

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>VALORIZAÇÃO E TRATTAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>RECICLAGEM .....</b>	<b>2</b>
2.1	Reciclagem de vidro .....	2
2.2	Reciclagem dos plásticos .....	5
2.3	Reciclagem de papel .....	6
2.4	Reciclagem do alumínio .....	6
<b>3</b>	<b>TRATAMENTOS BIOLÓGICOS .....</b>	<b>7</b>
3.1	Compostagem .....	9
3.1.1	<i>O processo de compostagem .....</i>	<i>10</i>
3.1.2	<i>Parâmetros operacionais .....</i>	<i>11</i>
3.1.3	<i>Sistemas para a compostagem .....</i>	<i>12</i>
3.1.4	<i>Compostagem em ambiente aberto .....</i>	<i>13</i>
3.1.5	<i>Compostagem em ambiente fechado .....</i>	<i>14</i>
3.1.6	<i>Tratamentos finais .....</i>	<i>15</i>
3.2	Digestão anaeróbica .....	16
3.2.1	<i>Parâmetros operacionais .....</i>	<i>18</i>
3.2.2	<i>Digestores .....</i>	<i>19</i>
3.2.3	<i>O biogás .....</i>	<i>20</i>
3.3	Comparação entre compostagem e digestão anaeróbia .....	20
<b>4</b>	<b>OUTROS TRATAMENTOS .....</b>	<b>21</b>
4.1	Incineração .....	21
4.2	Pirólise .....	22
4.3	Gaseificação .....	22
4.4	Bibliografia .....	22

## 1 VALORIZAÇÃO E TRATTAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O tratamento e a valorização<sup>1</sup> dos resíduos sólidos tornam-se relevantes na implementação de um sistema integrado de resíduos sólidos urbanos.

As técnicas para o tratamento e valorização de resíduos, de acordo com a sua caracterização e tipologia, são as seguintes:

- reciclagem: resíduos provenientes de coleta seletiva;
- valorização orgânica: por compostagem ou digestão anaeróbica: resíduos com componente orgânica;

<sup>1</sup> Valorização é um termo usado na política europeia de gestão integrada de resíduos sólidos.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

- valorização energética: utilizando processos fermentativos (digestão anaeróbica e a degradação anaeróbica dos resíduos em aterros sanitários) e processos pirolíticos (incineração com recuperação de calor, a pirólise e a gaseificação).

A seguir, serão descritos os principais processos de valorização e tratamento dos resíduos sólidos urbanos, com enfoque sobre processos simplificados como a reciclagem, a compostagem e a digestão anaeróbica.

## 2 RECICLAGEM

### 2.1 *Reciclagem de vidro*

O principal elemento que constitui o vidro é a areia, que normalmente funde a 1700° C , mas que com a adição de carbonato de sódio funde a 800°C. Para torná-lo estável acrescenta-se óxido de cálcio e de magnésio.

A composição típica do vidro é a seguinte:

- 70 – 74 % silício;
- 12 – 16 % óxido de sódio;
- 12 – 16 % óxido de cálcio;
- 1 – 3 % óxido de magnésio;
- 1 – 3 % óxido de alumínio.

Freqüentemente, adicionam-se vidros quebrados como matéria prima.

O vidro é parcialmente coletado e separado com base na cor, e outra parte é separada do resto dos resíduos indiferenciados através de equipamentos adequados.

O vidro é o material mais facilmente e difusamente reciclável porque pode ser reciclado sem precisar ser reutilizado para as mesmas aplicações. As principais operações a serem executadas para separar o vidro são:

- O vidro recolhido nos contentores é levado a unidade de coleta onde é previamente inspecionado;
- Em seguida é pesado e armazenado de acordo com a cor; é colocado em esteiras transportadoras, uma cor de cada vez, e processado;
- Os materiais ferrosos (por ex. tampas) são removidos por separação magnética;

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

- Materiais como pedras ou tijolos são retirados através de operadores que os removem manualmente depois que a esteira transportadora passa o vidro pelo triturador;
- Peneiramento e separação a vácuo para eliminar o alumínio, o plástico e o papel;
- Checagem eletrônica para eliminar a eventual presença de material não transparente;
- Ar comprimido para eliminar qualquer material residual;
- Armazenamento separado por cor.



**Figura 2.1** Fase da coleta seletiva do vidro em posto de entrega na Itália (Fonte: [www.gruppohera.it](http://www.gruppohera.it))

A maneira mais simples de utilizar fragmentos de vidro é como agregados para asfaltamento de rodovias, ou em moldes para conter outros materiais cerâmicos (telhas e revestimentos de construções), para revestir ou vitrificar materiais cerâmicos.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

Os percentuais de reciclagem variam muito entre os países. As vantagens da reciclagem são ambientais e econômicas:

- O vidro pode ser reciclado inúmeras vezes;
- Conservação das matérias primas;
- Redução das escavações de areia;
- Consumo reduzido de água na produção;
- Menor necessidade de energia (cada tonelada de vidro reciclada acarreta uma economia de 130 litros de petróleo, pois os fragmentos fundem em temperaturas mais baixas).

