases, com os requisitos necessários para as diferentes aplicações. Desde que mantida a composição do resíduo, essa análise é de um grau de universalidade significativo, enquanto as etapas seguintes, mercado e ambiente, atendem a uma agenda de caráter mais local.

Devido a grande variedade de conhecimentos necessários à seleção de aplicações, é particularmente interessante o desenvolvimento de ferramentas computadorizadas para auxiliar na solução. FONSECA *et al.* (1997) apresentam um sistema especialista que foi desenvolvido para analisar a possibilidade de reciclagem de resíduos em pavimentação.

Sistema especialista é um *software* baseado em regras formuladas por especialistas no assunto e consolidadas em uma base de conhecimento. Além desta base de conhecimento, o sistema especialista possui um banco com as soluções das análises já realizadas, permitindo o sistema se auto-aperfeiçoar. E finalmente, o programa de inferência, que analisa o problema a partir do conhecimento disponível na base de conhecimento e no banco de soluções. O programa de inferência deve possuir a capacidade de resolver conflitos em um processo interativo (FONSECA *et al.*, 1997). Mais adiante, a título de exemplo, serão apresentadas algumas regras simplificadas para seleção de resíduos visando a reciclagem como aglomerantes hidráulicos e

agregados. Regras desta natureza necessitam ser desenvolvidas para permitir a criação de sistemas especializados.

Em alguns casos, onde o resíduo é constituído de mais de uma fase, é necessário analisar tanto a possibilidade de reciclar o resíduo integralmente, quanto após a separação nas suas diferentes fases. A *separação de fases* de resíduos é sempre indesejável porque é uma fonte adicional de custo e de impacto ambiental, já que na maioria das vezes ela implica na geração de um novo resíduo, embora em menor volume. Assim, recomenda-se que sejam estudadas alternativas à classificação, podendo-se destacar as seguintes possibilidades de (a) modificar o manejo do resíduo na fase de produção; (b) promover coleta seletiva; (c) modificar as tecnologias de desmontagem dos produtos (LAURITZEN, 1998); e (d) modificar o processo de produção (DE SIMONE; POPOFF, 1998). Segundo HANSEN (1996) a demolição controlada de um edifício de maneira a facilitar a reciclagem do concreto como agregado é 25% mais cara do que a demolição tradicional, o que reforça a importância de projetar para a demolição (CRAVEN *et al.* 1996) ou “desconstrução”<sup>27</sup> (WYATT e GILLEARD, 1994).

Na prática os processos de separação de fases de resíduos são muito comuns. No caso da escória de aciaria a separação das fases contendo elevados teores de metal é rotineira. O processo de classificação é bastante simples e envolve inclusive a descarga do pote de transporte da escória líquida em duas etapas. No primeiro basculamento é derramada a parcela superficial da escória líquida – que apresenta menor densidade e, portanto, menor teor de metal. Já no segundo basculamento, derrama-se o fundo do pote, que contém uma mistura muito rica em metal. O produto endurecido do primeiro basculamento é a seguir britado e passa por separação magnética, reduzindo ainda mais o conteúdo de metal resultante. As frações ricas em metal são recicladas dentro do processo da siderúrgica.

Centrais de reciclagem de produção de agregados a partir de RCD possuem vários processos de segregação de fases. Em um primeiro momento a inspeção visual da carga de resíduos decide se o nível de contaminação é elevado. A fração aceita para a reciclagem é submetida a dois processos separação. A separação de contaminantes orgânicos pode ocorrer antes da britagem, como em Belo Horizonte, ou após o processo de britagem. Na central de reciclagem de Prefeitura de São Paulo a separação é manual e ocorre após a britagem, sobre uma esteira de transporte. Já na Europa, a remoção de contaminantes orgânicos é feita por diferença de densidade em um tanque de flotação (QUEBAUD e BUYLE-BODIN, 1999) ou por separação aérea (MÜELLER e WINKLER, 1998). A separação das frações ferrosas é feita por imã permanente ou acionado por eletricidade, sempre após a britagem (QUEBAUD e BUYLE-BODIN, 1999; MÜELLER e WINKLER, 1998). Esta combinação de processos de classificação e separação permite produzir agregado de composição constante (QUEBAUD; BUYLE-BODIN, 1999). Existe ainda uma terceira etapa possível, onde as

---

<sup>27</sup> No original *deconstruction*.

fases minerais presentes no entulho são parcialmente separadas segundo a sua densidade através fluxos verticais de água (KOHLENER; KURKOWSKI, 1998).

Uma outra alternativa é classificar o resíduo conforme o nível de contaminação, associando a cada classe uma aplicação diferenciada. Este é o procedimento adotado na normalização Européia que classifica os agregados reciclados de RCD de acordo com a sua densidade (KOHLENER; KURKOWSKI, 1998), uma vez que as cerâmicas e argamassas possuem menor densidade do que as rochas naturais. O teor máximo de substituição do agregado natural por agregado de RCD é determinado em função da classe de resistência, do tipo de aplicação do concreto e da densidade do agregado reciclado.

#### **4.9.1.1 Exemplo: Agregado para aglomerantes inorgânicos**

A reciclagem como agregado é certamente das mais comuns e flexíveis, uma vez que existem muitas aplicações possíveis para diferentes tipos produtos.

Os requisitos para que um agregado seja empregado podem ser resumidos em:

- a) apresentar forma granular ou poder ser transformado para a forma granular, preferencialmente cúbica ou esférica;
- b) apresentar estabilidade dimensional quando embebido no aglomerante ao longo do tempo e durante ciclos de molhagem e secagem;
- c) apresentar baixa solubilidade em água;
- d) resistir aos esforços da mistura.

Aspectos como granulometria, forma, porosidade, densidade – e seus efeitos na trabalhabilidade-, resistência mecânica, resistência à abrasão e natureza – orgânica ou inorgânica – irão, provavelmente, delimitar sub-áreas de aplicação em que o produto possa vir a ser aplicado.

#### **4.9.1.2 Exemplo: Aplicação na produção de aglomerantes hidráulicos**

O potencial aglomerante de alguns resíduos industriais de processos térmicos como a cinza volante da calcinação do carvão, escória granulada de alto-forno e cinzas de casca de arroz já é conhecido. No entanto, outros resíduos podem vir a ser reciclados.

Admitindo-se que a produção de aglomerantes a partir dos resíduos será feita pela mistura destes com um ativador alcalino, como o cimento Portland, cal hidratada, gipsita, silicatos e carbonatos de sódio, entre outros, para um resíduo apresentar potencial aglomerante ele deve:

- a) ser composto predominantemente por matéria inorgânica, contendo predominantemente cálcio, silício e alumínio, podendo conter ferro e outras espécies químicas em menor teor;
- b) apresentar-se na forma de um pó ou poder ser transformados em pó;

- c) apresentar-se no estado predominantemente anidro, ou seja, não apresentar água combinada pelo fato de ser oriundo de processo térmico (calcinação de materiais com a produção de cinzas ou processos de refinamento de metais);
- d) apresentar alguma solubilidade em água ou água com elevado pH, liberando calor durante este processo;
- e) apresentar silício como constituinte principal, apresentar-se na forma vítrea e ter capacidade de consumir cálcio quando testado no ensaio Chapelle.

Caso o produto apresente matéria orgânica pode ser empregado no processo de geração produção de cimento, fornecendo energia, sendo empregado como matéria-prima (KIHARA, 1999), ou ainda na combinação do processo de geração de energia com a produção de cinzas pozolânicas (JOHN *et al.*, 2000).

Desde que atendidas essas regras, provavelmente o resíduo apresentará potencial aglomerante. Caso a utilização como aglomerante seja considerada viável do ponto de vista econômico, com poucos ensaios adicionais pode-se avaliar a extensão deste potencial.

Estas regras encontram-se detalhadas por JOHN *et al.* (2000).

#### 4.9.2 Seleção da(s) alternativa(s) para pesquisa e desenvolvimento

A gama de aplicações possíveis da maioria dos resíduos é certamente bastante variada, sendo necessário concentrar as pesquisas nas alternativas consideradas mais viáveis em termos de desempenho técnico, dos impactos ambientais, da viabilidade de mercado e dos aspectos sociais.

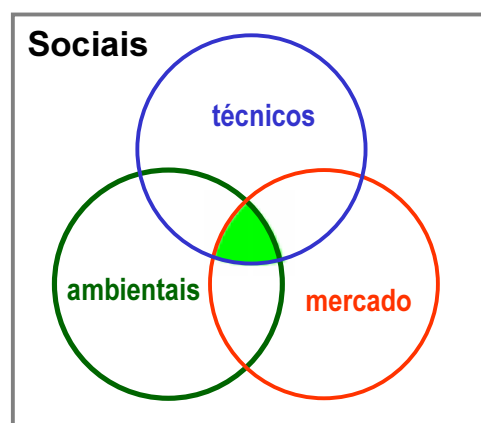


Figura 4-4 Combinação de aspectos necessários para garantir o sucesso de uma tecnologia de reciclagem (adaptado a partir de NEMMERS, 1997).

Do ponto de vista ambiental as alternativas de reciclagem devem permitir um menor impacto ambiental global na sociedade. Toda a análise dos impactos ambientais deve ser feita em termos de berço ao túmulo. Nesta etapa ainda não existem dados suficientes para uma análise

do ciclo de vida quantitativa, nos termos clássicos. No entanto, na maioria das vezes é possível para especialistas nos diferentes processos organizar a lista de aplicações viáveis em ordem crescente de impacto ambiental. ONG *et al.* (1999) propõem um modelo de pré-análise do ciclo de vida semiquantitativo, adequado a orientar decisões no processo de pesquisa e desenvolvimento. Apesar das imprecisões, é frequentemente possível descartar alternativas que, mesmo sendo tecnicamente viáveis, apresentam um impacto ambiental obviamente superior. Maiores detalhes sobre a análise do impacto ambiental da reciclagem são encontrados no item 4.12.

O segundo critério é o de viabilidade no mercado, nesta etapa ainda considerados em termos semiquantitativos ou qualitativos. Ele envolve tanto aspectos financeiros (mais detalhes no item 4.13) quanto aspectos de introdução da tecnologia no mercado.

Algumas regras gerais podem ser propostas para ajudar na seleção das aplicações mais adequadas. A princípio, serão consideradas mais favoráveis alternativas que:

- a) minimizem a necessidade de separação, classificação e transformação industrial do resíduo;
- b) minimizem as distâncias de transporte do resíduo até a planta de transformação e da planta até o mercado consumidor;
- c) minimizem o risco de lixiviação ou volatilização de eventuais fases perigosas presentes, preferencialmente em aplicações onde não tenham contato com seres humanos ou lençol freático;
- d) resultem em produto reciclável;
- e) resulte em um novo produto com vantagem competitiva potencial sobre os existentes no mercado, além do preço.

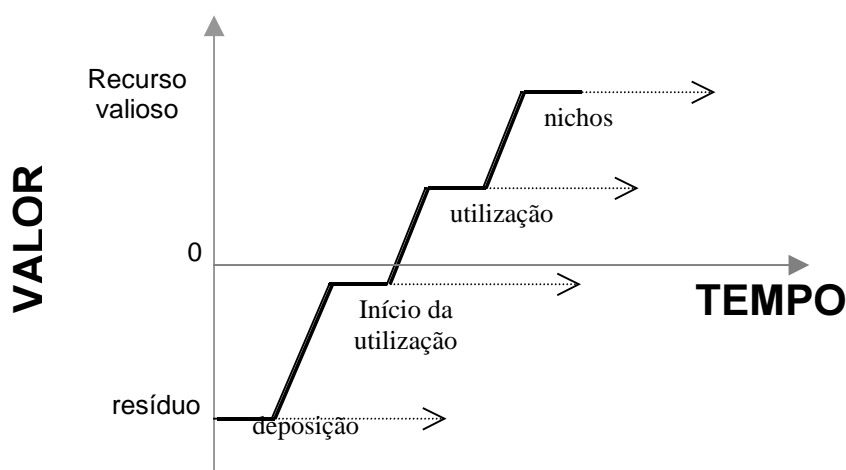
Como uma primeira aproximação, a reciclagem ideal é aquela na qual o resíduo é utilizado como produto final ou matéria-prima sem qualquer beneficiamento e com distância de transporte mínima. Atividades industriais requerem energia e geram resíduos sólidos e poluição atmosférica e aquática. Além disso, a redução das atividades industriais resulta potencialmente em uma redução no volume de investimentos para viabilizar a reciclagem, aspecto que pode ser crítico na viabilidade econômica e transferência da tecnologia.

As distâncias de transporte, além de implicarem em custos significativos, causam também impactos ambientais não desprezíveis. Adicionalmente, existem dificuldades legais para o transporte de resíduos.

A *reciclabilidade* do novo produto é garantia da possibilidade do novo produto não se converter, ao final da sua vida útil, em um resíduo (DE SIMONE; POPOFF, 1998). O novo produto muito provavelmente será composto pelo resíduo e outros materiais, resultando em uma massa final maior do que a massa de resíduo que nele foi empregado como

matéria-prima. Assim, caso o novo produto não seja reciclável, paradoxalmente uma atividade de reciclagem estará provocando um aumento do volume de resíduos gerados pela sociedade a longo prazo.

É muito importante que o novo produto apresente vantagem competitiva com relação ao concorrente tradicional, porque este pode ser um fator decisivo para o seu sucesso no mercado. DAY e WENSELY (1989) definem vantagem competitiva como sendo algo que (a) reduza o custo do produto com relação a um produto de mesmo desempenho ou (b) resulte em um produto de desempenho mais elevado e menor relação custo/benefício. Na opinião de CORNELISSEN (1997), uma das razões para o crescimento na utilização de cinzas volantes como adição aos cimentos Portland no mercado Europeu é a existência de vantagens competitivas tais como (a) melhoria da durabilidade – particularmente controle da reação álcali-agregado, redução da difusividade de íons cloreto e aumento da resistência a sulfatos; (b) redução do calor de hidratação; (c) aumento da trabalhabilidade e (d) ganho de resistência a longo prazo. A partir desse estudo de caso o autor propõe o esquema da Figura 4-5. Neste modelo o ganho de valor do produto, cinza volante, ocorreu com o decorrer do tempo, na medida em que se consolidou no mercado e prosseguiu com o desenvolvimento de nichos de aplicação, onde apresenta vantagem competitiva.



