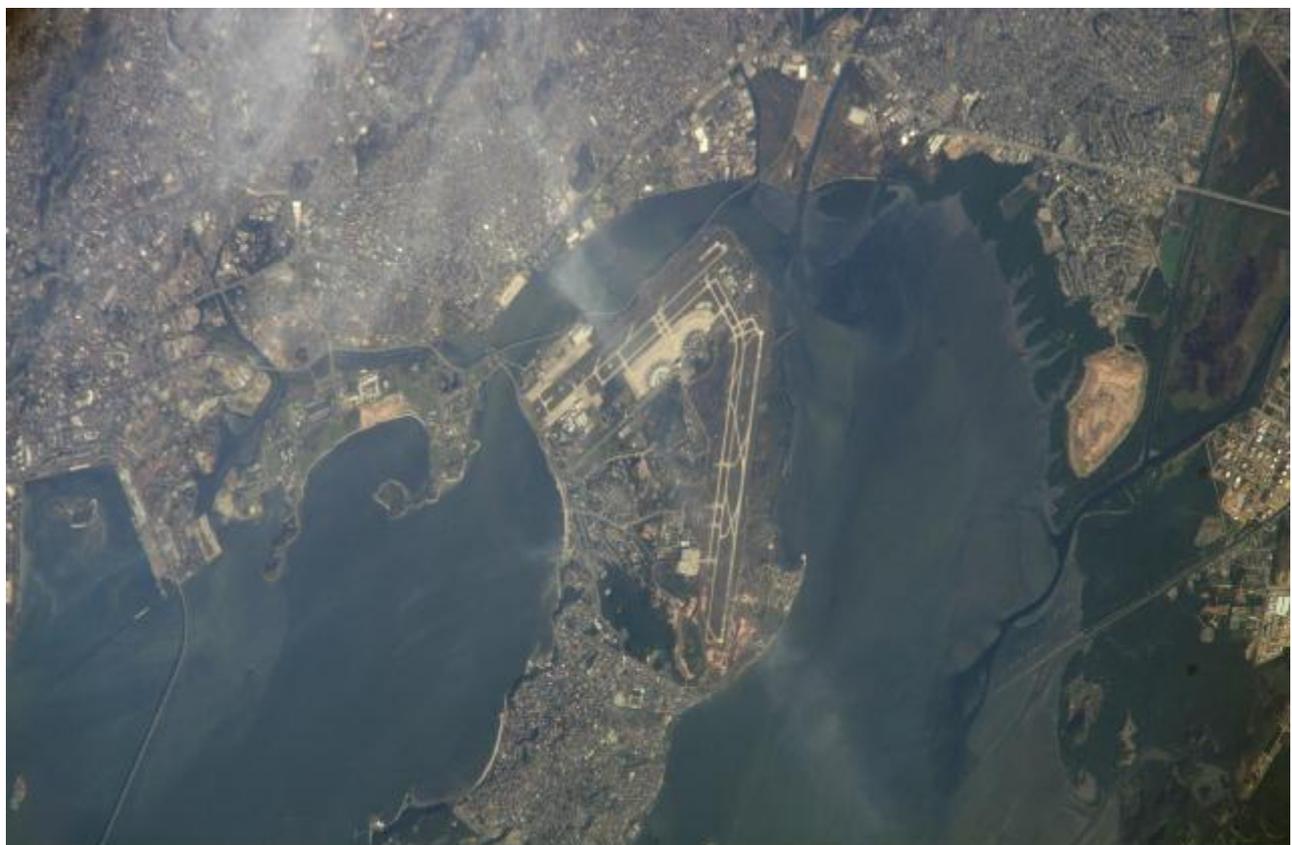


**ORIGENS, TRATAMENTOS E CONTROLE
DAS
EMISSÕES GASOSAS (DAS DIOXINAS E FURANOS)
EM
INCINERADORES E ATERROS DE LIXO**

ABRAHAM ZAKON

**Prof. Associado
Eng. Químico, D. Eng.
Escola de Química – Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro**



Fotografia Espacial das Ilhas do Fundão e Governador, Aterro Municipal de Gramacho e partes da Ponte Rio-Niterói e Baía de Guanabara

(Fonte: www.nasa.gov – extraída em 29 de dezembro de 2006)

O PRECONCEITO A SUPERAR:

- "A INCINERAÇÃO POLUI O MEIO AMBIENTE!"