As desvantagens são:

- A coleta do vidro é provoca barulho;
- Periculosidade do vidro quebrado próximos aos pontos de coleta;
- Sensibilidade às impurezas: o vidro reciclado deve conter pouquíssimas impurezas;
- Sensibilidade à cor: colocar vidro verde em recipientes de vidro claro pode reduzir drasticamente o valor econômico do material;
- Custos de transporte.

Uma alternativa à reciclagem é a devolução dos cascos.



Figura 2.2 Unidade de reciclagem do vidro na Itália (Fonte: [www.ecosansperate.it/](http://www.ecosansperate.it/))

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

## 2.2 Reciclagem dos plásticos

A coleta seletiva do plástico apresenta muitas criticidades com margens de melhoria muito baixas. O material coletado requer um complexo processamento intermediário para o preparo do material, diferenciado por polímeros, antes da reciclagem.

Os sistemas automatizados apresentam custos superiores e desempenhos inferiores àqueles semi-manuais. Atualmente, o mercado do plástico reciclado é muito crítico e não permite a obtenção de lucros significativos.

### Reciclagem mecânica

Este é o método mais utilizado para reciclar produtos plásticos constituídos por um único material e relativamente limpos. Quanto mais o material é complexo e diferenciado, menos interessante se torna separá-lo mecanicamente. São utilizados especialmente para substituir polímeros virgens, independentemente do método de coleta.

Sob um ponto de vista ambiental, é melhor a recuperação energética do que a reciclagem mecânica, e a recuperação energética é sempre e de qualquer forma, melhor do que a disposição em aterro.

### Reciclagem como matéria prima (feedstock recycling)

Converte os resíduos plásticos a serem reciclados em matérias primas de base para o uso em refinarias, usinas petroquímicas, reatores ou como monômeros para a produção de novos plásticos (PMMA, nylon 6, PET, são reconvertidos em monômeros através de processos de despolimerização).

Existem também processos de:

- gaseificação;
- pirólises.

### Recuperação energética

Os materiais plásticos têm um elevado conteúdo energético que pode ser explorado, por exemplo, na indústria do cimento.

Pode ser perigosa quando os polímeros contêm cloro e o processo industrial é obsoleto → produção de dioxinas (PVC) e substâncias orgânicas tóxicas e cancerígenas.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

### 2.3 *Reciclagem de papel*

O papel representa percentualmente em peso a maior fração dos resíduos sólidos urbanos (cerca de 25 – 40%). No entanto, somente uma parte dos vários tipos de papel pode ser reciclada, por três motivos:

- a matéria prima para produzir papel é abundante e de baixo custo;
- muitos centros urbanos ficam longe das fábricas de papel;
- os equipamentos para descolorir e reutilizar o papel possuem capacidade limitada.

O papel é um material que pode ser recuperado e reutilizado inúmeras vezes. De fato, além de ser produzido com fibras virgens, o papel é também produzido com papel e papelão recuperados, jornais e revistas, caixas ou cartonagens em geral, etc., ou seja, sem o emprego de pasta de madeira ou celulose virgens.

O uso, sempre que possível, destas matérias primas que derivam de produtos de papel já utilizados, permite deixar o uso de matéria prima que provêm da madeira a empregos específicos que requerem uma melhor qualidade, uma maior resistência do papel ou um melhor grau do branco.

A seleção do papel coletado é geralmente um processo mecânico, enquanto que a seleção de melhor qualidade é feita manualmente, fazendo deslizar o papel sobre uma esteira transportadora ao longo da qual estão alinhados alguns operadores que retiram determinados tipos de papel e os depositam em recipientes separados.

Após as operações de seleção é feita a prensagem e a amarração dos fardos de papel selecionado.