**Figura 4-5 Ganho de valor das cinzas volantes no decorrer dos estágios da sua utilização (CORNELISSEN, 1997).**

Idealmente é desejável identificar uma aplicação onde não exista concorrentes diretos, mas esta situação é difícil de ser atingida na maioria dos casos. Um exemplo desta estratégia é a apresentada por AGOPYAN e JOHN (1994), JOHN (1995b) que demonstram ser possível reciclar a escória granulada de alto-forno para a produção de cimentos de baixa alcalinidade da água de poro, através da seleção e controle do teor do ativador. Conseqüentemente, os autores e seus colaboradores vêm desenvolvendo aplicações destes cimentos de baixa alcalinidade como matriz para fibras sensíveis à álcalis, como as fibras vegetais e as fibras de vidro E, nas quais o cimento Portland não pode ser empregado. Para JOHN (1995b), o desaparecimento dos cimentos de escória sem clínquer do mercado no final dos anos 1940 é



decorrência da falha em desenvolver um nicho de mercado onde este cimento apresentasse vantagem competitiva. Assim, os cimentos de escória sem clínquer, de crescimento de resistência mais lento, foram forçados a competir no mercado com o cimento Portland, tendo como única vantagem o menor preço.

É conveniente que outros aspectos relativos ao mercado também sejam analisados qualitativamente, como capacidade do mercado de absorver o novo produto, possibilidade e conseqüências de eventuais mudanças no preço do produto concorrente para defender o mercado cativo.

LAURITZEN (1998) descreve as condições de mercado onde a reciclagem do entulho como agregado pode ser lucrativa. No modelo proposto pelo autor, o grau de industrialização do país ou região não é determinante, mas sim o tamanho das cidades e a disponibilidade do produto natural. De forma geral grandes cidades apresentam potencial de reciclagem lucrativa, especialmente se os agregados forem escassos (Tabela 4-5).

**Tabela 4-5 Avaliação da potencialidade de reciclagem de agregados em função de alguns parâmetros geográficos. A escala de reciclabilidade varia de 1 a 4, onde 1 identifica localização onde a reciclagem é duvidosa até 4 onde ela é potencialmente lucrativa (LAURITZEN, 1998).**

População	Recursos naturais	Industrialização	Escala	Exemplo
Alta	Adequados	Alta	3	Grandes cidades
Alta	Adequada	Baixa	3	Mega cidades 3º mundo
Alta	Escasso	Alta	4 (lucro)	Amsterdã
Alta	Escasso	Baixa	4 (lucro)	Bangladesh
Baixa	Adequada	Alta	2	
Baixa	Adequada	Baixa	1 (duvidosa)	

#### **4.9.2.1 Análise hierárquica**

A seleção da alternativa com maior potencial de viabilidade pode também se utilizar da ferramenta de análise hierárquica, que é uma ferramenta de decisão adequada a situações com grande número de variáveis, de natureza diferente, inclusive combinando variáveis quantitativas com qualitativas.

Esta ferramenta, muito utilizada na metodologia de análise do ciclo de vida (LIPPIATT, 1998), foi desenvolvida por SAATY (1998) e atualmente possui inúmeras variantes, sendo inclusive consolidada na ASTM 1765-1988.

Ela é baseada na comparação da preferência das diferentes alternativas, duas a duas, A e B, frente a cada critério de seleção, por exemplo, expectativa de consumo de energia durante a transformação do resíduo em material de construção. Se existem dados numéricos, a comparação pode ser expressa em termos numéricos: a alternativa A consome  $x$  vezes mais

energia que B. Quando valores numéricos não estão disponíveis, esta comparação pode ser realizada qualitativamente tendo por base a escala:

- A tem mesma importância que B            1
- A levemente mais importante que B        3
- A mais importante que B                    5
- A muito mais importante que B            7
- A extremamente mais importante que B    9

Para manter a consistência quando A é muito mais importante que B, o que resulta na nota 7, o inverso, B é muito menos importante que A, e a nota deveria ser 1/7. O controle desta consistência é relativamente fácil mas a consistência entre comparações indiretas: A x B, B x C e C x A é mais complexa, no entanto, já existem no mercado *softwares* capazes de realizar a análise.

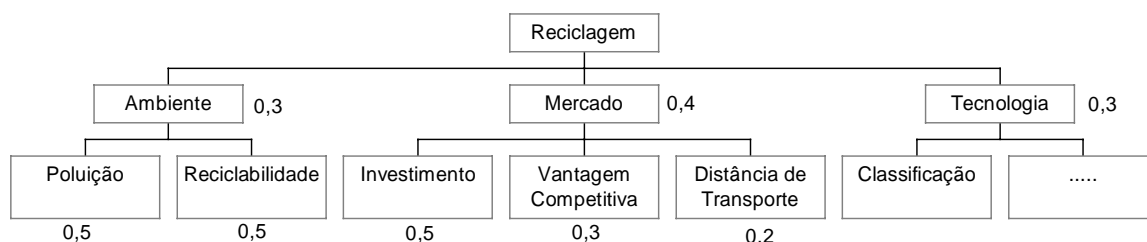
Com o resultado da comparações é possível construir matrizes de decisão, como a da Figura 4-6 e avaliar a consistência da avaliação. A alternativa que apresentar proporcionalmente um maior número de pontos dentro do total atribuído – no caso a alternativa B - é considerada a mais adequada segundo o critério em questão.

	Alternativa A	Alternativa B	Total da linha (TI)	Importância relativa
1 Alternativa A	1,00	1/2	1,5	0,33
2 Alternativa B	2,00	1,00	3,0	0,67
<b>Total geral</b>			<b>4,50</b>	<b>1,00</b>

**Figura 4-6 Exemplo de matriz de decisão baseada na metodologia de análise hierárquica.**

Quando o número de variáveis analisadas é muito grande, é recomendável construir uma árvore de decisão, reunindo as variáveis em grupos relacionados hierarquicamente. A Figura 4-7 apresenta um esboço de hierarquia para a seleção das alternativas de investigação. Os valores próximos aos boxes são os pesos relativos (hipotéticos, neste exemplo) entre as variáveis, estabelecidos pelo processo de comparação duas à duas, conforme descrito anteriormente. Observa-se que o somatório das variáveis subordinadas a uma variável

superior é sempre 1. Ambiente, Mercado e Tecnologia são as 3 variáveis subordinadas à Reciclagem. O somatório dos pesos relativos é um.



**Figura 4-7 Modelo hipotético de hierarquia para a seleção de alternativas para reciclagem**

Naturalmente este tipo de ferramenta de decisão é dependente da escala adotada – existem outras escalas propostas – e da lucidez do julgamento. No entanto, tem como vantagem o fato de permitir integrar em um julgamento único variáveis tão diversas como impacto ambiental e análises econômicas, combinando-se comparações numéricas com qualitativas.

## 4.10 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

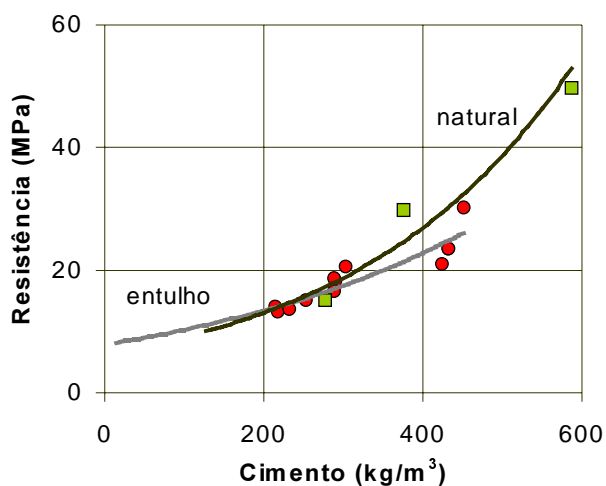
O desenvolvimento do produto a partir do resíduo selecionado compreende as etapas de pesquisa laboratorial para o desenvolvimento de tecnologia básica, seguido do desenvolvimento da tecnologia aplicada que envolve o processo de produção e ferramentas de gestão e controle da qualidade. Finalmente, um estágio de pré-produção ou produção em escala semi-industrial é recomendável para o refinamento do produto (JOHN & CAVALCANTE, 1996).

Nesta fase um conceito importante é o da engenharia simultânea<sup>28</sup>, onde são analisados simultaneamente o desenvolvimento da tecnologia, o desempenho do novo produto, aspectos relativos a manutenção, confiabilidade, *marketing* e aspectos ambientais, todos do berço ao túmulo (SWINK, 1998).

No desenvolvimento da tecnologia básica é fundamental investigar os limites de desempenho da matéria-prima, inclusive devido a variabilidade. ZORDAN (1997) estudou os limites de resistência quando se produz concretos utilizando agregados de RCD de composição mista (Figura 4-1) produzidos pela central de reciclagem de Ribeirão Preto. No trabalho foram retiradas 3 amostras de agregados em datas diferentes. Como referência foram adotados agregados convencionais. Com as amostras de agregado reciclado (3) e natural (1) foram confeccionados concretos com trabalhabilidade constante e com traços 1:3, 1:5 e 1:7. A Figura 4-8 é uma nova interpretação dos dados e permite concluir que, para resistências à compressão inferiores a cerca de 12 MPa, é possível produzir concretos de mesma

<sup>28</sup> Em inglês *concurrent engineering*.

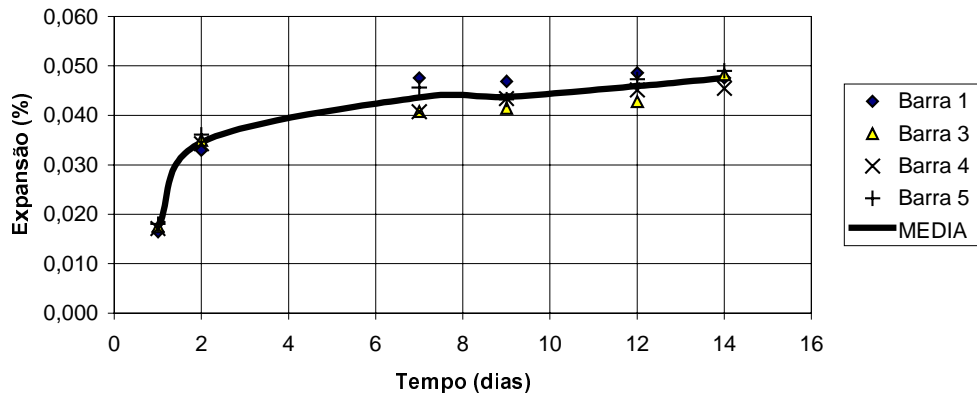
resistência com consumo de cimento inferior ao obtido com agregado natural. Para resistências superiores o estudo torna evidente que é necessário realizar alguma classificação do agregado, removendo as frações mais frágeis, como argamassas e cerâmicas. A diferença de resistência entre os três lotes de agregado reciclado chegou a 30% para o traço mais rico, 1:3, mas pode ser considerada dentro do limite da variabilidade de ensaio para o traço 1:7.



**Figura 4-8 - Comparação entre a resistência à compressão aos 28 dias de concretos com agregado de resíduo de construção (3 amostras) versus concretos contendo agregados naturais. A trabalhabilidade foi mantida constante e foram moldados os traços 1:3, 1:5 e 1:7.**

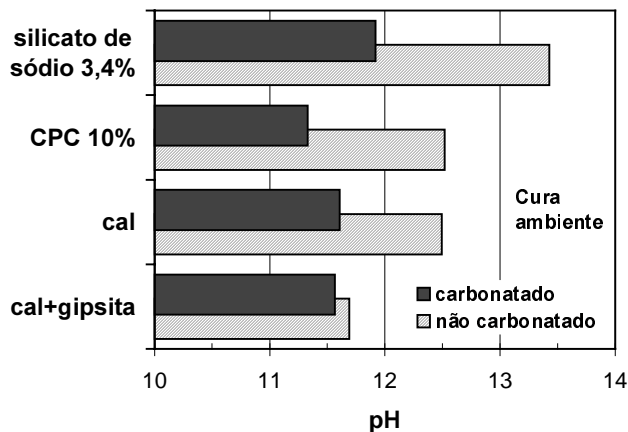
Do ponto de vista dos materiais, o desenvolvimento do produto deve ser feito através do método científico (JOHN, 1996), de forma a reduzir a incerteza. O comportamento do produto e o efeito das variáveis do processo deve ser explicado através da sua microestrutura – composição química, mineralógica, porosidade etc. - e das características físicas. As principais reações químicas envolvidas devem ser entendidas. A compreensão científica do novo produto é fundamental também na avaliação da sua durabilidade, em suas diferentes situações reais de uso, conforme será discutido adiante.

Conforme já citado, no caso do estudo de reciclagem da cerâmica produzida pelo tratamento em plasma dos resíduos de serviços de saúde como agregado para concreto, existiam duas suspeitas de expansibilidade: reação álcali-agregado e hidratação do MgO. Para avaliar o risco destas expansões foi utilizado o método ASTM C 1260/94, projetado para avaliar a reação álcali-agregado. Como o ensaio envolve exposição de barras de argamassa à solução aquosa na temperatura de 80°C, ele permite avaliar simultaneamente os dois riscos de expansão. Os resultados resumidos na Figura 4-9, demonstram que a expansibilidade medida é inferior à metade do limite de expansibilidade que leva o concreto a fissuração, limite esse sugerido pela norma como sendo 0,1%. Sob este ponto de vista a utilização do produto como agregado é possível.



**Figura 4-9 – Expansibilidade de argamassas com agregado de cerâmica produzida pela calcinação de resíduo de serviços de saúde, quando expostas a temperatura de 80°C a uma solução de NaO (ASTM C 1260/94)**

Nesta etapa de investigação é importante identificar possíveis nichos onde o novo produto possa apresentar vantagens competitivas em relação aos tradicionais. No caso da reciclagem da escória de alto-forno como aglomerante, existe a possibilidade de variar a natureza química do ativador, a concentração do ativador e as condições de cura, produzindo cimentos com composições e desempenhos muito diferentes. A Figura 4-10 mostra alguns dados que confirmam esta possibilidade especialmente pela combinação de alguns ativadores (cimento Portland comum, cal hidratada e misturas de cal e gipsita) aliada à carbonatação, considerada parte do processo de produção.



**Figura 4-10 Influência dos ativadores e da carbonatação na alcalinidade da água do poro extraída sob alta pressão..**

No entanto, o conhecimento científico do produto não é suficiente para garantir o sucesso no mercado: o produto, quando integrado ao edifício, deve também atender às necessidades dos usuários ou, em outras palavras, adequar-se ao seu objetivo funcional e estético.

A ferramenta de avaliação de desempenho, detalhada no item 4.11.1, é bastante útil na tomada de decisões de projeto considerando as necessidades do usuário final. Neste aspecto, o desempenho deve ser julgado considerando a integração do novo produto no conjunto do edifício. Mais do que atender ao usuário final, o produto também deve apresentar um desempenho adequado durante as fases de projeto e construção.

Nesta etapa ainda não é possível realizar uma análise do ciclo de vida completa, mas cada decisão de projeto do novo produto e do seu processo deve ser analisada em termos do seu impacto ambiental do berço ao túmulo, pelo menos nos termos qualitativos, como proposto por ONG *et al.* (1999). Aspectos como geração de resíduos sólidos de processo (SKINNER, 1994) e águas contaminadas são importantes. Não pode ser também esquecida a possibilidade de contaminação do ambiente de produção.