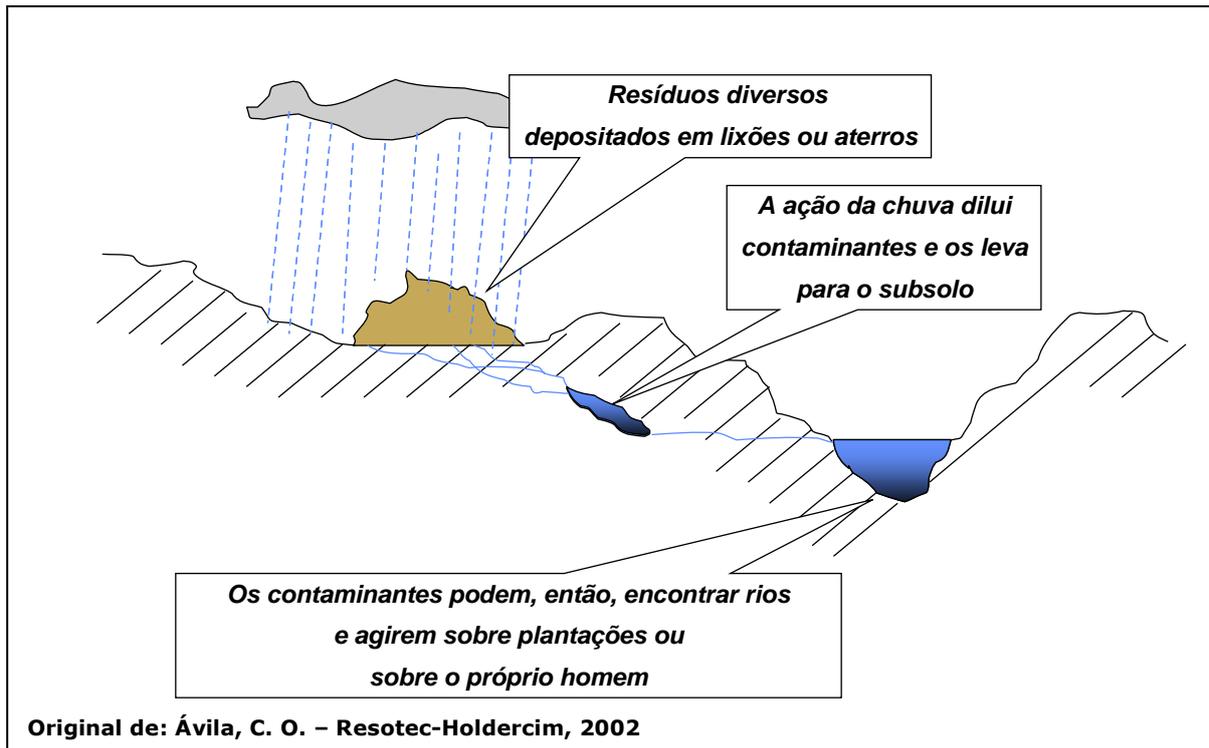
**EFEITOS NOCIVOS DOS
LIXÕES, ATERROS CONTROLADOS E SANITÁRIOS
PRODUZEM
CHORUMES E DIOXINAS E FURANOS
E
ENVENENAM O AMBIENTE!**



PONTO DE AFLORAMENTO DO CHORUME NO ATERRO MUNICIPAL DE GRAMACHO, RJ

(Fotografia obtida por Daniel Zakon em 06/junho/2007)

O CHORUME RESULTA DA MISTURA DOS LÍQUIDOS ORIGINAIS DO LIXO COM A ÁGUA DAS CHUVAS, SUAS REAÇÕES QUÍMICAS E MAIS A AÇÃO MICROBIANA.



O BIOGÁS RESULTA AÇÃO MICROBIANA SOBRE OS COMPONENTES DO LIXO NO AMBIENTE ÚMIDO E AQUECIDO DO SUBSOLO ARTIFICIAL E PODE SER CAPTADO PARA QUEIMA LOCAL OU POSTERIOR



**PONTO DE AFLORAMENTO E QUEIMADOR DO BIOGÁS
OU
DAS SUAS EMISSÕES GASOSAS**

(gases de combustão, pirólise e gasificação mais dioxinas e furanos)

NO ATERRO MUNICIPAL DE GRAMACHO, RJ

(Fotografias obtidas por
Daniel Zakon em 06/junho/2007 (à esquerda) e
Felipe Affonso Dantas dos Santos em 01/novembro/2002).