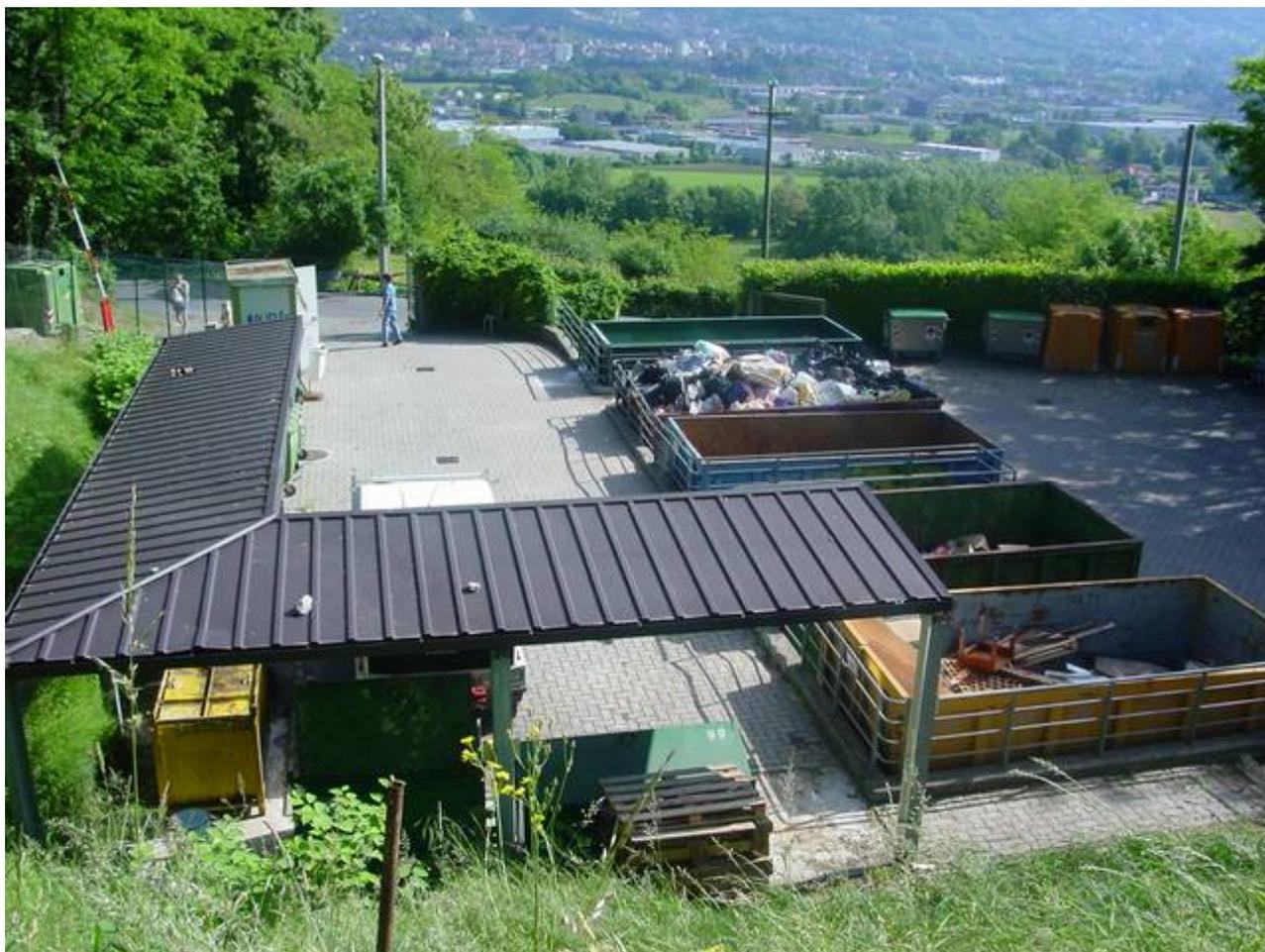
### 2.4 *Reciclagem do alumínio*

O alumínio pode ser reciclado completamente sem por isto perder as suas características originais, e por inúmeras vezes, por isto as suas embalagens são uma fonte de matéria prima inesgotável com conseqüentes benefícios para o ambiente.

É possível selecionar através de recipientes específicos, todas as embalagens domésticas como: latas, recipiente spray, enquanto é necessário depositar nos postos de entrega, resíduos volumosos como redes, ferros de passar, lava roupas ou geladeiras que, antes de serem enviadas para fundições, são desmontados e divididos em vários componentes constituídos por materiais heterogêneos.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

A reciclagem da embalagem permite também uma considerável economia de minerais e energia. Para produzir 1 kg. de alumínio extraíndo-o da bauxita são necessários 14/16 kWh. Reciclando as embalagens são necessários apenas 0.7/0.8 kWh de energia e, portanto, economiza-se 95% de energia em relação à extração do mineral. O alumínio da coleta seletiva é encaminhado em centros de armazenamento específicos aonde é lavado, prensado em fardos e enviado para fundições.



**Figura 2.3** Exemplo de posto de entrega para coleta seletiva na Itália

### 3 TRATAMENTOS BIOLÓGICOS

O componente orgânico dos resíduos urbanos representa a fração homogênea em peso predominante e a mais problemática a ser gerida através dos sistemas tradicionais de tratamento, devido aos impactos ambientais que causa.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

Em geral, as usinas de tratamento biológico possibilitam o tratamento do componente orgânico dos resíduos com o objetivo de reaproveitá-lo como fertilizantes orgânicos ou de estabilizá-lo para reduzir os impactos ambientais que podem causar depois da sua disposição final no aterro sanitário.

A seguir, são descritas duas possibilidades, complementares entre si, para o tratamento do material orgânico:

- compostagem de frações orgânicas de boa qualidade separadas previamente através da coleta seletiva;
- tratamento biológico de resíduos não selecionados com conteúdo de substâncias orgânicas variável, ou frações orgânicas de baixa qualidade que derivam do tratamento mecânico de resíduos não selecionados;

Na gestão integrada dos resíduos urbanos é necessário dar prioridade ao início e à consolidação da coleta seletiva, com o intuito de interceptar na fonte a maior quantidade possível de fração orgânica presente.

É preciso considerar que a coleta do resíduo orgânico não pode alcançar uma eficiência máxima, e isto significa que uma parte do orgânico não é interceptada e separada, e portanto permanece dentro dos resíduos indiferenciados que serão encaminhados à disposição final.

É necessário prever sistemas adequados para a separação e o tratamento deste componente orgânico indiferenciado para reduzir a carga poluente dos resíduos encaminhados à disposição final.