Medidas de projeto para assegurar a *reciclabilidade* do novo produto devem ser tomadas nos diferentes processos do desenvolvimento.

Cada decisão de projeto também deve ser analisada do ponto de vista do seu impacto no potencial de mercado. Isto pode ser feito através da análise do seu impacto no custo do produto e nos investimentos na planta industrial. A investigação experimental também deve ser dirigida, na medida do possível, de forma a identificar nichos de mercado onde o novo produto apresente vantagem competitiva (VIRJLINBG, 1991). No caso do compósito de cimento de escórias reforçados com fibras de vidro E, a vantagem competitiva decorre da utilização de uma fibra de preço inferior às fibras alcali-resistentes utilizadas em combinação com o cimento Portland, combinada com a produção de um material de menor impacto ambiental, uma vez que o cimento é quase que totalmente constituído de um resíduo.

## **4.11 AVALIAÇÃO DO PRODUTO**

### **4.11.1 A avaliação do desempenho**

A metodologia de avaliação de desempenho de componentes tem por objetivo analisar a adequação ao uso, ou seja, adequação às necessidades dos usuários de um produto quando integrado em alguma edificação. Como os requisitos dos usuários são, em parte, determinados por aspectos culturais, pelo estágio de desenvolvimento regional e até mesmo pelas condições ambientais regionais (JOHN, 1987), os critérios de avaliação não podem ser considerados fixos.

Na metodologia clássica de avaliação de desempenho apenas as necessidades dos usuários finais são enfatizadas (CIB, 1983). Embora do ponto de vista social este aspecto seja o mais importante, para o produto vencer no mercado ele também deve atender as necessidades dos usuários intermediários, projetistas e construtores, integrando-se aos processos de trabalho e equipamentos, capacitação de recursos humanos e disponibilidade de recursos financeiros e

logísticos já existentes nas construtoras. A avaliação da adequação às necessidades destes usuários pode ser realizada através de projetos piloto, devidamente monitorados e acompanhados. Esta estratégia foi adotada por OLIVEIRA (1995). Estes projetos piloto também podem ser utilizados para realização de ensaios de desempenho em condições reais de utilização, com grande ganho na sensibilidade para as interfaces entre o novo produto e a estrutura construída.

A Tabela 4-6 apresenta a lista de necessidades dos usuários da ISO 6241, ampliada pelo autor e colaboradores em função, particularmente, da evolução dos conceitos relativos ao desenvolvimento sustentável.

A lista original da ISO é voltada exclusivamente para produtos aplicados a edifícios. Para outras aplicações, como pavimentações, a metodologia genérica precisa ser desenvolvida.

Existe grande quantidade de ensaios de desempenho adequados a análise de novas tecnologias destinadas a diferentes empregos em edifícios e mesmo em outras funções já normalizadas em nível internacional, particularmente pela UEATc. De uma forma, geral estes ensaios buscam simular condições de uso e podem não ser adequados às condições brasileiras.

**Tabela 4-6 Requisitos do usuário, com base da ISO 6241, com exceção dos apresentados em itálico, que são ampliação proposta pelo autor e JOHN, KRAAYENBRINK & VAN VAMELEN (1996)**

Segurança Estrutural	Conforto higrotérmico
Segurança ao fogo	Conforto visual
Segurança em uso	Adequação ao uso
Impermeabilidade ao ar e água	Economia
Pureza do ar	Durabilidade
Higiene	<i>Manutenção</i>
Conforto acústico	<i>Adaptabilidade</i>
Conforto tátil	<i>Impacto ambiental</i>
Conforto antropodinâmico	<i>Desconstrução</i>
	<i>Reciclabilidade</i>

É importante observar que os documentos de Aprovação Técnica, considerados importantes para a introdução do novo produto no mercado, são baseados no conceito de desempenho (HEWLETT, 1996).

Dada a sua importância, o requisito de desempenho durabilidade será abordado a seguir.

#### **4.11.2 Durabilidade**

Durabilidade é um aspecto fundamental no desempenho do produto, afetando o custo global da solução e o impacto ambiental do sistema. Adicionalmente, no caso de produtos contendo

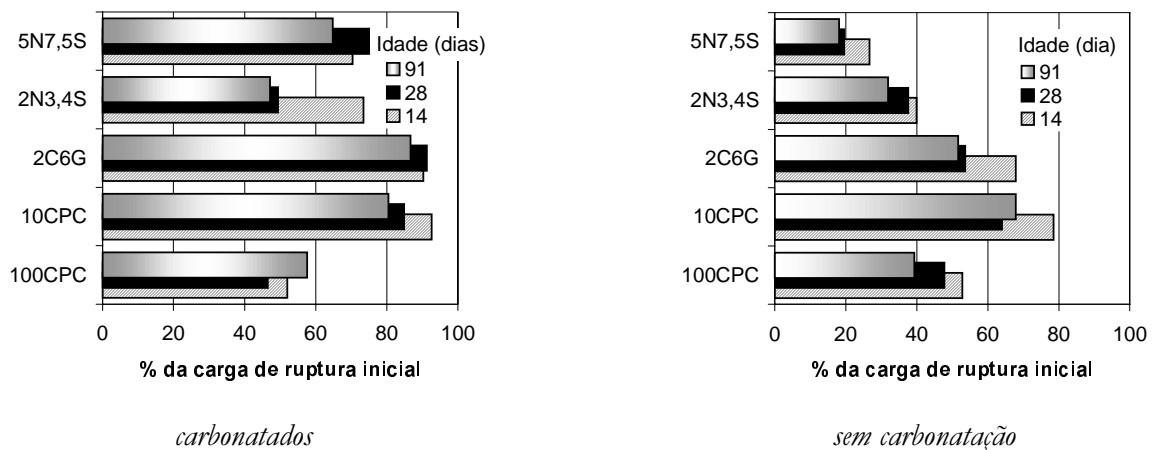
resíduos, as transformações que o produto irá sofrer ao ser exposto às condições ambientais (clima e micro-clima) e ações de uso, poderão aumentar ou limitar a liberação de fases contaminantes através da lixiviação (VAN DER SLOOT *et al.*, , 1997). LANGE *et al.* (1996) demonstraram que a carbonatação acelerada de lodos de galvanização, estabilizados com cimentos contendo até 20% de escória granulada de alto-forno e menos de 10% de pozolanas, podem reduzir a liberação de espécies metálicas como Zn, Ni e As.

O objetivo final do estudo de durabilidade é estimar a vida útil, definida como o período de tempo durante o qual o produto vai apresentar desempenho satisfatório, nas diferentes condições de uso. Trata-se de um processo complexo e demorado, no entanto, fundamental (SJÖSTRÖM, 1996).

Dados sobre vida útil de produtos tradicionais são praticamente inexistentes no Brasil. Avaliações sistemáticas da durabilidade de novos produtos são também raras. Por exemplo, somente nos últimos 15 anos o efeito da adição de elevados teores de pozolanas e escórias na carbonatação dos concretos começou ser investigado sistematicamente. Os dados hoje reunidos refutam a crença inicial que as mudanças na porosidade provocadas por estas adições compensariam a redução da reserva alcalina, não afetando a carbonatação (SCHIESSL, 1987). TOMAS e MATTHEWS (1992) e HELENE (1993), entre outros, demonstraram que estas adições aumentam a profundidade de carbonatação de concretos de mesma resistência mecânica aos 28 dias. SCHULTZ e HENDRICKS (1996) demonstraram que concreto contendo cerâmica como agregado possui maior permeabilidade e carbonata mais rapidamente.

A avaliação da durabilidade não pode ser baseada na experiência anterior com materiais tradicionais porque, em muitas situações, mecanismos de degradação de materiais tradicionais podem ser inócuos ou até benéficos ao novo produto. No caso de matrizes de cimento de escória reforçadas com fibras sensíveis a álcalis, já mencionado, a carbonatação – um dos principais mecanismos que leva à corrosão das armaduras de aço do concreto armado - apresenta efeito benéfico em algumas formulações, como pode ser observado na Figura 4-11. Esta figura resume alguns resultados de envelhecimento acelerado em câmara de vapor a  $50 \pm 2$  °C de corpos-de-prova que consistem em um feixe de fibras parcialmente embutido em pastas de cimento. Neste método, o indicador de degradação é a resistência à tração do feixe. É interessante observar que durabilidade das fibras embutidas em cimento Portland é pouco afetada pela carbonatação. Já a durabilidade das fibras embutidas nos demais cimentos é crescente com a carbonatação. As fibras embutidas em cimentos 2C6G (escória ativação com cal e gipsita) e 10CPC (escória ativada com cimento Portland) apresentam uma perda de resistência à tração de apenas 10 e 20%, menos da metade da perda sofrida por aquelas embutidas em cimento Portland, demonstrando o sucesso da abordagem.





**Figura 4-11 – Influência do tipo de cimento e da carbonatação na variação da resistência à tração de feixes de fibras de vidro parcialmente embutidos em pastas de cimento.**

A avaliação da durabilidade envolve a compreensão do desempenho esperado do produto; o conhecimento científico da composição do material, da microestrutura e do comportamento do novo produto; a caracterização do(s) agente(s) aos quais o produto estará exposto; o estabelecimento das alterações que podem resultar da interação do produto com os agentes externos e, finalmente, a avaliação das conseqüências desta interação no desempenho ao longo do tempo.

Para avaliação da durabilidade existe uma metodologia consolidada pelo CIB W80 / RILEM (JOHN, 1987) e que atualmente está sendo aperfeiçoada e consolidada pelo comitê ISO TC 59/SC 3 WG9 (SORONIS, 1996). Segundo esta metodologia, a avaliação da durabilidade inicia-se pelo entendimento dos fatores de degradação do produto; esses fatores são entendidos como todos os agentes capazes de provocar transformações no produto, de tal ordem que afetem o seu desempenho ou sua capacidade de impacto no ambiente, e também os mecanismos pelos quais estes agem. A ASTM 632 E apresenta uma lista de fatores de degradação (Tabela 4-7). HAAGENRUD (1997) apresenta uma revisão sistemática da caracterização dos fatores de degradação. Uma vez entendidos os fatores e mecanismos de degradação relevantes nas diferentes aplicações do produto, são realizados ensaios de envelhecimento natural, envelhecimento acelerado e envelhecimento em uso. O primeiro objetivo destes ensaios é confirmar os mecanismos de degradação previstos. Confirmados estes mecanismos de degradação, são selecionados indicadores de degradação, que são variáveis mais facilmente quantificáveis. Estes indicadores permitem acompanhar a o desempenho do produto de maneira simplificada.

**Tabela 4-7 Fatores de degradação segundo a ASTM 632 E**

<b>Fatores Ambientais</b>	<b>Incompatibilidade</b>
Radiação	Química
Temperatura	Física
Água	<b>Biológicos</b>
Constituintes do Ar e poluentes	Roedores
Gelo-Degelo	Fungos
Vento	Bactérias
<b>Carregamento</b>	<b>Fatores de uso</b>
Deformação lenta	Desgaste
Fadiga	Atividades de manutenção
Água e seus derivados	Projeto
Cargas de uso	

## **4.12 ANÁLISE DE DESEMP ENHO AMBIENTAL**

Uma determinada técnica de reciclagem só pode ser justificada do ponto de vista ambiental se análises do ciclo de vida demonstrarem que, naquela situação específica, a reciclagem é a alternativa de gestão de menor impacto ambiental, do berço ao túmulo (TUKKER & GIELEN, 1994). Sendo  $I_g$  o impacto ambiental do processo que gera o resíduo, na situação onde a reciclagem ainda não existe e  $I_{gr}$  o impacto do mesmo processo após a implantação da reciclagem do resíduo, sob o ponto de vista do gerador do resíduo a reciclagem apresentará benefícios ambientais se:

$$I_{gr} < I_g$$

Já do ponto de vista do produto, sendo  $I_r$  o impacto do ciclo de vida do produto reciclado e  $I_t$  o do produto tradicional com o qual o novo produto vai concorrer, a vantagem será dada se:

$$I_r < I_t$$

Do ponto de vista da sociedade, a reciclagem será um sucesso ambiental se

$$[I_r + I_{gr}] < [I_t + I_{gd}]$$

Uma questão importante, não considerada na equação acima, nem tampouco na análise do ciclo de vida, é o risco de contaminação ambiental pelo espalhamento e diluição de contaminantes na natureza e pela lixiviação dos contaminantes e subsequente contaminação da água (HARTLÉN, 1995). O espalhamento e diluição dos contaminantes dentro de

materiais de construção civil não é em si um problema durante a fase de uso dos materiais, mas ao final da vida útil será gerado um volume de resíduo de demolição superior ao original e mais contaminado que os resíduos de construção tradicionais. Subseqüentes ciclos de demolição e reciclagem em que o RCD é sempre incorporado em um novo produto contendo mais resíduos podem levar a concentrações crescentes. Conseqüentemente, em certas situações a reciclagem somente será desejável do ponto de vista ambiental se a destinação futura de resíduos de construção deverá ser controlada (HARTLÉN, 1995).

#### **4.12.1 Análise do ciclo de vida**

A análise do ciclo de vida (ACV) consiste no inventário quantitativo e qualitativo de todos insumos consumidos e dos resíduos sólidos e demais poluentes liberados no ambiente, durante todo o ciclo de vida do produto ou serviço, incluindo a(s) fase(s) de uso e, demolição e destinação dos resíduos (SCHUURMANS-STEHMANN, 1994; LEACH, BAUEN, LUCAS, 1997). A metodologia, em seus termos gerais, esta consagrada na série de normas ISO 14040 a 14043, mas a maioria dos trabalhos acadêmicos adotam como referência metodologia da SETAC (1994).

Dadas as condições gerais para a determinação do impacto ambiental, apresentadas na introdução a este capítulo, o desenvolvimento de um novo produto contendo resíduos envolverá tipicamente 4 análises do ciclo de vida. A análise do processo que gerou o resíduo, com e sem o processo de reciclagem, a análise do produto tradicional com o qual o novo produto vai concorrer, e a análise do ciclo de vida do novo produto. Esta última deverá ser realizada gradativamente durante o processo e receberá mais atenção neste trabalho.

A típica análise do ciclo de vida compreende as seguintes etapas: (a) definição do objetivo; (b) definição da abrangência e da unidade funcional; (c) inventário; (d) avaliação dos impactos; (e) interpretação ou decisão; (f) análise crítica; (g) relatório. A seguir os aspectos mais pertinentes ao problema de reciclagem de resíduos serão discutidas brevemente.

