

MATERIAIS & SUSTENTABILIDADE

João A. Labrincha, Rui M. Novais & Dachamir Hotza

AUTORES

João A. Labrincha • Rui M. Novais • Dachamir Hotza

TÍTULO

MATERIAIS & SUSTENTABILIDADE

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
Tel. 220 939 053 • Praça da Corujeira n° 30 • 4300-144 Porto
E-mail: geral@quanticaeditora.pt • www.quanticaeditora.pt

CHANCELA

Engenbook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – distribuidora e livraria técnica
Tel. 220 104 872 • E-mail: info@booki.pt • www.booki.pt

REVISÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

IMPRESSÃO

Setembro, 2024

DEPÓSITO LEGAL

533907/24



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2024 | Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto CICECO-Instituto de Materiais de Aveiro, UIDB/50011/2020 (DOI 10.54499/UIDB/50011/2020), UIDP/50011/2020 (DOI 10.54499/UIDP/50011/2020) & LA/P/0006/2020 (DOI 10.54499/LA/P/0006/2020), financiado por fundos nacionais através da FCT/ MCTES (PIDDAC).

DOI

<https://doi.org/10.6185/9789899177482>

CDU

504.05 Efeitos negativos da atividade do homem sobre o meio ambiente. Poluição
504.75 Ecologia humana e do meio ambiente.
628.4 Higiene urbana. Resíduos sólidos. Recolha e destino.

ISBN

Papel: 9789899177482
E-book: 9789899177499

Catálogo da publicação

Família: Engenharia
Subfamília: Ambiente

MATERIAIS & SUSTENTABILIDADE

João A. Labrincha^a, Rui M. Novais^a & Dachamir Hotza^b

^aDepartamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica/CICECO,
Universidade de Aveiro, Portugal

^bDepartamento de Engenharia de Química e Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

ÍNDICE

PREFÁCIO	VII
1. USO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS E RISCOS DE ABASTECIMENTO.....	9
1.1. Consumo de recursos naturais	9
1.2. Produção e uso de recursos.....	11
1.3. Impacto ambiental da mineração.....	15
1.4. Abundância dos materiais e dependência de materiais críticos.....	17
1.5. Economia circular e recuperação de recursos.....	26
2. IMPACTOS AMBIENTAIS E CONSUMO DE ENERGIA DOS MATERIAIS	29
2.1. Emissões carbônicas	29
2.2. Consumo e geração de energia.....	33
2.3. Armazenamento de energia.....	40
2.4. Energia incorporada nos materiais.....	42
2.5. Impacto ambiental dos transportes	44
2.6. Impacto ambiental de materiais de construção.....	49
2.7. Consumo de energia em edifícios e habitações	51
2.7.1. Aquecimento e arrefecimento de habitações.....	53
2.7.2. Materiais de mudança de fase	60
3. SETORES INDUSTRIAIS RELEVANTES	67
3.1. Cimento	68
3.2. Pasta e papel	83
3.3. Plásticos	98
3.4. Aço.....	108
3.5. Alumínio.....	121
4. CASOS DE ESTUDO DE ECONOMIA CIRCULAR APLICADOS A MATERIAIS.....	131
4.1. Conceito de economia circular	131
4.2. Potencial de valorização de resíduos.....	137
4.3. Casos de estudo de valorização de resíduos.....	140
4.3.1. Cinzas de centrais termoelétricas de combustíveis fósseis e renováveis.....	140
4.3.2. Resíduos da produção de pasta de papel	153
4.3.3. Lama vermelha.....	166

4.3.4. Lamas metalúrgicas	175
4.3.5. Pilhas e baterias.....	191
4.3.6. Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE).....	207

5. EVOLUÇÃO FUTURA235

REFERÊNCIAS.....CCXXXVII

GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS EM INGLÊS-PORTUGUÊS (PT/BR) CCLXIX

PREFÁCIO

Este documento pretende dar forma ao estudo e reflexão sobre tópicos de *Materiais e Sustentabilidade*, abordados na disciplina de que fui responsável pela criação na Universidade de Aveiro e que deu continuidade a outra previamente existente e designada *Reciclagem e Novos Produtos*. Após cerca de 20 anos do início da lecionação e investigação sobre estes temas, e com a disponibilidade que a licença sabática permite, decidi(mos) lançar mão a esta empreitada, que no mínimo cumprirá a função de servir de apontamentos da disciplina acima mencionada.