ESTÁGIOS POSSÍVEIS NUMA COMBUSTÃO

(adaptado de Cooper, 1963)

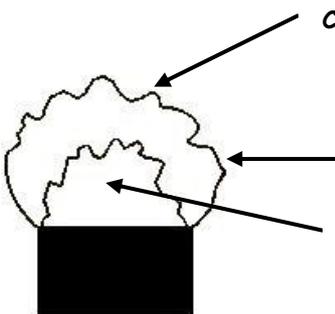
| | |
|---|---|
| OXIDAÇÃO ou Queima Invisível | - é uma reação exotérmica lenta, cujo calor , se não for removido pode provocar uma queima visível. |
| IGNIÇÃO | - indica o início da queima visível, ou a detonação de uma explosão; - pode resultar de: (a) uma faísca; (b) uma chama pequena; (c) um aumento de temperatura no combustível. |
| QUEIMA VISÍVEL ou Inflamação | - é geralmente associada com calor ao rubro e chamas, cuja reação exotérmica é muito mais rápida que a oxidação. |
| CHAMA | - corresponde a propagação da ignição, - ocorre por: (a) combustão completa de gases, vapores e sólidos, ou (b) combustão incompleta de C para gerar CO. |
| EXPLOSÃO | - é uma reação exotérmica, auto-propagante, muito rápida, que atinge temperaturas elevadas. |



A CHAMA

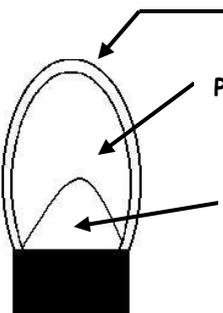
- É o volume espacial onde a oxidação se realiza.
- Resulta do movimento da massa incandescente.
- **Pode ser luminosa ou não.**

TIPOS DE CHAMAS FORMADAS EM QUEIMADORES DE GÁS



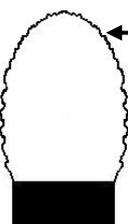
A - QUEIMA SEM INJEÇÃO DE AR

A queima é lenta. A chama é grande e luminosa. O cone interno se alonga e pode desaparecer. As temperaturas são maiores na periferia do cone de combustão, porém, relativamente baixas, em comparação com as seguintes. Sem ar primário, torna-se amarela.



B - QUEIMA COM INJEÇÃO DE AR PRIMÁRIO

É rápida, irregular e estável. É menos luminosa. Quanto maior a proporção de ar (primário + secundário) para o gás, mais rápida será a combustão e menos luminosa será a chama.



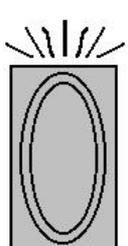
C - QUEIMA COM INJEÇÃO CORRETA DE AR PRIMÁRIO

Os cones de combustão e ignição parecem confundir-se. A chama é não-luminosa, quase-violeta. As velocidades de queima (chama) e de fluxo da mistura combustível-ar são iguais.



D - QUEIMA COM INJEÇÃO EXCESSIVA DE AR

O deslocamento ("lift") da chama de cor violeta provoca um ruído rouco característico. A combustão pode ser incompleta e formar CO ou aldeídos. A velocidade do fluxo da mistura ar-gás é maior do que a de queima (chama).



E - QUEIMA DENTRO DO COMBUSTOR

O retorno de chama ocorre quando a velocidade de queima na chama é maior do que a velocidade de mistura ar-gás.

FENÔMENOS CLIMÁTICOS E PROCESSOS TÉRMICOS EM ATERROS E INCINERADORES DE LIXO

1º - INSOLAÇÃO E SECAGEM

2º - EVAPORAÇÃO

3º - REAÇÕES QUÍMICAS QUE DESTRUAM OU DEGRADEM ARTEFATOS,
SUBSTÂNCIAS E
MOLÉCULAS.