##### **4.12.1.1 Objetivos**

No processo de pesquisa e desenvolvimento do novo produto contendo resíduos, a ACV é fundamental para: (a) a tomada de decisão entre diferentes alternativas na fase de desenvolvimento; (b) a identificação dos impactos mais relevantes do processo de produção, permitindo dirigir esforços para o aperfeiçoamento do desempenho ambiental do novo produto; (c) a demonstração de que o processo de reciclagem é a alternativa que oferece o menor impacto ambiental; (d) a obtenção de certificados ambientais ou selos verdes, como parte da estratégia de mercado.

#### 4.12.1.2 Definição da abrangência e unidade funcional

A quantificação dos impactos é feita sempre para uma unidade funcional do produto, ou seja,  $\times$  kg de  $\text{NO}_x$  para cada  $\text{m}^2$  de telha produzida ou por tonelada de produto. A definição de qual será a unidade funcional é fundamental.

A definição da abrangência do estudo é aspecto importante, porque a cadeia de impactos se estende infinitamente. É óbvio que a fabricação do pneu do caminhão que transportou a matéria-prima entre o local de geração do resíduo e a planta de reciclagem contribui para o impacto ambiental. Mas também é muito provável que este impacto seja apenas marginal. LIPIATTI (1998) sugere que a árvore de inventário de impactos prossiga enquanto os impactos considerados apresentarem participação relevante (a) na massa do produto; (b) no consumo de energia do produto; e (c) como critério de desempate, no custo do produto.

#### 4.12.1.3 Inventário

Devem ser quantificados os consumos de matérias primas, água e energia, e todas as emissões, para o ar, água, solo, incluindo os resíduos sólidos gerados.

A Figura 4-12 resume o fluxo a ser quantificado em cada fase do ciclo de vida (planejamento, projeto, produção de materiais, extração de matérias primas, montagem, uso, manutenção, reabilitação, desmontagem, reciclagem dos produtos finais).

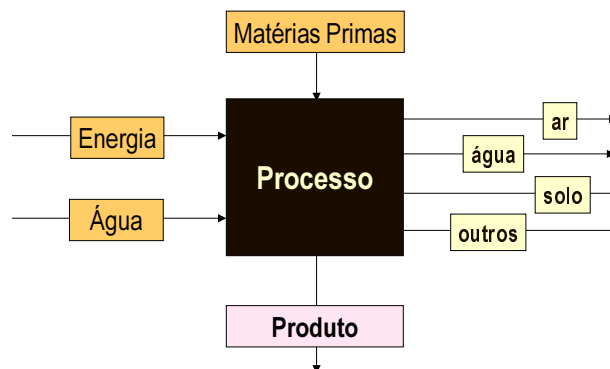


Figura 4-12 Fluxos importantes em cada etapa da ciclo de vida de um produto ou serviço(adaptado de LIPIATI, 1998)

Quando se trata do desenvolvimento de um novo produto, não é possível a obtenção de dados reais de processo. No entanto, através da consulta a especialistas nas diversas áreas do conhecimento, é sempre possível reunir dados quantitativos e qualitativos que permitam orientar o processo de decisão.

O estabelecimento de que impactos devem ser inventariados é sempre motivo de discussão, mas de forma geral eles são relacionadas as grandes questões ambientais. SCHUURMANS-STEHMANN (1994) apresentam a seguinte lista de impactos, agregados em torno dos grandes temas ou medidas ambientais:

**a) matérias-primas**

consumo de recursos naturais renováveis;  
consumo de recursos materiais não renováveis;

**b) poluição**

geração de gases do efeito estufa;  
potencial de acidificação;  
geração potencial de nutrientes indesejáveis;  
destruição da camada de ozônio;  
liberação de substâncias tóxicas para os usuários;  
liberação de substâncias tóxicas para o ambiente;  
calor desperdiçado;  
radiação;

**c) resíduos**

geração de resíduos tratados;  
geração de resíduos não tratados;  
resíduos químicos;

**d) efeitos que causam desconforto**

odores;  
ruídos;  
calamidades;

**e) energia**

consumo de fontes de energia não renováveis;  
consumo total de energia;

**f) capacidade de reutilização**

possibilidades de reutilização integral do produto;  
possibilidade de reutilização de componentes.

**g) possibilidade de manutenção**

**h) vida útil**

Os impactos de consumo de energia, capacidade de reutilização e possibilidade de manutenção são também avaliados através de outros impactos (SCHUURMANS-STEHMANN, 1994). LIPIATTI (1998) realiza a análise do ciclo de vida durante um período de tempo preestabelecido, sendo a vida útil importante para determinar a quantidade de reposições do produto. A estrutura de dados adotada por esta autora é diferente, e inclui a categoria de poluição do ar interno.

#### **4.12.1.4 Análise dos dados**

Dado o grande número de variáveis analisadas, torna-se difícil a seleção da alternativa mais conveniente, uma vez que a alternativa A pode ter uma contribuição menor para o efeito estufa, enquanto a alternativa B, constituída quase que exclusivamente de matérias-primas recicladas, preserva os recursos naturais.

A forma usual de contornar este problema é a agregação dos diferentes impactos, ponderando-se a sua importância relativa. Para os gases do efeito estufa existem dados científicos que fornecem o potencial de contribuição para o aquecimento global de cada gás. Por exemplo, o potencial de contribuição para o aquecimento global do CO<sub>2</sub> é 1, enquanto o do metano é de 24,5 (LIPIATTI, 1998). Este fator de ponderação permite calcular o efeito final de um conjunto de impactos. No entanto, nem sempre existem dados para esta agregação (SCHUURMANS-STEHMANN, 1994).

Quando se trata da comparação entre duas ou mais alternativas é sempre mais conveniente reduzir o impacto ambiental a um número único. Isto pode ser realizado ponderando-se os grandes temas segundo sua importância relativa, em processo de análise hierárquica (ver item 4.9.2.1). Os fatores de ponderação vão depender da agenda ambiental local. GLAUMANN e TRINIUS (1997) e LIPIATTI (1998) discutem de forma mais abrangente os fatores de ponderação. A autora também apresenta as ponderações propostas pela EPA, Universidade de Harvard. Evidentemente que a ponderação adotada vai influenciar no resultado, e esta tem sido uma fonte de crítica para a ACV (LEACH *et al.*, 1997). Todo este processo de agregação/ponderação pode ser utilizando-se a análise.

Nenhuma bibliografia consultada menciona diretamente a integração dos resultados do estudo de lixiviação na análise do ciclo de vida. No entanto, os produtos lixiviados podem ser considerados emissões para o ambiente durante a fase de uso, da mesma forma que LIPIATTI (1998) considerou os compostos orgânicos voláteis.

Pouca discussão existe acerca de como considerar os benefícios da reciclagem, tanto do ponto de vista de incorporação de resíduos, quanto da possibilidade de reciclagem ao final da vida útil. O software produzido por LIPIATTI (1998) permite a comparação de alternativas de concretos com ou sem a adição de cinzas volantes. Embora os detalhes não sejam oferecidos pela autora, observa-se que a adição de pozolanas ao concreto provoca redução significativa no impacto do efeito estufa. Assim, é possível concluir que esta autora considera

nulo o impacto ambiental da geração do resíduo. GLAUMANN e TRINIUS (1997) propõem a mesma abordagem, argumentando que é importante a criação de mecanismos que incentivem a reciclagem.

Outra alternativa que existe é a de atribuir ao resíduo uma parcela dos impactos do processo que o gerou. Esta alternativa traz mais benefícios ao gerador do resíduo. Em contrapartida, reduz a atratividade do produto reciclado. Trata-se, porém, de uma discussão que somente será resolvida na esfera das políticas ambientais.

#### **4.12.2 Lixiviação de espécies químicas**

Para a análise dos riscos de contaminação ambiental, devido à interação da água com produtos contendo resíduos, foram desenvolvidas uma centena de testes baseados nos diferentes testes de lixiviação (HILLIER *et al.*, 1999).

A proliferação de testes tem levado a dificuldades práticas, como a impossibilidade de comparação de resultados e dificuldade de aceitação de produtos entre regiões que adotam diferentes testes. Dada a importância do tema, atualmente existem grupos de trabalho tanto na ISO quanto na Comissão Européia de Normalização (VAN DER SLOOT *et al.*, 1997).

As diferenças entre os testes hoje empregados são muitas, incluindo pH da água de lixiviação, grau de agitação do meio, relação sólido/líquido etc. Alguns métodos buscam investigar o equilíbrio ou semi-equilíbrio entre o resíduo e a água, outros forçam a percolação da solução lixiviante e há métodos que admitem que a solução lixiviante seja frequentemente renovada. Como consequência, materiais contendo resíduos são muitas vezes submetidos a testes que não se aproximam das condições reais, aquelas às quais o material vai ser submetido durante o seu ciclo de vida (HILLIER *et al.*, 1999).

No Brasil há pouca experiência em testes de lixiviação visando analisar possibilidade de reciclagem. CAVALCANTE & CHERIAF (1996) apresentam um resumo da metodologia, que talvez seja o primeiro trabalho publicado no Brasil a respeito do tema.

A necessidade de que o teste de lixiviação simule as diferentes condições que o produto vai enfrentar durante todo o seu ciclo de vida é, atualmente, defendida pelos especialistas reunidos na comissão da Comunidade Européia (VAN DER SLOOT *et al.*, 1997), como também por autores como HARTLÉN (1995) e HILLIER *et al.* (1999). Esta tarefa é complicada, uma vez que na natureza a lixiviação poderá durar centenas de anos e o ensaio deve ser acelerado. O ensaio também dificilmente será capaz de simular a complexidade dos fenômenos que ocorrem na natureza.

A lixiviação envolve os seguintes fatores: (a) contato das superfícies externas ou internas do material com a água; (b) dissolução de fases em velocidades diversas; (c) complexas reações químicas influenciadas pela composição da água e seu pH, presença eventual de complexantes, carbono dissolvido, disponibilidade de oxigênio; (d) adsorção superficial dos

produtos; (d) transporte da água contendo as espécies lixiviadas para o meio externo. Todos estes fenômenos ocorrem simultaneamente a outros que vão introduzir alterações no produto, como por exemplo, a carbonatação.

A lixiviação se dá por meio de vários mecanismos. A percolação da água causa a lavagem e dissolução superficial em todos os materiais. Em materiais porosos a água pode penetrar por absorção capilar e, a seguir, ser transportada por difusão de vapor. Porém, o principal mecanismo de lixiviação é a difusão como descrita pela lei de Fick. Em materiais cuja porosidade seja tal que resultem extremamente permeáveis, a água percola dentro dos poros da mesma forma que o faz nas superfícies, e o mecanismo de lixiviação é o descrito pela lei de Darcy (VAN DER SLOOT *et al.*, 1997).

A forma do produto é fundamental no processo de lixiviação. Mantido constante o material e a água, quanto maior a relação área superficial/volume mais importantes são os fenômenos superficiais e a velocidade de percolação da água, e vice-versa. Assim, em materiais granulares – que no caso de materiais de construção são essencialmente os agregados – os efeitos superficiais são relativamente mais importantes que nos produtos monolíticos.

No entanto, um mesmo material muda de forma durante o seu ciclo de vida, incluindo eventuais reciclagens. A Figura 4-13 resume esquematicamente essas mudanças. Todos os produtos, ao final de sua vida útil, correm o risco de serem reduzidos à forma granular para possibilitar a reciclagem ou a deposição em aterro. As condições de exposição também variam no decorrer do ciclo de vida, como também variam entre as diferentes aplicações de um mesmo produto. Alguns componentes são protegidos da chuva durante a utilização, mas, eventualmente, poderão ficar expostos à chuva após a sua remoção do edifício. Para alguns produtos, que ficam estocados ao ar livre o período de estocagem pode resultar em contaminação significativa.

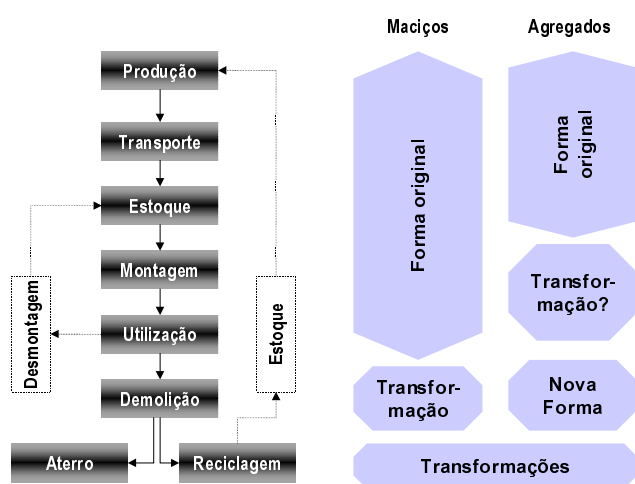


Figura 4-13 – Ciclo de diferentes produtos durante o ciclo de vida e transformações de forma.



Assim, o estudo da lixiviação de um mesmo produto vai exigir uma série de ensaios diferentes, simulando as diferentes formas e condições de exposição durante o seu ciclo de vida (VAN DER SLOOT *et al.*, 1997).

Dada a influência da porosidade no processo de lixiviação, a análise do impacto ambiental de componentes confeccionados com concreto contendo resíduos, cuja porosidade é controlada pela relação água/cimento, consumo de cimento e condições de compactação, torna-se ainda mais complexa. HOHBERG e SCHIESSL (1997) investigaram a influência do traço e diferentes relações água/aglomerantes para concretos e argamassas contendo escória e cinzas volantes. O estudo mostrou que a lixiviação em todas as situações foi muito baixa, mas que argamassas resultaram em maior lixiviação que concretos. A influência da relação água/cimento foi variável, dependendo da espécie química em questão.

Para VAN DER SLOOT *et al.* (1997) a água lixivante deve ser similar àquela prevista nas condições de uso. HEJLMAR *et al.* (1994) utilizam água do mar e água com composição similar a de chuva para verificar o risco de contaminação do oceano pela utilização de cinzas da calcinação do resíduo sólido municipal. JANSSEN-JUROKOVIČOVÁ *et al.* (1994) compararam resultados de ensaios de lixiviação tipo coluna, com pH 4 com resultados da lixiviação das cinzas volantes em condições reais de aterro por 4 anos; concluíram que as diferenças são significativas, particularmente devido a diferenças do pH da água e ausência de envelhecimento da cinza volante.

#### **4.12.2.1 Métodos de ensaio**

Da bibliografia consultada é possível concluir que ainda não existem métodos de ensaios consagrados para diferentes situações. Mas em termos gerais, quando se trata de análise de produtos contendo resíduos, constata-se uma preferência pelos testes Holandeses.

Para materiais granulares utilizados na construção de estradas, por exemplo, estão disponíveis testes de coluna (NEN 7343), testes de lixiviação dos grãos compactados, entre outros.