Os tratamentos biológicos têm por objetivo:

- obter a estabilização da matéria orgânica bloqueando sua fermentação: um produto orgânico “estável” não produz mais sub-produtos fitotóxicos e não consome mais oxigênio durante a degradação dos componentes orgânicos, deixando-o livre para as plantas e para a microflora do terreno;
- obter a higienização do resíduo, eliminando organismos patogênicos presentes nos resíduos vegetais, impedindo que o composto seja vetor de patologias vegetais e eliminando também organismos patogênicos humanos presentes nos resíduos de descarte (ex. lodos de tratamento de efluentes);
- reduzir o volume e a massa dos materiais tratados, tornando seu transporte mais fácil e econômico.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

O tratamento biológico é um processo que transforma a matéria utilizando a ação de determinados microorganismos. Estas bactérias transformam a matéria biodegradável em produtos com estrutura molecular mais simples e mais estável.

As bactérias utilizadas nestes tratamentos são classificadas em dois grandes grupos, de acordo com sua atividade em ambientes aeróbios ou anaeróbios (isto é, respectivamente, em presença e em ausência de oxigênio):

- Processo aeróbico: compostagem;
- Processo anaeróbico: digestão anaeróbica.

Na União Europeia são produzidos cerca de 2500 milhões de toneladas/ano de bioresíduos, provenientes de vários setores.

Apesar dos resíduos sólidos urbanos representarem somente uma pequena parte do total, podem conter um elevado percentual de material orgânico (até 60%), formado principalmente por:

- celulose: 40 – 50 %;
- hemicelulose: 5 – 10 %;
- lignina: 10 – 15%.

Atualmente mais de um terço dos resíduos biodegradáveis urbanos europeus (cerca de 50 milhões de toneladas/ano) é tratado através da compostagem e digestão anaeróbica, produzindo cerca de 9 milhões de toneladas/ano de composto e de fertilizantes.

### 3.1 Compostagem

A compostagem consiste na degradação biológica aeróbica dos resíduos orgânicos, em ambiente aeróbico, produzindo um produto final denominado composto, possibilitando a valorização agrícola dos resíduos com componente orgânica.

As principais vantagens da compostagem são:

- remove uma grande parte da fração orgânica biodegradável dos resíduos e reduz drasticamente os processos de biodegradação de um aterro sanitário, produzindo menos gases nocivos e chorume. Se o material orgânico fosse disposto sem tratamento no aterro sanitário, causaria muitos efeitos negativos no ambiente: o chorume atinge os lençóis freáticos, produção de metano (gás estufa) em ausência de ar;
- ajuda a reduzir doenças nas plantas nos terrenos aonde é utilizado;
- reduz os prejuízos na agricultura e horticultura aumentando a produtividade;

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

- a produção do composto e sua assimilação nas plantas, gera uma importante reserva de carbono, substituindo ao mesmo tempo nutrientes que, de outra forma, deveriam ser fornecidos por outras fontes, principalmente por fertilizantes sintéticos;
- age como agente tampão contra possíveis quedas de pH;
- reduz a erosão do terreno e a necessidade de irrigação.

A compostagem apresenta também algumas desvantagens:

- emissão de chorume, aerosol micróbico, formação de poeiras e consumo de energia nas usinas de compostagem;
- alguns pesticidas, usados geralmente para combater as ervas daninhas nos jardins, não são eliminados durante o processo de compostagem e podem danificar as plantações;
- presença, no composto final, de poluentes orgânicos persistentes, derivados de resíduos sólidos urbanos, além de pequenos resíduos de plástico ou metais pesados.

Existem várias formas de compostagem, desde o simples tratamento doméstico até o tratamento praticado em grandes usinas centralizadas.

A compostagem doméstica é feita em recipientes periodicamente revolvidos para facilitar a entrada de ar: a presença de bactérias aumenta a decomposição, acelerando-a e produzindo composto de boa qualidade. A principal vantagem da compostagem doméstica é que nunca são produzidos resíduos orgânicos na saída e isso é visto como um bom instrumento para reduzir o fluxo de resíduos e de auxílio na gestão sustentável dos resíduos. Os resíduos provenientes da jardinagem representam cerca de 5% dos resíduos domésticos. Geralmente, a aquisição e utilização dos recipientes para a compostagem doméstica são incentivados em alguns países.

### 3.1.1 O processo de compostagem

A compostagem é um processo:

- aeróbico: necessita de oxigênio para a mineralização dos componentes de maior fermentabilidade e para a estabilização da biomassa;
- exotérmico: produz calor que deve ser em parte retirado do sistema para evitar o superaquecimento da biomassa com relação aos valores ideais de temperatura.

O processo de compostagem pode ser descrito e subdividido em três fases:

- pré-tratamento: fase onde se realiza a fragmentação e pulverização do material. Nessa fase procura-se efetuar a separação por dimensão das partículas e eliminar

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

objetos indesejados da massa orgânica a ser tratada. Durante esta fase são realizadas as seguintes operações:

- fragmentação;
- desidratação parcial ou acréscimo de água;
- mistura de matrizes orgânicas com várias características (ex. matrizes ricas em nitrogênio com matrizes ricas em carbono);
- separação de impurezas;
- biodegradação: fase na qual os processos de degradação realizados pelos componentes orgânicos mais fermentáveis são mais intensos e rápidos; nesta fase são alcançadas temperaturas elevadas, sendo necessário remover o excesso de calor do sistema. Além disso, as reações bioquímicas exigem uma elevada quantidade de oxigênio; nesta fase a biomassa precisa de aeração (única etapa indispensável); mistura para compensar a não uniformidade entre as várias zonas; umidificação ou secagem em função das exigências; separação das impurezas.
- maturação: fase onde terminam os fenômenos de degradação realizados pelas moléculas menos reativas e na qual verificam-se reações de transformação e polimerização realizadas pelas mesmas moléculas (com ênfase particular a lignina) que levam à síntese das substâncias húmicas. Nesta fase as exigências de calor e de oxigênio são inferiores às da fase anterior.