4º - CHUVAS, NEBLINAS, GEADAS

5º - ABSORÇÃO DE UMIDADE DO AR

EFEITOS TÉRMICOS RESULTANTES NO LIXO EXPOSTO AO AR LIVRE OU ENTERRADO

Termodecomposição ou Termodestruição

DESTRUIÇÃO PARCIAL ou TERMOCONVERSÃO

Pirólise = decomposição na ausência de O_2 ou ar

Gasificação = decomposição com O_2 ou ar insuficiente

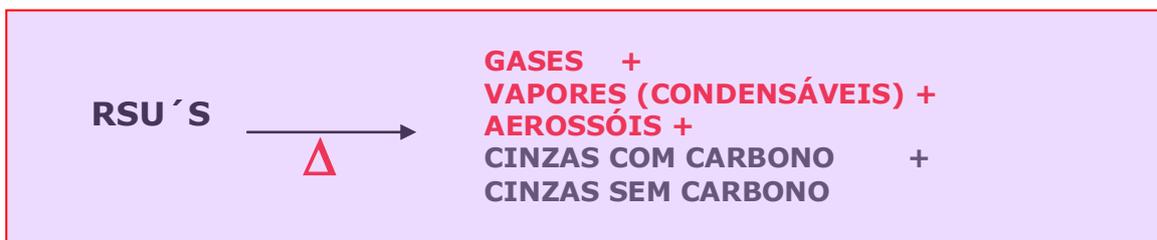
TERMODESTRUIÇÃO TOTAL

Incineração = queima total com O_2 estequiométrico
ou com excesso de ar.