Para materiais monolíticos existem vários testes em utilização, inclusive alguns que simulam chuvas em fachadas. Mas, certamente, o mais aceito é o teste do tanque (NEN 7345), detalhado por VAN DER SLOOT *et al.* (1994). O método do tanque consiste em submergir cubos de 10 cm de lado do material com volume de água 5 vezes maior que o volume do material. A água é substituída após 2, 8, 24, 48, 102, 168 e 384 horas e analisada. HOHBERG *et al.* (1997) apresentam resultados de programa interlaboratorial que avaliou diferentes parâmetros deste teste.

Uma das vantagens deste teste para materiais monolíticos é o fato de que permite identificar o mecanismo de lixiviação predominante (VAN DER SLOOT *et al.*, 1997). Caso o mecanismo seja o de difusão, é possível estimar os coeficientes de difusividade ( $D_e$ ,  $m^2.s^{-1}$ ) da segunda lei de Fick para os diferentes espécies químicas lixiviadas, e a partir deste a densidade de fluxo de íons por unidade de área superficial ( $J$ ,  $mmol.s^{-1}.m^{-2}$ )

$$J = Sa\sqrt{\frac{De}{\pi.t}}$$

onde

$Sa$  é quantidade do elemento disponível para ser lixiviado, determinada através do teste de disponibilidade (NEN 7241);

$t$  é o tempo (s).

O teste de disponibilidade para a determinação de  $Sa$  é realizado com material finamente moído (95% passante na peneira 125), em uma relação líquido/sólido 50. Inicialmente é feita uma lixiviação com pH 7 e a seguir com pH 4 (VAN DER SLOOT *et al.*, 1994). No entanto, VAN DER SLOOT *et al.* (1997) argumentam o pH do ensaio deve ser mantido próximo das condições efetivas a que o material vai estar submetido. HOHBERG *et al.* (1997) estudaram o efeito da variação do pH neste tipo de ensaio, inclusive usando água desmineralizada (método DIN 38414 T4).

VAN DER SLOOT *et al.* (1997) também apresentam uma solução que dispensa a estimativa de  $Sa$ , que é substituído pela concentração da espécie lixiviada no material original ( $So$ , mmol.m<sup>-3</sup>):

$$Sa = a.So$$

$$J = So\sqrt{\frac{De.a^2}{\pi.t}}$$

$$Te = De.a^2$$

onde:

$a$  é um coeficiente adimensional denominado fator de lixiviabilidade;

$Te$  o coeficiente de transporte efetivo (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

Grande esforço de pesquisa está sendo dispendido para verificar a aderência entre os resultados dos testes de lixiviação com os resultados reais de uso. BLOEM, LAMMERS & TAMBOER (1994) correlacionam os ensaios de lixiviação com testes em tamanho real, fazendo paredes, JANSSEN-JUROKOVIČOVÁ; HOLLMANN & SCHUILING (1994) analisaram cinzas volantes, entre outros. FÄLLMAN & HARTLÉN (1994) compararam resultados de escórias e cinzas volantes, utilizando diferentes métodos de ensaio e comparando-os com as situações de campo. Os resultados até agora apresentados demonstram que a correlação é pequena sendo atribuídas a falha em simular no laboratório o real envelhecimento do resíduo aliada às já citadas diferenças no pH e potencial Redox dos dois sistemas. No entanto, o artigo de VAN DER WEGEN e VAN DER PLATS (1991) permite levantar uma hipótese adicional. Estes autores estudaram a concentração de metais diversos em amostras extraídas de estrutura de concreto de um dique do Alto Reno. As

amostras, com 17 anos de idade, estavam divididas entre as submersas e as expostas à atmosfera. Os resultados confirmaram que a lixiviação do concreto permanentemente submerso segue a segunda lei de Fick. Mas a lixiviação do concreto exposto às condições atmosféricas foi governada por dois mecanismos: ciclos de molhagem e secagem na camada externa e difusão para profundidades maiores. Estas conclusões levantam sérias dúvidas sobre a adequação dos ensaios com corpos-de-prova submersos, como os do tanque para estruturas submetidas à ciclos de molhagem e secagem.

Outro ponto que vem merecendo crescentes esforços é o de modelagem dos processos de lixiviação (VAN HERCK *et al.*, 1997, MOSZOWICZ *et al.*, 1997). Uma das vantagens potenciais da modelagem é que, uma vez caracterizados os parâmetros básicos da lixiviação, será possível por simulação estimar a lixiviação em diferentes condições de exposição (ciclos de molhagem e secagem, condição submersa etc.) e para diferentes geometrias do produto. No entanto, muita pesquisa deverá ser realizada para que este objetivo seja atingido.

Poucos dados estão disponíveis sobre a lixiviação de compostos orgânicos. ROOD, BROEKMAN e AALBERS (1994) e WAHLSTRÖM *et al.* (1994) apresentam metodologia e alguns resultados experimentais.

#### **4.12.2.2 Análise dos resultados**

Um dos aspectos mais polêmicos é o estabelecimento de limites ambientais aceitáveis para a lixiviação (VAN DER SLOOT *et al.*, 1997). Para os mesmos autores os limites vão depender das aplicações, especialmente aquelas relacionadas ao estoque e condução de água potável.

No entanto, para condições gerais de aplicação, a tendência é estabelecer um limite máximo no aumento da concentração de poluentes no ambiente como consequência da lixiviação. Segundo HARTLÉN (1995) a Agência de Proteção Ambiental da Suécia utiliza o fator de contaminação  $K_f$ :

$$K_f = \frac{M}{M_o}$$

onde

$M$  é a concentração após o impacto

$M_o$  é a concentração original, antes do impacto.

Esta agência criou uma escala cujo valor inferior  $K_f < 1,5$  identifica um impacto insignificante e o limite superior  $K_f > 10$  um impacto muito forte.

HEJLMAR *et al.* (1994) apresentam critérios para determinar os limites de contaminação na água. O decreto Holandês que normaliza o efeito ambiental dos materiais de construção, especifica que a estimativa de lixiviação em um prazo de 100 anos não pode resultar em um aumento maior do que 1% (massa) no teor dos poluentes (VAN DER POEL, 1997).

Segundo esse autor, esta nova legislação barrou a utilização de cinzas volantes como base de pavimentação. Em todas as situações é necessário que sejam estabelecidos as concentrações originais no solo.

Além deste critério do nível máximo de lixiviação, os dados obtidos no experimento poderão ser incorporados dentre os impactos da análise do ciclo de vida do novo produto.

#### **4.13 VIABILIDADE ECONÔMICA**

A especificidade da determinação da viabilidade econômica de um produto contendo resíduo é pouco estudada, sendo que o único artigo sistemático localizado na busca bibliográfica foi de VRIJLING (1991).

Uma das condições para viabilizar o novo produto no mercado é que seu preço de venda seja competitivo com a solução técnica já estabelecida<sup>29</sup>. Para atrair o interesse do gerador do resíduo sob o estrito ponto de vista financeiro<sup>30</sup>, a reciclagem precisa reduzir os custos com resíduo, incluídos custos decorrentes da necessidade de mudança de tratamento do resíduo de forma a adequá-lo à reciclagem.

A viabilidade de um determinado processo de reciclagem é então uma equação de cunho essencialmente local, pois os preços dos produtos e custos de deposição em aterros são definidos localmente. Também neste sentido, a simples importação de experiências entre diferentes países ou regiões é inadequada.

Esta situação também revela que o aumento dos custos de deposição em aterro pela criação de impostos é uma política pública eficiente para incentivar a reciclagem HARTLEN (1995). Países como Holanda (LAURITZEN, 1998) e Inglaterra, por exemplo, adotam esta política.

Como o preço do novo produto é dado pelo preço praticado pelo concorrente no mercado, em algumas situações a reciclagem somente será viabilizada se o gerador do resíduo remunerar os serviços da empresa beneficiadora (JOHN, 1996 e SCHULTZ e HENDRICKS, 1996). Nesta situação, apesar da reciclagem, o resíduo continuará apresentar valor negativo para o seu gerador (VRIJLING, 1991).

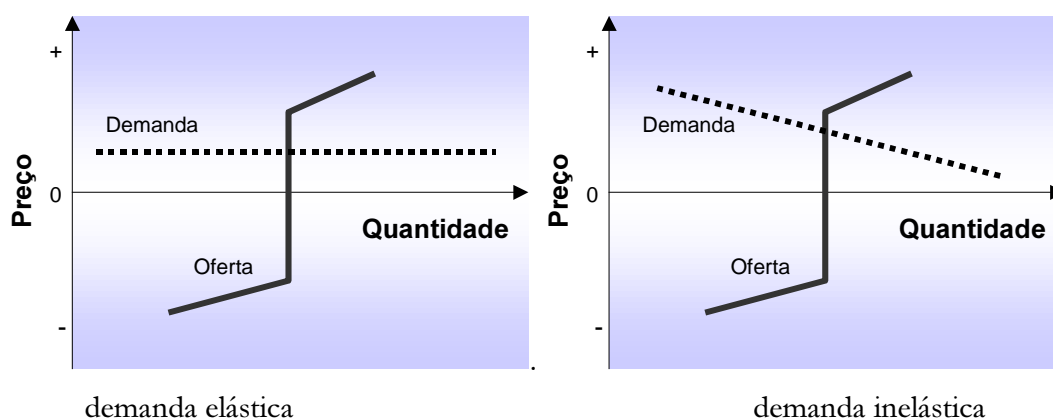
---

<sup>29</sup> A menos que seja localizado um nicho de mercado onde o produto apresente significativa vantagem competitiva.

<sup>30</sup> Podem existir outros atrativos, como melhoria na imagem da empresa, decisões estratégicas, etc., que também podem ser considerados, dependendo do caso.

No entanto, como a oferta do resíduo é inelástica com relação à demanda<sup>31</sup> (VRIJLING, 1991), admitindo-se competição perfeita, um eventual aumento na demanda pelo resíduo vai provocar um aumento no seu preço (Figura 4-14). Por outro lado, este aumento no custo do insumo não pode ser repassado para o preço do novo produto, já que é limitado pelo preço dos concorrentes. Caso a demanda pelo novo produto não seja elástica, o aumento da oferta ocasionara uma redução do seu valor de mercado, tornando a situação ainda mais grave.

Este comportamento aumenta significativamente os riscos de um investimento em um processo de reciclagem. Uma forma de contorná-lo é o estabelecimento de contratos de fornecimento do resíduo de longa duração a preços controlados, que garantam o retorno do investimento necessário a taxas suficientemente atrativas. Uma forma mais sofisticada desta abordagem parece ser a estratégia da empresa geradora do resíduo tornar-se sócia no empreendimento de reciclagem. Esta estratégia foi adotada pela British Steel, fabricante de aço, que aliou-se ao grupo Tarmac, um conglomerado com múltiplos interesses na construção civil Inglesa, para criar a East Coast Slag Products, voltada para a reciclagem de escórias de alto forno e aciaria.



**Figura 4-14 –Gráfico Preço x Oferta para resíduos e Preço x Demanda para o novo produto em um mercado competitivo (VRIJLING, 1991)**

Uma forma de romper a limitação de preço é posicionar o produto em um nicho de mercado onde o produto apresente melhor desempenho. No entanto, a demanda nestes nichos tende a ser mais inelástica e o preço fica mais sensível ao crescimento na oferta (VRIJLING, 1991).

É nesta condição de mercado que deverá ser julgada a viabilidade econômica-financeira da reciclagem. A atratividade da reciclagem, enquanto negócio, será garantida se propiciar rentabilidade superior às alternativas existentes (MONETTI & PECORARO, 1994). O

<sup>31</sup> Segundo VRIJLING (1991) em algumas situações a redução de custo do processo primário que gerou o resíduo pode permitir um ganho de competitividade, que pode levar a um ganho de mercado e conseqüente aumento na geração do resíduo.

cálculo da taxa interna de retorno em determinado prazo requer a simulação da atividade financeira do empreendimento.

Os fluxos financeiros envolvem:

**a) Investimentos iniciais**

- pesquisa e desenvolvimento;
- de montagem da fábrica;

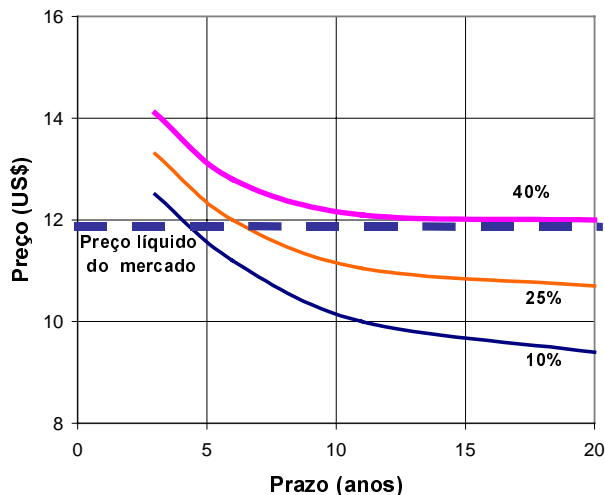
**b) Despesas de custeio**

- custos direto de produção (matérias-primas, incluindo eventual pagamento pelo resíduo, energia);
- despesas de administração;
- aluguel;
- fundo de reserva;
- publicidade;
- eventuais incentivos fornecidos para atrair clientes (VRIJLINK, 1991);

**c) Receitas**

- preço de mercado descontados os impostos e as margens de venda e distribuição
- eventual pagamento dos custos de reciclagem.

Como o preço de mercado é dado, o objetivo do estudo é verificar o período de tempo necessário para o retorno do capital investido a diferentes taxas, conforme exemplo da Figura 4-15. Os dados de preço desta figura refletem um estudo de caso real de avaliação de viabilidade econômico-financeira dos painéis IPT/IDRC, realizado com a participação do autor (MONETTI & PEGORARO, 1994), mas o preço líquido de mercado foi arbitrado.



**Figura 4-15 Determinação do prazo de retorno do investimento a diferentes taxas de retorno para produto com determinado preço líquido de mercado fixo.**

A análise da sensibilidade a variações dos componentes importantes, como preços de insumos, especialmente do resíduo e preços de venda do produto fornece subsídios adicionais para a tomada de decisão.

#### **4.14 TRANSFERÊNCIA DA TECNOLOGIA**

A reciclagem vai ocorrer apenas se o novo material entrar em escala comercial. Assim, a transferência da tecnologia é uma etapa essencial do processo. Para ela o preço do produto é importante, mas não é suficiente.

Existem muitas tecnologias que, embora excelentes do ponto de vista do desempenho técnico, nunca chegam ao mercado. Mesmo atualmente, na maioria dos países e inclusive no Brasil, as cinzas volantes e as escórias de alto forno não são recicladas em sua totalidade. Isto ocorre apesar de estarem sendo exploradas como matérias primas pela construção civil a 50 e 100 anos, respectivamente (CLARKE, 1994). Provavelmente estes dois resíduos são aqueles que tem sido objeto do maior número de pesquisas e tem suas vantagens ambientais demonstradas de maneira abrangente.