Escrevi “decidimos” porquanto contei com a prestimosa colaboração dos colegas Rui Novais e Dachamir Hotza, na discussão dos tópicos a elencar e na escrita e revisão do trabalho. Já lhes agradeço terem aceitado o desafio, para mim justificado pelo facto do Rui ser meu colaborador na lecionação desta disciplina (e de outra designada *Materiais e Desenvolvimento Sustentável*, que funciona em módulos de menor duração que um normal semestre) e par na investigação sobre a valorização de resíduos em produtos e aplicações diversas, tema onde o Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Aveiro se tem afirmado. O convite ao Dachamir, Professor na Universidade Federal de Santa Catarina – Brasil, tem óbvia justificação na longa e profícua parceria, iniciada também há mais de 20 anos e envolvendo a investigação de alguns destes temas.

A maioria dos tópicos aqui abordados são atuais e desafiantes, logo a começar pela incerteza nas conclusões/recomendações que se podem tomar. Sendo temas muito inovadores e dependentes do avanço no conhecimento de soluções científicas e tecnológicas, assim como de questões geoestratégicas (ex. exploração de recursos) e políticas (decisões normativas sobre emissões), devem ser encaradas como (permanentemente) temporárias... Se pode ser frustrante não traçar soluções absolutamente afirmativas e comprovadas, é esta incerteza que acresce, para além da importância dos temas (dano ambiental, redução de emissões, reciclagem de resíduos, ...), interesse na sua abordagem. É, afinal, a eterna incerteza e procura de respostas que alimenta o avanço científico que estão aqui bem exemplificadas.

É um documento incompleto e imperfeito, que deve merecer revisitação num futuro próximo... É esse compromisso que assumimos desde já, com a ambição de lançamento de novas edições.

João A. Labrincha,
Aveiro, setembro de 2024

1. USO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS E RISCOS DE ABASTECIMENTO

Este capítulo aborda o uso sustentável de recursos e os riscos associados ao abastecimento de materiais e fontes de energia. Com o crescimento populacional e económico, a demanda por recursos naturais aumentou consideravelmente nas últimas décadas, colocando em risco a disponibilidade desses recursos no futuro. Além disso, a exploração desses recursos pode ter impactos ambientais significativos, como a poluição do ar, água e solo, e a perda de biodiversidade. Neste capítulo, serão discutidas estratégias para promover o uso sustentável de recursos e reduzir os riscos associados ao seu abastecimento.

1.1. Consumo de recursos naturais

Estima-se que o consumo de recursos mais do que duplique até 2060, passando de 79 Gt em 2011 para 167 Gt em 2060. Esta projeção é traduzida na Tabela 1.1., ilustrando diferentes recursos, materiais e energéticos. Nela pode ver-se que é previsível haver aumento de 2,5x no consumo de metais, quando já hoje se fazem sentir algumas dificuldades no abastecimento de alguns deles, com maior impacto (energia e emissões) na sua extração e refinamento.

Tabela 1.1. Previsão do consumo global de recursos materiais e energéticos para 2060 (em Gt) [1].

Materiais	2011	2060
Metais	8	20
Minérios de ferro	3	7
Minérios de cobre	2	4
Minérios de estanho	1	3
Minérios de ouro	1	2
Outros metais	1	4
Combustíveis fósseis	14	24
Carvão betuminoso	5	13
Petróleo bruto	4	4
Gás natural	2	4

(continuação da tabela anterior)

Coque	1	1
Outros carvões	1	1
Outros combustíveis fósseis	1	1
Biomassa	20	37
Biomassa de pastagem	3	7
Madeira	3	6
Palha	3	5
Cereais	3	4
Resíduos de colheita	2	4
Frutas e vegetais	2	3
Outras culturas	3	6
Outras biomassas	1	2
Minerais não-metálicos	37	86
Areia e brita	23	55
Calcário	6	14
Argilas estruturais	5	11
Outros minerais não-metálicos	3	6
TOTAL	79	167

Esta previsão coloca natural pressão sobre a disponibilidade de recursos para “sustentar” a produção industrial que, por sua vez, suporta o nível de bem-estar económico e social [2]. Importa aliás lembrar que qualquer ação considerada sustentável tem de obedecer simultaneamente aos três pilares de sustentabilidade: ambiental, económico e social, incluindo as suas interações (Figura 1.1.).