Para estar pronto ao transporte, à armazenagem e a venda, o produto deve ainda ser:

- dessecado, se muito úmido;
- triturado finamente;
- unido a aditivos que aumentem sua porosidade ou modifiquem sua composição;
- peneirado para classificá-lo em diversos tipos;
- separado das impurezas.

### 3.1.2 Parâmetros operacionais

Os principais parâmetros de processo, que garantem as condições ideais para o desenvolvimento das bactérias e que permitem acelerar as reações de decomposição-transformação, são os seguintes:

#### **Concentração de oxigênio (e a relação oxigênio/gas carbônico)**

A concentração de oxigênio deve permanecer em níveis superiores a 15%, para anular os fenômenos de putrefação (principal causa da produção de odores desagradáveis); o fluxo de ar

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

dentro da massa garante também a eliminação do calor em excesso e, se necessário, a remoção do excesso de umidade.

### **Temperatura**

A temperatura aumenta como consequência do equilíbrio entre:

- produção de calor pela atividade fermentativa;
- dispersão de calor.

Na fase ativa a temperatura pode ultrapassar 70°C, garantindo as condições para a higienização do material: os processos de estabilização devem ocorrer em torno de 40-45°C; para que isso ocorra é aconselhável adotar sistemas para eliminação do calor em excesso.

### **Umidade**

É indispensável para o desenvolvimento microbico, muito sensível aos excessos de umidade, pois corre-se o risco de que a água ocupe totalmente a porosidade da biomassa desenvolvendo processos anaeróbios, por outro lado, sensível também à falta de umidade que pode acarretar em estagnação dos processos de degradação. Os valores ideais de umidade da massa tendem a decrescer com o avanço dos processos de estabilização.

### **Nutrientes**

A relação C/N ideal varia entre 25 e 30; deve-se considerar que cada desvio médio destes valores leva a carências ou excessos que condicionam fortemente as atividades biológicas.

### **pH**

Do ponto de vista qualitativo, a substância orgânica ao término do processo de compostagem apresenta-se da seguinte forma:

- Estável: processos lentos de degradação de natureza biológica;
- Madura: não apresenta fenômenos de fitotoxicidade.

### *3.1.3 Sistemas para a compostagem*

No que se refere às necessidades de processo, os sistemas podem ser classificados segundo os seguintes critérios:

- grau de complexidade tecnológica: sistemas extensivos e sistemas intensivos;
- presença e frequência da movimentação: sistemas dinâmicos e sistemas estáticos;
- uso de aeração: sistemas aerados e não aerados.

Na prática a principal diferença é função do confinamento em relação ao ambiente externo:

- sistemas fechados: o processo é realizado em bioreatores ou em áreas cobertas (galpões) de forma a:

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

- obter um melhor controle das condições de processo, devido ao isolamento das condições atmosféricas;
- ter maior controle sobre a geração dos odores;
- sistemas abertos: para realizar um sistema aberto são necessárias condições de baixa fermentabilidade das matrizes, de colocação em áreas rurais e distantes de centros habitados, e dimensões operacionais limitadas.

A adoção dos sistemas abertos na realidade pode ser sugerida e prevista nas etapas seguintes à fase ativa do processo (fase de maturação), na qual a fermentabilidade, as emissões de odores e o consumo de oxigênio são menores.

#### 3.1.4 Compostagem em ambiente aberto

A principal característica da compostagem em sistemas abertos é o contato direto entre a biomassa e a atmosfera e a interdependência entre esses dois elementos: de fato, a biomassa emite odores, gás estufa, esporas, germes e poeira. Por outro lado, o ar influencia a biomassa na leira de compostagem através de:

- fornecimento de oxigênio;
- chuva: é uma vantagem se o material estiver muito seco e uma desvantagem porque bloqueia os poros, intensifica processos anaeróbios, reduz a qualidade do composto e aumenta a quantidade de chorume;
- temperatura do ar: o calor favorece a evaporação se a massa for muito úmida, aumentando assim o espaço disponível para o ar, mas tem a desvantagem de desidratar a massa ou de inibir o processo no caso de ar frio;
- umidade: a baixa ou alta umidade pode aumentar ou diminuir a velocidade de evaporação.

A forma das leiras, cujas dimensões variam em função do clima, do tipo de resíduo a ser compostado e do método de revolvimento, pode ser:

- triangular;
- trapezoidal;
- retangular.