O conceito de *sinergia através de resíduos*, apresentado pelo BCSD-GM (1997), sugere que o sucesso da reciclagem vai depender também da colaboração entre os diversos atores do processo: geradores do resíduo, potenciais consumidores do resíduo, agências governamentais encarregadas da gestão do ambiente e das instituições de pesquisa envolvidas. Em uma abordagem mais simplificada, o projeto de desenvolvimento de painéis de cimentos de escória reforçados com fibras de vidro E, anteriormente descrito, está sendo realizado através de um *projeto cooperativo*, envolvendo os produtores dos resíduos incorporados, fabricante da matéria prima complementar, de fabricante de equipamentos de

produção, de empresa interessada na produção do material e da universidade. Esta colaboração ou parceria entre os atores deverá acontecer preferencialmente desde o momento em que a pesquisa se inicia.

Se a colaboração entre os parceiros é importante, ela não é suficiente. É necessário convencer os consumidores finais e, no nosso caso, projetistas e construtores civil, que o novo produto apresenta alguma vantagem competitiva e baixos riscos técnicos e ambientais (VRIJLING, 1991). É necessário vencer o presumível preconceito contra materiais de *segunda mão* ou segunda qualidade (VAN DER ZWAN, 1997), explorando o lado *ecológico* da reciclagem. NEMMERS (1997), que realizou para a OECD um estudo internacional sobre reciclagem na pavimentação rodoviária, ressalta o papel das autoridades responsáveis pela regulamentação da construção, que precisam modificar suas normas de forma a admitir o emprego do novo material.

Para VRIJLING (1991) “...incentivos adicionais ou compartilhamento de risco com os possíveis clientes...” podem ser necessários para facilitar a entrada do novo produto no mercado. NEMMERS (1997) sugere que a realização de aplicações de demonstração, difusão dos conhecimentos através de documentação e publicações, devem fazer parte de um plano de transferência da tecnologia.

Naturalmente a difusão através de documentação e publicação somente serão convincentes se houver documentação consistente, que prove as vantagens do novo material do ponto de vista técnico e ambiental, e a constância do padrão de qualidade ao longo do tempo. A colaboração na fase de pesquisa e desenvolvimento com uma universidade ou instituto de pesquisas, com reputação de excelência no mercado, certamente auxilia no convencimento de que o produto foi adequadamente desenvolvido. Adicionalmente, a obtenção de um documento de Aprovação Técnica, uma ferramenta de certificação de terceira parte para produtos inovadores, oferece ao consumidor uma garantia de que esta qualidade será mantida ao longo do tempo (HEWLET, 1996).

Para vencer a resistência do mercado um bom ponto de partida é o estado utilizar seu poder de compra, estratégia adotada na Holanda (VAN DER ZWAN, 1997).

A transferência de tecnologia é uma das fases mais importantes para o sucesso do processo com um todo. Ela deve ser planejada anteriormente. Estas atividades vão significar custos que necessitam ser adequadamente amortizados (VRIJLING, 1991).



# CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

O paradigma do desenvolvimento sustentável vem se consolidando como uma referência fundamental para orientar todas as atividades humanas. As atividades da cadeia produtiva da construção civil causam um impacto ambiental proporcional ao seu gigantismo, sendo inclusive a maior consumidora de matérias primas naturais e maior geradora de resíduos da sociedade. A aplicação deste novo paradigma às atividades do setor vai exigir profundas modificações na forma de trabalhar dos diferentes participantes, sejam eles projetistas de diferentes especialidades, engenheiros envolvidos em gestão de obras, pesquisadores ou fabricantes de materiais.

A reciclagem de resíduos é uma das muitas condições para aumentar a sustentabilidade da economia, uma vez que a geração desses é inevitável. As vantagens potenciais da reciclagem para a sociedade são, entre outras, a preservação de recursos naturais, economia de energia, redução do volume de aterros, redução da poluição, geração de empregos, redução do custo do controle ambiental pelas indústrias, aumento da durabilidade e, até mesmo, a economia de divisas.

A construção civil, pelo seu gigantismo, capilaridade regional, características e variedade de materiais que emprega, tem potencial de reciclar seus próprios resíduos - o que hoje ela não o faz no Brasil - além de aumentar em muito a reciclagem dos resíduos das outras indústrias. Esta vocação para a reciclagem já se manifesta nos dias de hoje, uma vez que a cadeia produtiva da construção civil já é a principal recicladora na sociedade. A reciclagem dos resíduos é uma forma do setor contribuir na redução do seu significativo impacto ambiental.

A transformação de um resíduo em um produto competitivo no mercado e ambientalmente seguro, no entanto, é tarefa complexa. A experiência indica que processos simplificados de pesquisa e desenvolvimento podem resultar em desastres ambientais ou produtos de baixo desempenho. Para dar conta da complexidade da questão é necessário integrar conhecimentos de diferentes áreas em um projeto multidisciplinar e também de diferentes atores: produtores do resíduo, empresa que fará a reciclagem, agências ambientais e pesquisadores de diferentes áreas. Neste cenário as dificuldades de comunicação entre os diferentes atores são muitas e uma metodologia estruturada pode auxiliar a unificar a linguagem e separar as atribuições.

O esboço de metodologia que está proposto nesta tese é aderente ao paradigma de desenvolvimento sustentável. Ela busca garantir que o processo de reciclagem vai resultar em um produto com desempenho técnico adequado e em uma redução do impacto ambiental na sociedade. Como estes benefícios somente serão concretizados caso o novo produto venha a

se estabelecer no mercado, a metodologia inclui recomendações para maximizar a possibilidade de competição do novo produto no mercado da construção civil.

Contrariando a tendência dos profissionais da área de materiais de construção civil de se concentrarem nos aspectos tecnológicos, a metodologia proposta inclui, nos seus estágios iniciais, um amplo estudo que visa entender o processo de produção e gestão do resíduo. A consolidação das informações sobre a quantidade de resíduo gerada, suas eventuais variações sazonais ou tendências a longo prazo, são fatores importantes para o estabelecimento de uma estratégia de reciclagem. Os custos de gestão do resíduo são considerados dados fundamentais para motivar a reciclagem além de determinantes na viabilidade econômica do processo de reciclagem.

A caracterização do resíduo deve ser a mais completa possível, partindo das características do processo no qual ele é gerado e incluindo uma exaustiva caracterização da composição química, microestrutural, e do seu impacto ambiental, uma vez que somente a compreensão detalhada da natureza do resíduo vai permitir a seleção de uma alternativa viável para desenvolvimento do processo de reciclagem.

Para cada resíduo existem muitas oportunidades de reciclagem tecnicamente viáveis. Considera-se importante desenvolver regras que permitam identificar de maneira simplificada diferentes opções para reciclagem a partir, não de idéias pré-concebidas, mas do cruzamento das características objetivas dos resíduos com os requisitos das diferentes aplicações. Nesta função é possível imaginar o desenvolvimento de *software* que facilite a seleção das alternativas tecnicamente viáveis sem ser necessário recorrer a um grande número de especialistas.

Dentre as alternativas tecnicamente viáveis deverá ser selecionada para pesquisa e desenvolvimento a que, em uma análise prévia, apresentar maior potencial de mercado e minimizar o impacto ambiental. Neste estágio a decisão deverá ser tomada a partir de uma análise mais qualitativa do que quantitativa.

O desenvolvimento do produto deverá ser feito utilizando uma variedade de conhecimentos, aplicados de maneira simultânea. Para minimizar riscos de falha, o novo material deverá ser estudado profundamente, empregando-se os conceitos de ciência dos materiais. A microestrutura deve ser caracterizada e as reações químicas relevantes devem ser compreendidas. O conceito de desempenho, tal como formulado pelo CIB, é fundamental neste processo. A avaliação da durabilidade do novo produto é provavelmente a parte mais complexa e demorada no processo de análise de desempenho. Ela é, no entanto, fundamental para avaliação do impacto ambiental e do custo global da nova tecnologia.

O desempenho ambiental da nova tecnologia vai exigir uma combinação de ferramentas. A realização de análise do ciclo de vida do novo produto, do produto tradicional no mercado (com o qual o novo produto irá concorrer) e do processo que gera o resíduo, antes e após a reciclagem, serve de base para a avaliação da adequação ambiental do processo. A análise do

ciclo de vida é uma ferramenta nova. A sua aplicação avaliação de processos de reciclagem introduz traz novas questões que precisam ser resolvidas do ponto de vista teórico.

O risco de contaminação ambiental pelo novo produto pode ser julgado através dos ensaios de lixiviação. A lixiviação é um fenômeno complexo e depende da forma e das condições de exposição do produto, ao longo do seu ciclo de vida. As técnicas de avaliação por lixiviação estão em seus estágios iniciais, não existindo inclusive consenso sobre os métodos básicos. Pouca experiência existe no Brasil no emprego destes métodos para analisar o risco de contaminação de novos produtos contendo resíduos. Trata-se de uma área onde uma capacitação nacional necessita ser desenvolvida urgentemente. Os resultados de lixiviação podem ser incorporados também na análise do ciclo de vida.

O estudo de viabilidade econômica do novo produto pode ser realizado pelos métodos tradicionais de taxa de retorno e tempo de retorno. No entanto, como a disponibilidade do resíduo é inelástica com relação à demanda, existe um forte risco de valorização do resíduo, caso a demanda por ele cresça significativamente. Assim é desejável que o modelo de negócio envolva uma garantia de manutenção do preço do resíduo por período de tempo suficientemente longo para amortizar os investimentos, de acordo com a taxa de retorno selecionada pelo investidor.

O esboço de metodologia proposta necessita ser desenvolvida de forma a se tornar um corpo de conhecimento auto-aplicável. Algumas necessidades de pesquisas metodológicas mais aprofundadas em diversos já foram diagnosticadas. Atualmente a proposta esta sendo testada em alguns resíduos que estão sendo estudados no âmbito do Departamento, especialmente o lodo de esgoto e a escória de aciaria.

# REFERÊNCIAS

---

- AGOPYAN, V. (coordenador). **Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras**. Relatório Final. São Paulo : EP USP, 5v. 1998
- AGOPYAN, V. Estudos dos materiais de construção civil – materiais alternativos. *In: Tecnologia de Edificações*. Pini, São Paulo, 1988, pp.75-79
- AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso das fibras vegetais**. São Paulo : EP USP, 1991 (Tese de Livre Docência).
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Introdução ao sistema de Painéis IPT/IDRC – Argamassa de cimento de escória reforçada com fibra de vidro. *In: Sem. IPT/ITUFES Resíduos Industriais para Redução de custos na Construção Habitacional*. Vitória, 21 e 22 de março de 1994. P.28-37
- AGUANELL, M. *et al.* Investigación industrial sobre ahorro de energía en la fabricación de nuevos cements compuestos españoles. **Col. Cementos com Adiciones**. Agrupacion de Fabricantes de Cemento España – OFICEMEN, Madri, 1982 p.35-53.
- ALLEN, D. T.; ROSSELOT, K. S. Pollution preventio at the macro scale: flows of wastes, industrial ecology and life cycle analysis. **Waste Management**, v.14, n°3 e 4, 1994 p.317-328.
- ASHWORTH, G. Sustainable development: a change to the construction industry. *In: CIB WORLD CONGR. CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT. Proceedings*. Gävle, June 1998. CIB : Rotterdam, 1998, v.2 p.1727-1738.
- BALDWIN, R. *et al.* **BREEAM 98 for offices - an environmental assesment method for office buildings**. Garston Watford, BRE, 1998. 36p
- BLOEM, P. J. C; LAMERS, F. L. M.; TAMBOER, L. Leaching behaviour of Building materials with by-products under practical conditions. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*. Goumans, van der Sloot & Aalbers (editors). Londres, Elsevier, 1994. p.195-204 (Studies in Environmental Science 60)
- BRITO FILHO, J. A. Cidade versus entulho. *In: 2º Sem. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*. São Paulo, IBRACON, 1999. p.56-67.
- BROSSINK, B. A. G.; BROUWERS, H. J. H.; VAN KESSEL, R. A. Financial Consequences of construction Waste. *In: CIB W 89 BEIJING INT. CONF.* Beijing,

21-24 Oct. 1996. Disponível na Internet [www.bre.polyu.edu.hk/careis/rp/cibBeijing96/papers/120\\_129/122/p122.htm](http://www.bre.polyu.edu.hk/careis/rp/cibBeijing96/papers/120_129/122/p122.htm) (acessado em 28 de Janeiro de 2000).

BROWN (III), W. M.; MATOS, G. R. ; SULLIVAN, D. (relatores) **Materials and Energy Flows in the Earth Science Century**. A Summary of a Workshop Held bu the USGS in November 1998. US Geological Survey, 1999.

BSC-GM (Business Council for Sustainable Development – Gulf of Mexico). **By-product sinergy: a strategy for sustainable development**. Austin : WBSC-GM, 1997. 36p.

BURSTYN, I. *et al.* Statistical modelling of the determinantes of historical exposure to bitumen an dpolycyclic aromatic hydrocarbons among paving workers. **Ann. Occup. Hyg.** v.14, n°1, 2000, p.43-56

CALLEJA, J. Apostillas al trabalho de P. Dutron titulado “La respouesta de la industria cementera a los problemas económicos y técnicos atctuales”. **Col. Cementos com Adiciones**. Agrupacion de Fabricantes de Cemento España – OFICEMEN, Madri, 1982. p.17-16

CASTILHOS JR., A. G. *et al.* Inventário de resíduos industriais no Estado de Santa Catarina: perspectivas de uso na construção civil. *In: I Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*. Canela, RS 18-21 Nov. 1997. ANTAC, p.27-36

CAVALCANTE, J. R.; CHERIAF, M; Ensaios de avaliação para controle ambiental de materiais com resíduos incorporados. *In: In: Workshop Reciclagem E Reutilização De Resíduos Como Materiais De Construção*. Anais. São Paulo: ANTAC , 1996. p. 21 – 31

CATALFAMO, P.; DI PASQUALE, S.; CORIGLIANO F. Influence of the calcium content on the coal fly ash features in some innovative applications. *In: Waste Material in Construction: Putting Theory into Practice*. 1. ed. Amsterdam: Ed. Elsevier Science B. V., 1997. 886p. p. 599-602.

CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) **Trends on line – A compendium of data on global change**. Disponível na Internet [www.cdiac.esd.ornl.gov/trends/trends.htm](http://www.cdiac.esd.ornl.gov/trends/trends.htm). 23 de Janeiro de 2000

CETESB **Inventário das fontes geradoras de resíduos sólidos**. São Paulo, 1996

CETESB **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares**. Relatório Síntese. CETESB, São Paulo, 1999 62p.