Figura 1.1. Pilares que definem a sustentabilidade de qualquer ação.

Para exemplificar, em 2017 de todos os materiais consumidos, 49% corresponderam a minerais não-metálicos (destes, 32% somente de areia, cascalho e rocha britada), 24% a biomassa, 17% a combustíveis fósseis e 10% a metais [1].

1.2. Produção e uso de recursos

A Figura 1.2. ilustra a evolução no processamento de materiais desde o início do século passado, divididos por propriedades, sendo notório o acentuado aumento global de todos eles após a segunda guerra mundial. Além disso, é notória a reduzida contribuição (apenas cerca de 6% em 2014) da reciclagem de produtos em fim de vida no processamento global de materiais, trazendo incipiente importância da circularidade no ciclo de utilização de materiais. Urge, por isso, incrementar este tipo de atividades.

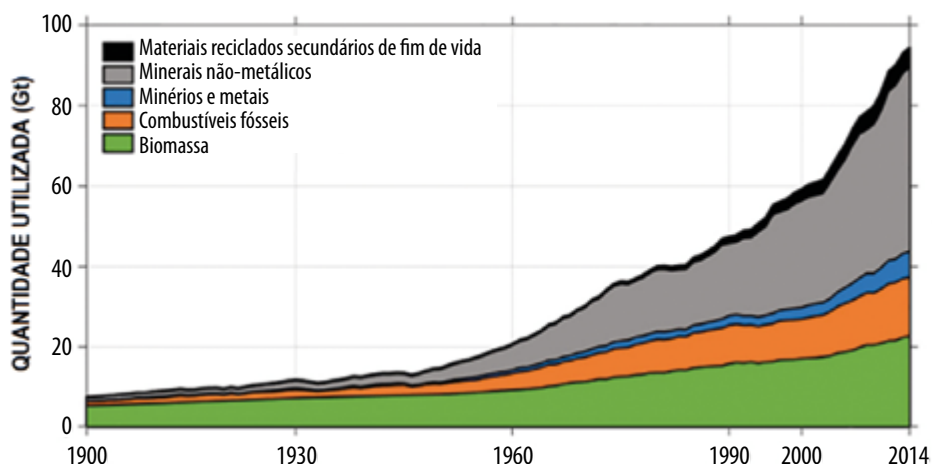


Figura 1.2. Evolução da produção de diferentes famílias de recursos [3].

Fonte: Reproduzida de acordo com Creative Commons CC-BY licence. Adaptada.

A Figura 1.3. detalha a mesma evolução para materiais específicos, permitindo identificar os que são produzidos e consumidos em maior proporção, como acontece com o betão e os agregados.

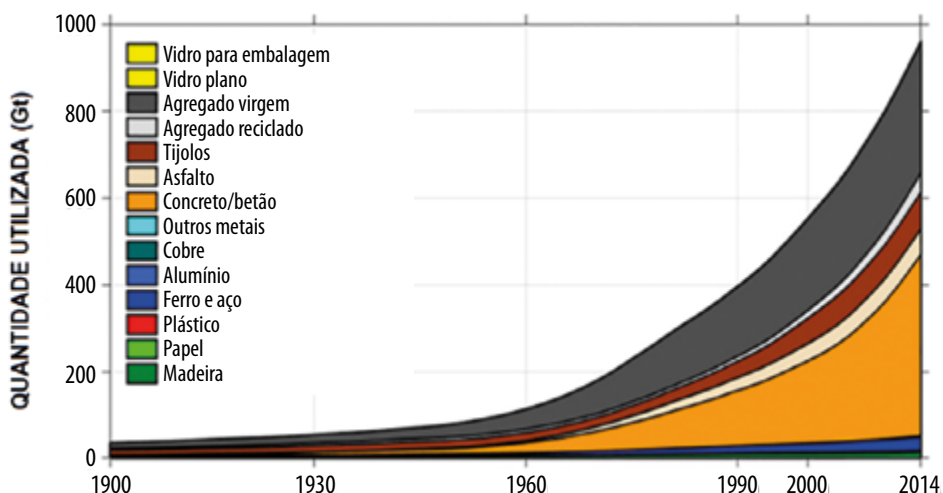


Figura 1.3. Evolução da produção de materiais específicos [3].