FENÔMENOS TERMOQUÍMICOS NUM INCINERADOR DE RSU'S

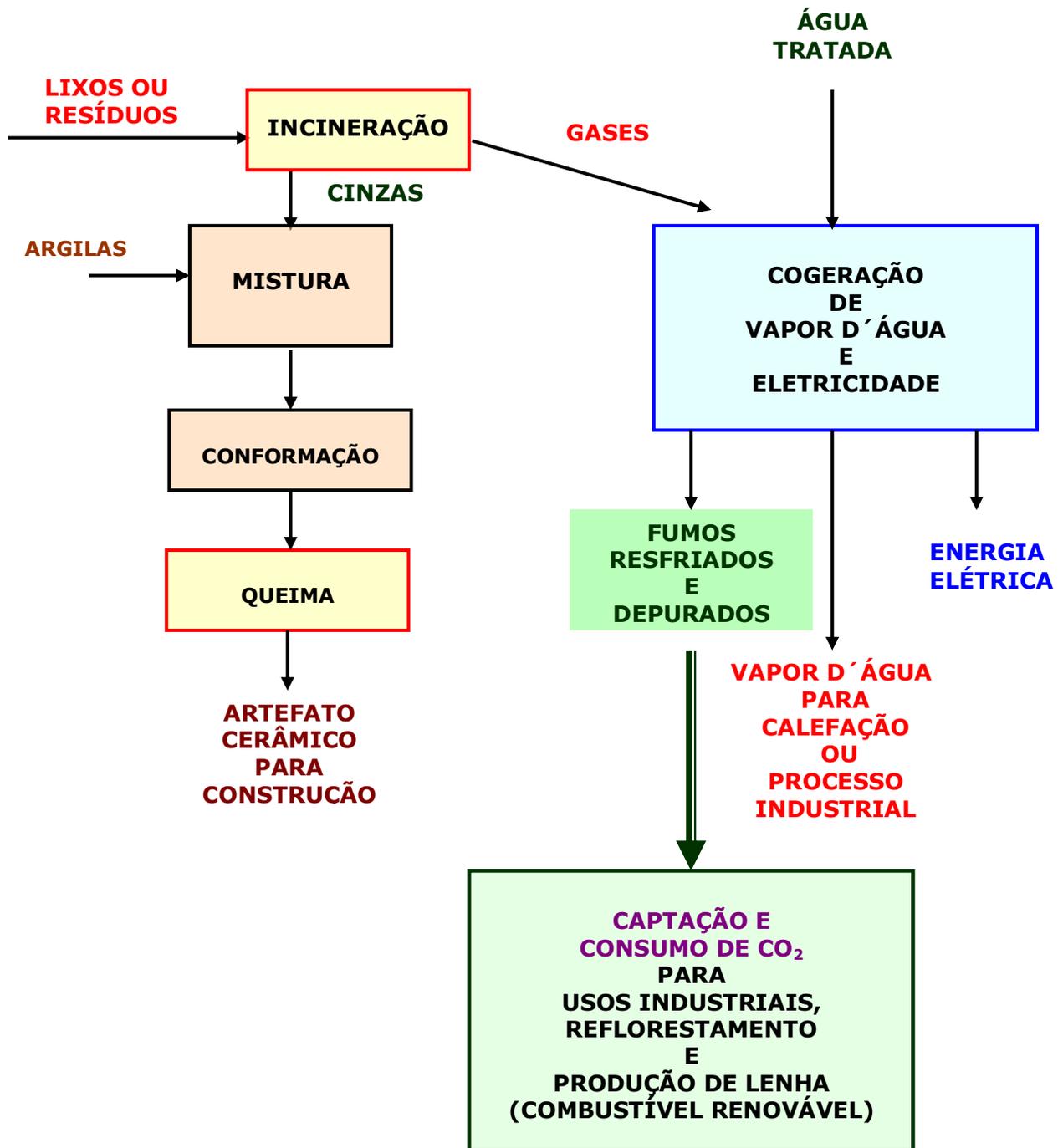


BALANÇO SIMPLIFICADO PARA UM TERMOPROCESSAMENTO DE LIXO



A INCINERAÇÃO NORMAL OPERA COM 40 A 100% DE EXCESSO DE AR.

CERAMIZAÇÃO DAS CINZAS DE INCINERAÇÃO DE LIXO



A FORMAÇÃO E DESTRUIÇÃO DAS DIOXINAS E FURANOS

- *são os poluentes atmosféricos mais alardeados;*
 - *sua formação depende da disponibilidade de matéria orgânica, oxigênio, cloro ou cloretos e de catalisadores (produtos químicos ou enzimas),*
 - *resultam de reações à grande pressão e temperaturas entre 200°C e 400°C (durante um aquecimento ou resfriamento).*
-
- *os cloretos ou moléculas de cloro presentes na termodestruição de lixo podem e devem ser eliminados no intervalo de temperaturas entre 850°C a 1200°C.*

A ELIMINAÇÃO DOS PRECURSORES DAS DIOXINAS E FURANOS

- *Para evitar a regeneração das dioxinas e furanos destruídos, emprega-se um sistema de resfriamento rápido dos gases para **reduzir a temperatura de 800 °C até abaixo de 100°C em menos de cinco segundos.***
- *As soluções cabíveis são:*
 - 1ª – usar um filtro com carvão ativado antes da chaminé;*
 - 2ª – empregar catalisadores para destruir as dioxinas e furanos em processos oxidativos;*
 - 3ª - usar um resfriador estequiométrico instantâneo de gases (conhecido como "quencher") que lança uma solução alcalina para reagir com ácidos e íons de cloro;*
 - 4ª - uma caldeira co-geradora de vapor d'água mais um trocador de calor e uma unidade lavadora de gases.*

POTENCIAL POLUIDOR SOBRE O AR ATMOSFÉRICO

- * **OS COMPONENTES RESIDUAIS LANÇADOS EM LIXÕES E ATERROS CONTROLADOS E SANITÁRIOS PODEM SOFRER OXIDAÇÃO OU COMBUSTÃO ESPONTÂNEA (INVISÍVEL) E POLUIR O AR .**

**SERÁ POSSÍVEL CONTROLAR QUEIMAS NO SEIO DOS LIXÕES E ATERROS?
E SE HOVER UM PERÍODO DE SECA PROLONGADA?**

- ** **SE NÃO OCORRER O REVOLVIMENTO DAS LEIRAS AS USINAS DE COMPOSTAGEM PODEM LIBERAR ODOR DESAGRADÁVEL.**

**E SE HOVER GREVE DE FUNCIONÁRIOS?
E SE OCORRER ALGUMA EPIDEMIA VINCULADA AO TRANSPORTE DE LIXO?**

VANTAGENS DA INCINERAÇÃO INDUSTRIALIZADA OU EMPREGO DE FORNOS ADEQUADOS

- * **A QUEIMA É CONTROLADA.**
- * **ELIMINA PATOGENICIDADE E MATÉRIAS ORGÂNICAS TÓXICAS.**
- * **REDUZ VOLUME EM ~ 90%.**
- * **REDUZ PESO EM 75% OU MAIS.**
- * **PRODUZ CINZAS, QUE PODEM SER RECICLADAS;**
- * **OS GASES SÃO DESEMPOEIRADOS E TRATADOS QUIMICAMENTE.**