CHEN, J. J.; CHAMBERS, D. Sustainability and the impact of Chinese policy initiatives upon construction. **J Construction Management and Economics**. N°17, p.679-687, 1999

- CHINI, S. A.; MBWAMBO, W. J. Environmentally friendly solutions for the disposal of concrete wash water from ready mixed concrete operations. *In: CIB W 89 BEIJING INT. CONF.* Beijing, 21-24 Oct. 1996. Disponível na Internet [www.bre.polyu.edu.hk/careis/rp/cibBeijing96/papers/040\\_049/041/p041.htm](http://www.bre.polyu.edu.hk/careis/rp/cibBeijing96/papers/040_049/041/p041.htm) (acessado em 28 de Janeiro de 2000).
- CIB **Working with the performance concept in buildings.** CIB : Rotterdam, 1983.
- CINCOTTO, M. A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. **Tecnologia de Edificações.** São Paulo : Pini, 1988 p.71-74
- CINCOTTO, M. A.; KAUPATEZ, R. M. Z. Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. **Tecnologia de Edificações.** São Paulo : Pini, 1988 p.23-26
- CIRELLI, S. A. **Produção de concretos com agregados reciclados.** Londrina : UEL (Depto. Eng. Civil). 1998 70p (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil)
- CLARKE, L.B. Applications for coal-use residues: an international overview. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials.* GOUMANS, SENDEN, VAN DER SLOOT ed. Elsevier : Amsterdam, 1994. p. 673-686.
- CLINTON, W. J. **Federal Acquisition, Recycling and Waste Prevention**(Executive order 12873 of October 20, 1993). Federal Register, Vol. 58 n °203, Friday, October 22, 1993, Presidential Documents p.54911-54919
- CRAVEN, D. J.; OKRAGLIK; H. M.; EILENBERG, I. M. Construction waste and a new design methodology. *In: CIB TG 16 Sustainable Construction. Proceedings.* Tampa, Florida, November 6-9, 1994, p.87-98
- CURWELL, S.; COOPER, I. The implications of urban sustainability. **Building Research and Information.** V.26, n°1, 1998 p.17-28
- DAY, G. S; WENSLEY, R. Assessing *In: Readings in Marketing Strategy.* COOK, LARRÉCHÉ and STRONG edit. The Scientific Press, Readwood, 1989 p.53-73
- DELSAM, G. Waste Policy Related to the National Environmental Policy Plan. *In: Waste Materials in construction.* Goumans, van der Sloot, Aalbers Eds. Elsevier : London, 1991 p. 37-48
- DESAI, S. B. Sustainable development and recycling of concrete aggregate. **Use of recycled concrete aggregate.** DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998 p. 381-400
- DESIMONE, L.; POPOFF, F. Eco-efficiency – The business Link to Sustainable Development. MIT Press : Cambridge 1998. 280p.
- DETR (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS) **Sustainable Development: opportunities for change. Sustainable**

- construction.** [www.environment.detr.gov.uk/sustainable/construction/consult/index.htm](http://www.environment.detr.gov.uk/sustainable/construction/consult/index.htm). Publicado em 04 de Fevereiro de 1998(b). Visto em 22 de Janeiro de 2000
- DETR (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS) **A summary of the responses to less waste more value: the waste strategy consultation paper for England and Wales.** Disponível na Internet: [www.environment.detr.gov.uk/wastestrategy/index.html](http://www.environment.detr.gov.uk/wastestrategy/index.html). 17 de Agosto de 1999. Visto em 1 de Fevereiro de 2000
- DETR (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS) **A way with waste.** A Draft Waste Strategy for England and Wales. [www.environment.detr.gov.uk/wastestrategy](http://www.environment.detr.gov.uk/wastestrategy). 21 de Julho de 1999. 1999b. Visto em 1 de Fevereiro de 2000.
- DETR (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS) **Report on the Market Development Group.** [www.environment.detr.gov.uk/wastestrategy](http://www.environment.detr.gov.uk/wastestrategy). Publicado em 23 de Agosto 1999. 1999c. Visto em 1 de Fevereiro de 2000.
- DETR (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS.) **Sustainable Development: opportunities for change (consultation paper on a Revised UK Strategy).** Publicado na Internet. [www.environment.detr.gov.uk/sustainable/consult1/index.htm](http://www.environment.detr.gov.uk/sustainable/consult1/index.htm). Publicado em 28 de Maio de 1998. Visto em 22 de Janeiro de 2000
- DUTRON, P. La respuesta de la industria cementera a los problemas económicos y técnicos actuales. *In: Col. Cementos com Adiciones.* Agrupacion de Fabricantes de Cemento España – OFICEMEN, Madri, 1982 1-16
- DZIOUB INSKI, O; CHIPMAN, R. **Trends in Consumption and Production:** Selected Minerals. Nova Iorque : United Nations – DESA, 1999 18p.
- ELETROBRAS Procel. Disponível na Internet [www.eletrobras.gov.br/procel](http://www.eletrobras.gov.br/procel). 1998. Acessado em 31 de Janeiro de 2000.
- ENNIS, C. (coord) **Scientific assessment of Ozone Depletion: 1998 – Executive Summary.** World Meteorological Organization, UNEP. [1998]
- EPA **Comprehensive procurement guidelines.** <http://www.epa.gov/cpg/>. 22/05/99 17:18h 1999b.
- EPA **Profile of the Non-metal, Non-fuel Mining Industry.** September 1995b, 95p (EPA/310-R-05-011) Disponível na Internet <http://es.epa.gov/oeca/sector>
- EPA **Profile of the Rubber and Plastic Products Industry.** September 1995c, 50p (EPA/310-R-05-016) Disponível na Internet <http://es.epa.gov/oeca/sector>

- EPA **Profile of the Stone, Clay, Glass, and Concrete Products Industry**. September 1995a, 111p. (EPA/310-R-95-017) Disponível na Internet <http://es.epa.gov/oeca/sector>
- EPA **RCRA Orientation Manual**. [1999].
- EPA **Chacaracterization of building-related construction and demolition debris in the United States**. EPA . Report n°EPA530-R-98-010. 1998 100p.
- EPA **Construction and demolition waste landfills**. May 18, 1995. Draft report. 43p.
- EPA **Indoor air pollution – An introduction for health professionals**. EPA. Acessível pela Internet [www.epa.gov/iedweb00/pubs/hpguide.html](http://www.epa.gov/iedweb00/pubs/hpguide.html). 1998c. Acessado 31 de Janeiro de 2000
- EPA **Puzzled about recycling's value? Look Beyond the Bin**. EPA, January 1998b 16p. (EPA530-K-98-008). Disponível na Internet através de [www.epa.gov/osw](http://www.epa.gov/osw)
- EPA **RCRA Environmental Indicators Progress Report**. EPA, Office of Solid Waste, June 1996 62p
- EU (European Union) **Construction and demolition waaste management practices and their enconomic impacts**. Report to DGXI European Comission. 1999.83p.
- FIESP **Construbusiness 1999 – Habitação, Infra-estrutura e emprego**. São Paulo : FIESP, 3º Sem Brasileiro da Indústria da Construção. 1999 26p.
- FONSECA, D. J.; SEALS, R. K.; FELLOWKNAPP, G. M.; METCALF, J. B. Expert system for industrial residuals application assessment. **J Computing in Civil Engineering**. July, 1997. p.201-205
- FRANGIPANO, E.F.; FERRARIO, M.; PASTORELLI, G. Municipal solid waste management in European Metropolitan Areas: an integrated approach. **International Directory of Solid Waste Management 1998/9**. ISWA : Copenhagen. P16-30.
- GEISELER, J. Use of steelworks slag in Europe. **Waste Management**, v. 16, n°1-3, 1996 p.59-63
- GLAUMANN, M.; TRINIUS, W. External environmental impact of guildings – the CBE Method. *In: 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Buildings and the Environment*. Paris : CSTB, June 1997 p.75-82
- GLAVIND, M.; HAUGAARD; M. Future aspectos for the use of recycled concrete, aggregate in Denmark. *In: Use of recycled concrete aggregate*. DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998 p.401-407
- GOUMANS, J. J. J. M.; SENDEN, G. J.; VAN DER SLOOT, H. A. **Waste materials in construction**. Putting theory into parctice. Elsevier, Londres, 1997 (Sudies on Environmental Science 71)



- GOUMANS, J. J. J. M.; VAN DER SLOOT, H. A.; AALBERS, Th. G. **Waste materials in construction**. Elsevier, Londres, 1991 (Studies in Environmental Science 48)
- GRÜBL, P.; RÜHL, M. German committee for reinforced concrete (Dafstb) – Code: Concrete with recycled aggregates. *In: Use of recycled concrete aggregate*. DH IR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998 p.410-418
- HAAGENRUD, S. E. **Environmental Characterisation including Equipament for Monitoring**. Kjeller : Norwegian Institute for Air Research, 1997, 125p. (CIB W 80/RILEM 140 PSL SubGroup 2 Report)
- HALEY, R. Benefit segmentation – 20 years later. *In: Readings in Marketing Strategy*. COOK, LARRÉCHÉ and STRONG edit. The Scientific Press, Readwood, 1989.
- HANSEN, T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Third State-of-the-art Report 1945-1989. *In: Recycling of demolished concrete and masonry*. Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete (RILEM). T.C. Hansen Ed. London : E & FN Spon, 1996 p.1-159
- HARTLÉN, J. Environmental consequences using residues. *In: Int. Symp. On Bulk "Inert" Waste* (pre-prints of the papers). Leeds : U. Leeds, 21-22 Sept 1995 p.
- HAYASHI, A. M. Windos of Change – Can skycraapers withstand stronger hurricanes? **Scientific American**, Jan 2000 p.25-26
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, EP USP, 1993. 231p. (Tese de Livre Docência)
- HENDRICKSON, C.; HARVOATH, A. Resource use and environmental emission of U.s. construction sectors. **J Construct. Engineering and Management**. v.126, n°1, Jan-Feb. 2000 p.38-44
- HEWLETT, P. C. Innovative building products. *In: Applications of the performance concept in building. Proceedings...* CIB : Tel Aviv, 1996, v. 1, p.3-1-3-17
- HILL, R. C.; BERGMAN, J.; BOWEN, P. A. A framework for the attainment of sustainable construction. **CIB TG 16 Sustainable Construction. Proceedings**. Tampa, Florida, November 6-9, 1994, p.13-25
- HILL, R. C.; BOWEN, P. Sustainable construction: principles and a framework for attainment. **Constrction Management and Economics**, n.15, 1997 p.223.239
- HILLIER, S. R.; SANGHA, C. M.; PLUNKETT, B. A.; WALDEN, P. J. Long-term leaching of toxic trace metals from Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research**, 29, 1999 p.515-521
- HJELMAR, O. *et al.* An approach to the assessment of the environmental impacts of marine applications of municipal solid waste. *In: Environmental Aspects of*

- Construction with Waste Materials.** Goumans, van der Sloot & Aalbers (editors). Londres, Elsevier, 1994. p.835-840 (Studies in Environmental Science 60)
- HOHBERG, I.; SCHIESSL, P. Influence of concrete technical parameters on the leaching behaviour of mortar and concrete. *In: Waste materials in construction.* Putting theory into practice. GOUMANS, SENDEN, & VAN DER SLOOT, H.A. (editors). Elsevier, Londres, 1997. p. 253-258w (Studies on Environmental Science 71)
- IEA (International Energy Agency) **Statement on climate change.** [Bonn, 1999] 28p.
- JANSSEN, M. A.; VAN DEN BERGH, J. **SIMBIOSIS: Modelling industrial metabolism in a multi-regional economy system.** Dept. of Spatial Economics – Free University of Amsterdam. 16p. (disponível na internet [www.econ.vu.nl/re/MUSSIM/mussim.htm](http://www.econ.vu.nl/re/MUSSIM/mussim.htm))
- JANSSEN-JUROKOVIČOVÁ, M.; HOLLMANN, G. G.; SCHUILING, R. D. Quality assessment of granular combustion residues by standard column test: prediction versus reality. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials.* Goumans, van der Sloot & Aalbers (editors). Londres, Elsevier, 1994. p.161-177 (Studies in Environmental Science 60)
- JAQUES, R. **The influence of design and procurement on construction site waste generation – A pilot study.** BRANZ, 1998. 40p. (Study Report 81(1998))
- JOHN, V. M. Pesquisa e Desenvolvimento de Mercados Para Resíduos *In: Workshop Reciclagem E Reutilização De Resíduos Como Materiais De Construção.* Anais. São Paulo: ANTAC, 1996. p.21 - 31
- JOHN, V.M.; CAVALCANTE, J.R. **Conclusões.** *In: Workshop Reciclagem de Resíduos como Materiais de Construção Civil.* São Paulo : ANTAC 1996. [sp].
- JOHN, V. M. **Cimentos de Escória ativada com silicatos de sódio.** São Paulo, EPUSP, 1995b 200p. Tese de Doutorado.
- JOHN, V. M. **Durabilidade de materiais, componentes e sistemas.** Porto Alegre : UFRGS, 1987. 120p (Dissertação de mestrado)
- JOHN, V. M. Novas tecnologias para a construção habitacional. *In: II Simp. Engenharia de Produção.* Anais... Bauru, SP, 1995 p.108-113
- JOHN, V. M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil *In: II Sem. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil,* 1999, São Paulo, IBRACON, 1999. v.1. p.44 - 55
- KASSAI, Y. Barriers to the reuse of construction by-products and the use of recycled aggregate in concrete in Japan. *In: Use of recycled concrete aggregate.* DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998 p. 433-444.