As leiras de compostagem diferenciam-se também pelo fato de serem aeradas ou não aeradas, estáticas ou dinâmicas:

- Pilhas estáticas aeradas: sistema tecnologicamente simples, prevê a colocação da biomassa em pilhas, com aeração forçada por aspiração debaixo das próprias pilhas

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

e envio do ar exausto a um biofiltro; coloca-se uma camada de composto curado na superfície das pilhas, para proporcionar um leve efeito de isolamento e garantir a biofiltração dos efluentes gasosos da superfície da pilha, telas adequadas ou membranas semipermeáveis. A principal característica é a simplificação operacional e além disso a falta de revolvimentos da pilha não afeta a biomassa micróbica e impede a difusão de odores. Sendo um sistema estático necessita de um alto percentual de material de natureza lignocelulósica.

- Leiras revolvidas não aeradas: requerem a colocação da biomassa em cúmulos de grandes dimensões (3-4 metros de altura; 3 a 20 metros de largura), geralmente sem aeração. Utilizam freqüências de revolvimento semanais ou mensais através de pá mecânica; este sistema é utilizado geralmente para resíduos verdes ou para biomassas que se encontram já em estados avançados de bioestabilização.



**Figura 3.1** Conjunto de leiras estáticas na fase de bioestabilização (Fonte: Embrapa, 2004)

### 3.1.5 Compostagem em ambiente fechado

A compostagem em ambiente fechado ocorre em reatores fechados verticais ou horizontais, geralmente estáticos, mesmo se alguns utilizam sistemas de movimentação interna: a biomassa é colocada em camadas de, no máximo, 3 metros de altura. As principais características desses

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

sistemas são o uso de arejamento forçado e a canalização do ar exausto para sistemas de tratamento. As estruturas podem ser de metal ou concreto.

Como as exigências de aeração são muito maiores para manter constante a temperatura do sistema do que para injeção de oxigênio, alguns reatores possuem um mecanismo para troca de calor: por ele passa o ar exausto depois da passagem pela biomassa de forma a liberar o calor para o meio externo.

Na compostagem são usados inúmeros tipos de reatores. Os principais parâmetros que os diferenciam podem ser resumidos em:

- capacidades operacionais;
- flexibilidade e adaptação aos vários tipos de resíduo;
- mobilidade;
- custos de investimento;
- dimensões;
- seção horizontal ou vertical;
- tipo de equipamento de movimentação da biomassa;
- tempo de retenção.

### 3.1.6 Tratamentos finais

Os tratamentos finais visam condicionar o material final antes de transportá-lo para fora da usina, com o objetivo específico de uniformizar a granulometria e eliminar os objetos indesejados que eventualmente permaneceram depois dos pré-tratamentos, ou de melhorar a natureza física (ex. umidade), a granulometria, a consistência do material final.

Resumindo e esquematizando, os tratamentos finais podem ser classificados em:

- dessecação;
- peletização;
- refinação por dimensão, densimétrica, etc.

A qualidade do composto a ser utilizado como fertilizante e como condicionador do solo deve satisfazer alguns requisitos:

- baixo nível de contaminação, principalmente de metais pesados;
- conteúdo adequado de nutrientes e de matéria orgânica;
- relação C/N adequada;
- pH neutro;

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

- grau de maturação adequado;
- ausência de interferências no crescimento de plantas ou partes destas, por ex: brotos;
- poucas pedras;
- ausência de odores desagradáveis;
- cor marrom escuro.

### 3.2 Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica consiste na degradação biológica anaeróbia dos resíduos orgânicos, pela ação bacteriana, em ambiente anaeróbio, produzindo biogás (constituído por gás carbônico e metano) e um produto final fitotóxico, húmido e contaminado microbiologicamente, que segue para compostagem. Deste modo, a digestão anaeróbica permite a valorização energética e a valorização agrícola dos resíduos com componente orgânica.

A vantagem do processo é que a energia bioquímica contida na substância orgânica, ao invés de ser liberada como calor, conserva-se devido à conversão parcial em metano utilizável como energia. O processo é realizado em várias etapas por vários tipos de bactérias especializadas; para uma aplicação industrial correta é necessário conhecer todas as interações e mecanismos, para evitar fenômenos indesejados como a carência de substrato ou a inibição do processo.

A produção de biogás ocorre em nível microbiano em três estágios:

1. Hidrólise;
2. Acidificação;
3. Metanização.

**Fase hidrolítica:** nesta fase ocorrem as transformações que levam à degradação das substâncias orgânicas mais complexas em compostos mais simples que serão em seguida transformados em biogás; verifica-se uma liquefação e gasificação do material realizada por enzimas, que rompem as macromoléculas em moléculas menores utilizáveis pelas bactérias.

**Fase acidogênica:** os produtos já decompostos são ulteriormente transformados por meio de bactérias acidogênicas que produzem ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ácido acético, e em menor quantidade ácido propiônico e láctico), álcoois (etílico, metílico, propílico), aldeídos e cetonas. Nesse estágio ocorre a produção de amônia, CO<sub>2</sub> e hidrogênio.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

**Fase metanogênica:** os ácidos orgânicos e os sais produzidos nas fases anteriores são transformados diretamente em metano e CO<sub>2</sub>. Cerca de 70% do metano produzido deriva da fermentação de ácido acético, enquanto os 30% restantes podem derivar da redução do gás carbônico ou do metanol eventualmente produzido na primeira fase.