Fonte: Reproduzida de acordo com Creative Commons CC-BY licence. Adaptada.

4. CASOS DE ESTUDO DE ECONOMIA CIRCULAR APLICADOS A MATERIAIS

4.1. Conceito de economia circular

Os capítulos anteriores mostraram os desafios relativamente ao uso de recursos, materiais e energéticos, e geração de emissões. Em muitos casos, os cenários não são animadores. A razão primeira destes problemas reside no modelo de desenvolvimento económico, dito linear (Figura 4.1.).



Figura 4.1. Modelo vigente de economia linear.
Fonte: Adaptada [178].

Caso este modelo continue a vigorar, as consequências serão:

- decrécimo/destruição de recursos naturais;
- aumento do custo das matérias-primas;
- aumento da produção de resíduos (3,4 Gt até 2050);
- aumento da pressão sobre o Ambiente.

É, por isso, fundamental alterar a forma de funcionamento da sociedade, procurando fechar o círculo na utilização dos recursos, num modelo designado por economia circular (Figura 4.2.).



Figura 4.2. Modelo de economia circular.
Fonte: Adaptada [178].

Como se percebe facilmente desta figura, a reciclagem dos produtos em fim de vida parece fundamental para fechar este circuito. No entanto, muitas outras ações podem ser tomadas antes dessa etapa, como se ilustra na Tabela 4.1. Enformam um número considerável de Rs, que cobrem desde a escolha de um produto, à extensão da sua vida útil e recuperação de recursos no final de vida útil [179].

Tabela 4.1. Estratégias que contribuem para fomentar o modelo de economia circular (9 ou 10 Rs). A circularidade aumenta no sentido de R9 para R0).

Estratégia	9Rs	Descrição
Uso e fabricação de produtos mais inteligentes	R0 Recusar	Tornar o produto redundante, abandonando a sua função ou oferecendo a mesma função com um produto radicalmente diferente
	R1 Repensar	Tornar o uso do produto mais intensivo (por exemplo, compartilhando o produto)
	R2 Reduzir	Aumentar a eficiência no fabrico ou uso do produto, consumindo menos recursos naturais e materiais
Extensão da vida útil do produto e de suas partes	R3 Reutilizar	Reutilização por outro consumidor do produto descartado que ainda está em bom estado e atende à sua função original
	R4 Reparar	Reparação e manutenção do produto com defeito para que ele possa ser usado na sua função original
	R5 Recondicionar	Restaurar um produto antigo e atualizá-lo
	R6 Refabricar	Usar partes de um produto descartado num novo produto com a mesma função
	R7 Reaproveitar	Utilizar um produto descartado ou as suas partes num novo produto com uma função diferente
Aplicação útil de materiais	R8 Reciclar	Processar materiais para obter a mesma qualidade (alta qualidade) ou qualidade inferior (baixa qualidade)
	R9 Recuperar	Incinerar material com recuperação de energia

Alguns daqueles Rs podem originar riscos de menor desenvolvimento económico (um dos pilares da sustentabilidade), em particular os que traduzam recusa e redução, embora esta ação

não traduza necessariamente abrandamento da produção, que poderia gerar desemprego e, adiante, desequilíbrios sociais (outro pilar da sustentabilidade).

A Figura 4.3. enumera os elementos-chave do modelo de economia circular, que enformam a palavra DISRUPT (“interromper”, “perturbar”) [180]. A economia circular assume sistemas dinâmicos, sendo um processo de transformação em vez de um ponto/objetivo específico de chegada. Este modelo DISRUPT mostra a direção a seguir. Envolve aspetos de conceção e *design*, o fomento da utilização de tecnologias digitais, o desenvolvimento de novos modelos de negócio e criação de valor e, aquilo de mais relevante na área de Materiais, a correta seleção, utilização e recuperação de recursos. A reutilização e reciclagem de recursos são obviamente parte relevante deste modelo.



Figura 4.3. Modelo DISRUPT que direciona ações para implementar economia circular.
Fonte: Adaptada [180].

O modelo de economia circular é recente e tem merecido alterações e acrescentos conceituais. Ainda assim, os resultados da sua implementação são muito modestos. A Figura 4.4. mos-



Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
PORTO, 2024