- KIHARA, Y. Impacto da normalização do co-processamento de resíduos em fornos de clínquer. *In: 5º Congr. Brasileiro de Cimento*. São Paulo, Nov. 1999. ABCP. Em CD ROM Arquivo 3-07.pdf
- KILBERT, C. Establishing principles and a model for sustainable construction. *In: CIB TG 16 Sustainable Construction. Proceedings*. Tampa, Florida, November 6-9, 1994, p.3-12.
- KINGTON, G. L. (coordenador) **Making the most of materials – Materials and energy recovery in the materials processing industries**. Science Research Council, Wiltshire, 1979 183 p.
- KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. Optimising the use of RCA. . *In: Use of recycled concrete aggregate*. DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998. p.69-81.
- LAMERS, F. J. M.; BORN, J. G. P. Upgrading techniques for the quality improvement of municipal waste incineration residues. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*. GOUMANS, SENDEN, VAN DER SLOOT ed. Elsevier : Amsterdam, 1994. p. 645-654
- LANGE, L. C.; HILSS, C. D.; POOLE, A. B. The effect of accelerated carbonation on the properties of cement-solidified waste forms. **Waste management**, v.16, n°8 1996. p.757-763
- LAURITZEN, E. K. The global challenge of recycled concrete. *In: Use of recycled concrete aggregate*. DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998. p. 506-519.
- LEACH, M. A.; BAUEN, A.; LUCAS, N. J. D. A systems approach to materials flow in sustainable cities: a case study of paper. **J. Environmental Planning and Management**. V.40, n.6, p.705-723, 1997
- LIDDLE, B. T. Construction for sustainability and the sustainability of the construction industry. *In: CIB TG 16 Sustainable Construction. Proceedings*. Tampa, Florida, November 6-9, 1994, p.47-56
- LINDSEY, A.; CAMPBELL; B. J. Pollution Prevention – U.S. Environmental Policy. In: **Waste Materials in Construction**. Goumans, van der Sloot, Aalbers Eds. Elsevier, London, 1991 p.1-18
- LIPPIATT, B. **BEES 1.0 - Building for Environmental and Economic Sustainability - Technical Manual and User Guide**. Gaithersborough : NIST 1998
- MARCIANO, E.; KIHARA, Y. Looking green. **World Cement**, April 1997. p.82-88

- MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria com vistas a sua utilização em materiais de construção civil.** Porto Alegre : UFRGS/PPGEM, 1997 (Proposta de Tese)
- MATOS, G.; WAGNER, L. **Consumption of Materials in the United States 1900-1995.** US Geological Survey. [1999] 9p.
- MEIJ, R. Prediction of environmental quality of by-products of coal-fired power plant. *In: Waste materials in Construction: Putting Theory into Practice.* Goumans, Senden, van der Sloot (editors). London, Elsevier, 1997 p.311-325
- MERRIAM WEBESTER **WWW Merriam Webster Dictionary.** <http://www.m-w.com>. 21 de Janeiro de 2000
- METHA, P. K. Rice Husk Ash – A unique supplementary cementing material. *In: Advances in concrete technology.* MALHOTRA, V.M. Editor. CANMET : Ottawa, 1992. p.407 – 431.
- MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em fitro prensa de placas.** São Paulo : EP USP, 1998 2v. 405p.
- MILLER, A. J. Energy implications of the transportation of building materials. *In: CIB WORLD CONGR. CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT. Proceedings.* Gävle, June 1998. CIB : Rotterdam, 1998, v.1 p.803-811.
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO Portaria nº 92, de 6 de agosto de 1998. (Disponível na Internet [http://www.mct.gov.br/conjur/portaria/POR92\\_98.htm](http://www.mct.gov.br/conjur/portaria/POR92_98.htm). 22/05/99 17:37h)
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, E COMÉRCIO **Programa Brasileiro de Reciclagem.** Relatório Técnico. v. 1, 1998, 284p.
- MORENO, H. **Linha Ecológica de Cabos Pirelli. O foco ambientalista da construção civil.** JOHN, V.M. Coordenador. In: Seminário Materiais & Design - Interface no Desenvolvimento do Produto. Anais... São Carlos, 1998 FIESP, UFSCAR, SEBRAE. 1998. p 174-182
- MOSZKOWICZ *et al.* Models for leaching of porous materials. *In: Waste materials in construction.* Putting theory into practice. GOUMANS, SENDEN, & VAN DER SLOOT, H.A. (editors). Elsevier, Londres, 1997 p. 491-500 (Studies on Environmental Science 71)
- MÜELLER, A.; WINKER, A. Characteristics of processed concrete rubble. **Use of recycled concrete aggregate.** DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998 p. 111-119.

- NEMMERS, C. J. Recycling for road improvements. *In: Waste materials in construction. Putting theory into practice.* GOUMANS, SENDEN, & VAN DER SLOOT, H.A. (editors). Elsevier, Londres, 1997 p. 105-114 (Studies on Environmental Science 71)
- OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development) **OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews.** OECD, Paris, 1993 39p.
- OLIVEIRA, C. T. A. **Desenvolvimento de um painel de gesso reforçado com fibras de vidro para vedação vertical.** São Paulo : EP USP, 1995 225p.
- ONG , S. K.; KOH , T. H.; NEE A. Y. C. Development of a semi-quantitative pre-LCA tool. **J. Materials Processing Technology** v.89-90, 1999 p.574-582
- ONU Agenda 21. 1992. Disponível na THE FLETCHER SCHOOL Library Resources – Multilateral Projects. (Disponível na Internet [www.tufts.edu/fletcher/multi/chrono.html](http://www.tufts.edu/fletcher/multi/chrono.html). consultado em 23 de Janeiro de 2000)
- PEARCE, D. W.; WARFORD, J. J. **A world without End – Economics, Environment and sustainable Development. A summary.** (Disponível na Internet [www.worldbak.org/html/extpb/reports/worldEnd1.html](http://www.worldbak.org/html/extpb/reports/worldEnd1.html). 21 de Janeiro de 2000)
- PECHIO, M; BATTAGIN, A. F. **Estudo do envelhecimento de escórias granuladas de alto-forno.** *In: 5º Congr. Brasileiro de Cimento.* São Paulo, Nov. 1999. ABCP. Em CD ROM Arquivo 2-23.pdf
- PENG, C. L.; GROSSKOPF, J. R.; KIBERT, C. J. Construction wastemanagement and recycling strategies in the United States. **CIB TG 16 Sustainable Construction. Proceedings.** Tampa, Florida, November 6-9, 1994. p. 689-696
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** São Paulo, 1999. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 189p.
- POTTIER, M. Integrating environment and economy. **The OECD Observer – S´pecial Edition on Sustainable Development.** June, 1997 p.5-8
- RITTER, L. *et al.* **Persistent Organic Pollutants.** International Programme on Chemical Safety / World Health Organisation, 1999.
- SAATY, T. L. The fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. Volume VI. A HP Series. 1994. 527 pp.
- SAKAI, S.; HIRAOKA, M. Overview of MSWI residue Recycling by Thermal Processes. *In: Waste Materials in Construction: Putting Theory into Practice.* GOUMANS, SENDEN, VAN DER SLOOT ed. Elsevier : Amsterdam, 1997 p. 1-7
- SATISTICS CANADA **Waste management Industry Survey Business and Government Sector 1996.** Ottawa System of National Accounts, October 1999 47p.

- SCHIESSL, P. Influence of the composition of concrete on the corrosion protection of the reinforcement. *In: Concrete durability*. SCANLON, J.M. Ed. Detroit :ACI, 1987 p.1945-1962 (ACI SP 100)
- SCHLUTMANN, F; SINDT, V.; RUCH, M.; RENTZ, O. Strategies for the quality improvement of recycling materials. *In: 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Buildings and the Environment*. Paris, June, 1997. CIB/CSTB, 1997 v.1 p.611-618
- SCHULTZ, R. R.; HENDRICKS, C. F. Recycling of masonry rubble. *In: Recycling of demolished concrete and masonry*. Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete (RILEM). T.C. Hansen Ed. London : E & FN Spon, 1996 p.161-255.
- SCHUURMANS-STEHMANN, A. M. Environmental life cycle analysis of construction products with and without recycling. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*. GOUMANS, SENDEN, VAN DER SLOOT ed. Elsevier : Amsterdam, 1994. p.709-718
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO **Governo do Estado institui Selo Verde para produtos que respeitam a natureza**. Disponível na Internet <http://www.ambiente.sp.gov.br/not2105c.htm>
- SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) **Life-cycle assessment data quality: A conceptual framework**, Florida, USA, 1994.
- SHIRAKAWA, M. *et al.* Conceitos básicos no estudo da biodeterioração de materiais de construção civil. **Revista Técnica**, São Paulo, março-abril 1998 p.36-39.
- SILVA, M. G., JOHN, V. M., AGOPYAN, V., OLIVEIRA, C. T. A. Reciclagem de Resíduos e Qualidade Ambiental: A Importância da Parceria Tecnológica *In: SIMP. INT. DE QUALIDADE AMBIENTAL Anais*. PORTO ALEGRE/RS, 1996. p.234 – 238
- SILVA, N. I. W.; CHIES, F.; ZWONOK, O. **Usos de cinzas de carvão na construção civil**. *In: I Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*. Canela, RS 18-21 Nov. 1997. ANTAC, p.27-36
- SJÖSTRÖM, C. Service life of the building. *In: Applications of the performance concept in building*. Proceedings... CIB : Tel Aviv, 1996 v. 2, p.6-1;6-11
- SMITH, R. C. **Materials of construction**. McGraw, Tokyo, 1973 (2<sup>nd</sup> edition), pp. Xi
- SOARES, A. K. (coordenador) **Caracterização de escórias siderúrgicas com propriedades de hidraulicidade**. São Paulo, ABCP, 1982 (Relatório final do Projeto FINEP 24/81)

- SORONIS, G. Standards for design life of buildings: utilisation in the design processes. **Construction and building materials**. v.10, n°7, 1996. p. 487-490
- SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V. O custo do desperdício de materiais nos canteiros de obras. **Qualidade na construção**. São Paulo : SINDUSCON, n°21 Ano III, 1999. p.64-67
- STEDMANN, J. R.; LINEHAN, E.; KING **Quantification of the Health Effects of Air pollution in the UK for the Review of the National Air Quality Strategy**. The Department of the Environment, Transport and the Regions. London, January, 1999
- SWINK, M. L. Tutorial on implementing concurrent engineering in new product development. **J. Operations Management**, n°16, 1998. p.103-116
- THE ECONOMIST **All that remains – A survey of waste and the environment**. May 29th 1993.
- THOMAS, M. D. A; MATTHEWS, J. D. Carbonation of fly ash concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.44 n°160 1992 p.217-228
- TILFORD, K. R.; JASELSKIS, E. J.; SMITH, G. R. Impact of environmental contamination on Construction Projects. **J. Construction Eng. Management**. Jan/Feb 2000. p.45-51
- TOLSTOY, N.; BJÖRKLUND, C.; CARLSON, P. O. Material flow in the construction and heavy engineering sector. **In: CIB WORLD CONGR. CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT. Proceedings**. Gävle, June 1998. CIB : Rotterdam, 1998, v.1, p.857-864.
- TUKKER, A.; GIELEN, D. J. A concept for the environmental evaluation of waste management benefits. **In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials**. Goumans, van der Sloot & Aalbers (editors). Londres, Elsevier, 1994. p.737-748 (Studies in Environmental Science 60)
- UDAETA, M.E.M.; KANAYAMA, P.H. A conservacao de energia eletrica a partir da reciclagem de lixo. **In: Seminario de Reciclagem de Residuos**. Anais. Vitoria: ABM, 1997. pp. 215-232
- UNEP (United Nations Environment Programme) **Climate Change – Information Sheets**. Chatelaine, 1999b. 62p.
- UNEP (United Nations Environment Programme) **Global Environment Outlook 2000** (Overview GEO 2000). Nairobi, 1999. 20p. (versão integral disponível na Internet [www.grid.unep.ch/geo2000](http://www.grid.unep.ch/geo2000))

- US GREEN BUILDING COUNCIL **LEED Green Building Rating System 1.0 - Leadership in Energy and Environmental Design**. San Francisco, January 1999 (pilot version). 37p.
- VAN DER POEL, M. P. The effect of the dutch building materials decree on the by-products from coal-fired power station. *In: Waste materials in construction*. Putting theory into practice. GOUMANS, SENDEN, & VAN DER SLOOT, H.A. (editors). Elsevier, Londres, 1997. p. 301-310 (Studies on Environmental Science 71)
- VAN DER SLOOT, H. A. *et al.* Intercomparison of leaching tests for stabilized waste. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*. Goumans, van der Sloot & Aalbers (editors). Londres, Elsevier, 1994. p.161-177 (Studies in Environmental Science 60)
- VAN DER SLOOT, H. A.; HEASMAN, L.; QUEAVAUVILLER, P. H. **Harmonization of leaching/extraction tests**. Elsevier : Londres, 1997. 281p.
- VAN DER VENN, A. M. H.; NATER, D. A. G. Sampling and sub sampling of primary and secondary materials: statistical treatise. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*. Goumans, van der Sloot & Aalbers (editors). Londres, Elsevier, 1994. p.835-840 (Studies in Environmental Science 60)
- VAN DER ZWAN, J. T. H. Application of waste materials a success now, a success in the future. *In: Waste Materials in construction*. Goumans, van der Sloot, Aalbers Eds. Elsevier : London, 1991. p. 869-88
- VAN HERCK *et al.* Application of computer modelling to predict the leaching behaviour of heavy metals from MSWI fly ash and comparison with a sequential extraction method. *In: Waste materials in construction*. Putting theory into practice. GOUMANS, SENDEN, & VAN DER SLOOT, H.A. (editors). Elsevier, Londres, 1997. p. 481-490 (Studies on Environmental Science 71)
- VAN LOO, W. Closing the concrete loop – from reuse to recycling. In: **Use of recycled concrete aggregate**. DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, 1998. p.83-97
- VIRJLINBG, J. K. An economic model for the successful recycling of waste materials. *In: Waste Materials in construction*. Goumans, van der Sloot, Aalbers Eds. Elsevier : London, 1991. p.601-618
- WAHLSTRÖM, M.; *et al.* Leaching of organic contaminants from contaminated soils and waste materials. *In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*. Goumans, van der Sloot & Aalbers (editors). Londres, Elsevier, 1994. p.257-270 (Studies in Environmental Science 60)



- WBCSD (WORLD BUSSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT)  
“Eco-Efficiency and Cleaner Production: Charting the Course to Sustainability”.  
1998. 18p.
- WILBURN, D. R.; BOONAN, T. G. **Aggregates from natural and recycled sources – economic assessments for construction applications – a materials flow analysis.** US Geological Survey, 1998. 40p. (Circular 1176)
- WORLD BANK. **The World Bank Group – our dream is a world free of poverty.** (Disponível na Internet [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org). 21 de Janeiro de 2000)
- WRI (World Resources Institute) – **Facts and Figures: environmental data tables 1998-1999.** (Disponível na Internet [www.wri.org/wri/facts/data-tables.html](http://www.wri.org/wri/facts/data-tables.html). 23 de Janeiro de 2000)
- WRI (World Resource Institute) – **Global trends.** [www.igc.org/wri/tremds/wasting.html](http://www.igc.org/wri/tremds/wasting.html). 28 de Janeiro de 2000b
- WYATT, D. P.; GILLEARD, J. G. Deconstruction: an environmental response for construction sustainability. *In: CIB TG 16 Sustainable Construction. Proceedings.* Tampa, Florida, November 6-9, 1994, p.113-124.
- YAMAMOTO, J. K. *et al.* Environmental impact reduction on the production of blended Portland Cement in Brazil. **Environmental Geosciences**, v.4 n°4, 1997 p.192-206
- YU, C.; CRUMP, D. A review of the emission of VOCs from oligomeric materials used in buildings. **Building and environment.** V.33, n°6, p.357-374