Cada etapa envolve uma determinada espécie bacteriana, que precisa de condições ambientais específicas que nem sempre coincidem com as condições das outras espécies. Por isso, as condições internas do digestor devem maximizar a produção de gás, porém, sem danificar nenhuma espécie bacteriana presente no digestor.

A eficácia de um processo em série é condicionada pelo elemento mais fraco: na digestão anaeróbica o ponto fraco é representado pela fermentação do metano. O desenvolvimento de bactérias metanogênicas, além de ser muito lento, é também inibido por pequenas quantidades de oxigênio e pela presença de nitritos e nitratos. Os microrganismos anaeróbios apresentam baixas velocidades de crescimento e baixas velocidades de reação e, portanto, é necessário manter as condições do ambiente de reação adequadas. Apesar dessas medidas, os tempos de processo são relativamente longos se comparados aos de outros processos biológicos. O rendimento energético do processo é muito variável e depende da biodegradabilidade do substrato tratado.

As técnicas de digestão anaeróbia podem ser subdivididas em dois grupos principais:

- Digestão seca (dry digestion), quando o substrato encaminhado para a digestão possui uma quantidade de sólidos totais entre 25% e 45%;
- Digestão úmida (wet digestion), quando o substrato possui uma quantidade de sólidos totais inferior a 15%.

O processo de digestão anaeróbia também é subdividido em:

- processo monofásico: as fases de hidrólise, fermentação ácida e metanogênica ocorrem contemporaneamente em um único reator;
- processo bifásico: o substrato orgânico é hidrolisado separadamente numa primeira fase, na qual ocorre também a fase ácida, enquanto a fase metanogênica é realizada em uma segunda etapa.

A tabela abaixo mostra algumas características do processo de digestão.

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

Modalidade de processo	Seco	úmido
Conteúdo de sólidos totais	25 – 45%	2 – 15%
Volume reator	mínimo	grande
Técnica de pré-tratamento	cara	simples
Agitação	difícil	simples
Scumming	baixo risco	alto risco
Separação líquido - sólido	simples	cara
Variedade do resíduo a tratar	pequena	grande

Modalidade de processo	Um estágio	Dois estágios
Segurança	igual	
Equipamento	relativamente simples	muito complexo
Controle do processo	soluções improvisadas	ótimo
Risco de instabilidade	Alto	mínimo
Tempo de retenção	Longo	curto
Velocidade de degradação	Baixa	alta

### 3.2.1 Parâmetros operacionais

A digestão anaeróbica é influenciada por um grande número de transformações efetuadas por diversas bactérias presentes no digestor: as populações bacterianas são dependentes entre si, por isso para que as reações se desenvolvam corretamente, é necessário que as condições sejam adequadas e que haja uma boa integração entre os vários parâmetros operacionais descritos a seguir:

#### Temperatura

A digestão anaeróbia pode ocorrer em condições:

- mesófilas: cerca de 35°C, tempo de detenção entre 14 e 30 dias;
- termófilas: cerca de 55°C, tempo de detenção geralmente inferior a 14-16 dias, maior rendimento.

Para controlar a temperatura pode-se prever um aquecimento externo ou interno à massa.

#### Tempo de detenção

É inversamente proporcional à temperatura interna do digestor. A produção de gás aumenta com o tempo de retenção.

#### Carga orgânica

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

A eficácia do processo de digestão anaeróbia depende da carga orgânica da substância submetida à fermentação.

### pH

O pH deve estar entre os valores mínimos de 6.6 - 7.6 e máximos de 7.5 - 8.5.

### Substâncias úteis e tóxicas

Para que o processo de fermentação ocorra corretamente, é necessário que dentro do digestor estejam presentes elementos necessários à nutrição das bactérias. Não deverão faltar os seguintes elementos: carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre. Algumas substâncias tóxicas, se presentes em quantidades adequadas, são úteis, mas se excederem certos valores dentro do digestor tornam-se danosas.

### 3.2.2 Digestores

Os digestores são reatores onde é colocado o material orgânico que será submetido à transformação anaeróbia. Geralmente são feitos de cimento e são parcialmente enterrados para limitar a perda de calor. O gás produzido é recolhido em um gasômetro para ser distribuído aos usuários.

Pode-se classificar os digestores em duas categorias distintas:

*Digestores contínuos:* as matérias orgânicas são inseridas em extremidade e os resíduos da digestão são extraídos pela parte oposta. As bactérias presentes no digestor são nutridas continuamente e a temperatura mantém-se a valores constantes. Os resíduos devem ser introduzidos junto com um efluente líquido. Este líquido faz com que as bactérias anaeróbias encontrem-se em ausência de oxigênio livre.

*Digestores descontínuos:* apresentam um funcionamento cíclico. Neste tipo de digestor coloca-se primeiro o material orgânico e logo em seguida o efluente; segue a fase de fermentação, na qual ocorrem as transformações biológicas e ao término desta o digestor é esvaziado; assim o sistema está pronto para ser alimentado com material orgânico novo, recomeçando o ciclo.

Entre as saídas do sistema há também o resíduo da biomassa digerida (*digestate*), para o qual é preciso prever uma fase de maturação aeróbia que garanta o completamento da fase de estabilização do componente orgânico. Na saída da digestão aeróbia, o *digestate* é menos versátil que o composto quanto a possíveis aplicações devido à toxicidade ainda relativamente elevada (pela presença de amônia e pela presença de matéria orgânica residual ainda fermentável) e deve ser tratado como um lodo. A digestão anaeróbia deve ser vista como substitutiva das primeiras

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

fases de transformação num sistema de tratamento aeróbico enquanto permanece a necessidade de uma unidade de maturação final aeróbica.

### 3.2.3 O biogás

O biogás é uma mistura formada por:

- Metano: é o composto presente em maior quantidade no biogás. A presença de metano faz com que o biogás possa ser utilizado como combustível.
- Óxido de carbono: no biogás este componente não alcança percentuais perigosos. É um combustível e pode originar diversos produtos (gas carbônico, ácido fórmico, etc.)
- Gas carbônico: o gas carbônico prejudica a combustão.
- Nitrogênio: a presença excessiva de nitrogênio no biogás indica uma fermentação em presença de oxigênio ou uma perda no digester.
- Hidrogênio: é facilmente inflamável e sua presença no biogás indica uma fermentação não estabilizada.
- Hidrogênio sulfurado.

O biogás é uma mistura dos gases acima descritos, cuja composição varia de acordo com as condições operacionais e de processo. É um combustível usado principalmente como substitutivo dos combustíveis tradicionais para a demanda energética das indústrias agrícolas ou zootécnicas: seu poder calorífico é inferior ao do metano e varia entre 20 MJ/m<sup>3</sup> e 28 MJ/m<sup>3</sup>.

### 3.3 Comparação entre compostagem e digestão anaeróbia

A comparação entre digestão anaeróbia e compostagem pode ser realizada por meio de três diferentes pontos de vista:

#### Complexidade do processo e consolidação tecnológica

Compostagem	Digestão anaeróbica
Processo simples	Processo tecnológico
Fácil controle de temperatura e umidade	Controle mais apurado de temperatura, pH, tempo de permanência, SOV
Diferentes esquemas de processo	Inibição ou desativação

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

## Impacto ambiental

	Compostagem	Digestão anaeróbica
Sólidos	Composto	Estabilização aeróbica; Composto
Líquidos	Semelhantes	
Emissões atmosféricas	Filtração; Lavagem da fermentação e estabilização	Gás de combustão

## 4 OUTROS TRATAMENTOS

### 4.1 *Incineração*

A incineração é um processo de queima de resíduos, realizado a alta temperatura (900 a 1250 °C), com tempo de residência controlado. Nesta tecnologia ocorre a decomposição térmica, via oxidação, a alta temperatura, da parcela orgânica dos resíduos, transformando-a numa fase gasosa e outra sólida, reduzindo o volume, o peso e as características de perigosidade dos resíduos.

Este tipo de sistema tem sido implementado em zonas de grande produção de resíduos por permitir uma redução do volume inicial até cerca de 90%. Os sub-produtos deste processo são a energia calorífica (que é transformada em energia elétrica ou vapor), águas residuárias, gases, cinzas e escórias.

Os gases resultantes da incineração devem ser submetidos a um tratamento posterior, uma vez que são compostos por substâncias consideradas tóxicas (chumbo, cádmio, mercúrio, cromo, arsénio, cobalto e outros metais pesados, ácido clorídrico, óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, dioxinas e furanos, clorobenzenos, clorofenóis e PCB). O efluente gerado pelo resfriamento das escórias e pela lavagem dos gases, tem que ser submetido a um tratamento adequado.

Visando a correta gestão dos resíduos, a incineração requer uma adequada triagem a montante do processo, de modo a garantir que sejam encaminhados para incineração apenas resíduos indiferenciados, não sujeitos a coleta seletiva e a valorização orgânica.

Apresenta como principais vantagens a valorização energética dos resíduos, o monitoramento on-line contínua de todo o processo e o controlo das emissões atmosféricas,

 Cooperação Brasil-Itália	Metodologia: individual
	<b>GESTÃO INTEGRADA EM SANEAMENTO</b>
	Disciplina 11: Gestão de Resíduos Sólidos
	UD 4: Valorização dos resíduos sólidos

permitindo ainda flexibilidade na forma de recepção dos resíduos (tambores, caixas, fardos, sacos e big-bags).

## 4.2 Pirólise

A pirólise consiste na degradação térmica das moléculas orgânicas dos RSU na ausência de oxigénio (destilação destrutiva, destilação). A temperatura elevada (> 700 °C) favorece a formação de compostos gasosos simples, como hidrogénio (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e metano (CH<sub>4</sub>). Em contraste com os processos de combustão e de gaseificação, a pirólise é um processo altamente endotérmico, sendo necessário fornecer entre 2.6 a 4 MJ/Kg de resíduos.

## 4.3 Gaseificação

A gaseificação consiste num processo de combustão parcial, no qual um combustível é deliberadamente queimado com insuficiência de oxigénio (ar, vapor, oxigénio puro), com produção de gás combustível rico em CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos, grandes quantidades de azoto (N<sub>2</sub>), cerca de 53 %, e um resíduo sólido (coque e inertes originalmente presentes).

## 4.4 Bibliografia



Leitura técnica: *Bibliografia\_ud\_11\_4.pdf*