OBJETIVOS DA TERMODESTRUÇÃO SUSTENTÁVEL



**A INCINERAÇÃO É OBRIGATÓRIA PARA
O LIXO DE BORDO DAS AERONAVES INTERNACIONAIS.**

**EM QUALQUER FORNO INDUSTRIAL,
É POSSÍVEL TRATAR AS EMISSÕES GASOSAS
E
ELIMINAR AS FONTES DE CLORO NAS EMISSÕES GASOSAS.**

**EM LIXÕES E ATERROS,
FORMAM-SE DIOXINAS E FURANOS
SEM
CONTROLE OU CAPTAÇÃO OU
MEIOS PARA SUA REMOÇÃO PLENA.**

**RESULTADOS DAS PESQUISAS INICIAIS SOBRE
INCINERAÇÃO DE LIXOS
DESENVOLVIDAS NO
LABORATÓRIO DE CIMENTOS E CERÂMICOS
DO DEPARTAMENTO DE PROCESSOS INORGÂNICOS DA
ESCOLA DE QUÍMICA DA UFRJ**

**OBTENÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS
A PARTIR DAS CINZAS DE INCINERAÇÃO DE LIXOS.**



- A - Cinzas originais obtidas após queima do lixo de aeronaves a 900 °C na Usina de Incineração do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro e classificadas na peneira ABNT nº 10 .**
- B - Cinzas originais moídas até passarem na peneira ABNT nº 325.**
- C - Grãos moídos e peneirados até 0,044 mm, requeimados a 1.100°C durante 1 min.**
- D e E - Pastilhas sinterizadas frágil (D) e dura (E) obtidas na requeima de cinzas a 1.100°C durante, respectivamente, 30 e 60 minutos.**
- F – Pastilha aderida ao cadinho, indicando a possibilidade de revestir peças cerâmicas.**

DIOXINAS E FURANOS

(Assunção, 2000)

* São poluentes muito tóxicos

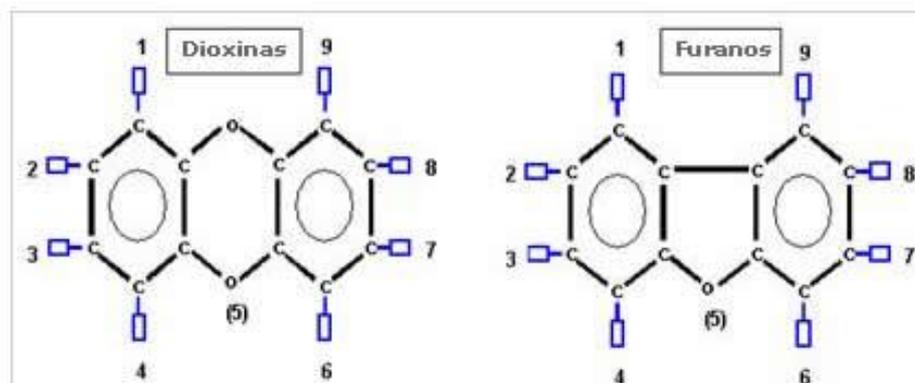
* São sub-produtos de processos envolvendo o **cloro**, como:

fabricação de pesticidas,
branqueamento de papel e celulose,
incêndios,
queima ou incineração de lixos ou
resíduos hospitalares, e industriais,
combustão em veículos automotores;

* **SÃO FORMADOS ENTRE 250 E 400 °C**

na combustão de resíduos químicos,
requerendo um resfriamento muito rápido das emissões gasosas
nesse intervalo de temperaturas, para evitar sua formação
e permanência.

FÓRMULAS MOLECULARES



OCORRÊNCIA E FORMAÇÃO DAS DIOXINAS E FURANOS

Três possibilidades são viáveis:

- 1ª – Podem estar presentes nos RSU´s e na combustão, mas, por problemas operacionais, como temperaturas < 800°C, não são destruídos.**
- 2ª - São formados durante a queima, devido à presença de compostos que são precursores; ex.: ascarel, PVC, etc.**
- 3ª - São formados em reações entre compostos contendo Cl, C e O, favorecidas pela presença de alguns metais, e ocorrem no resfriamento entre 600°C e 200°C.**

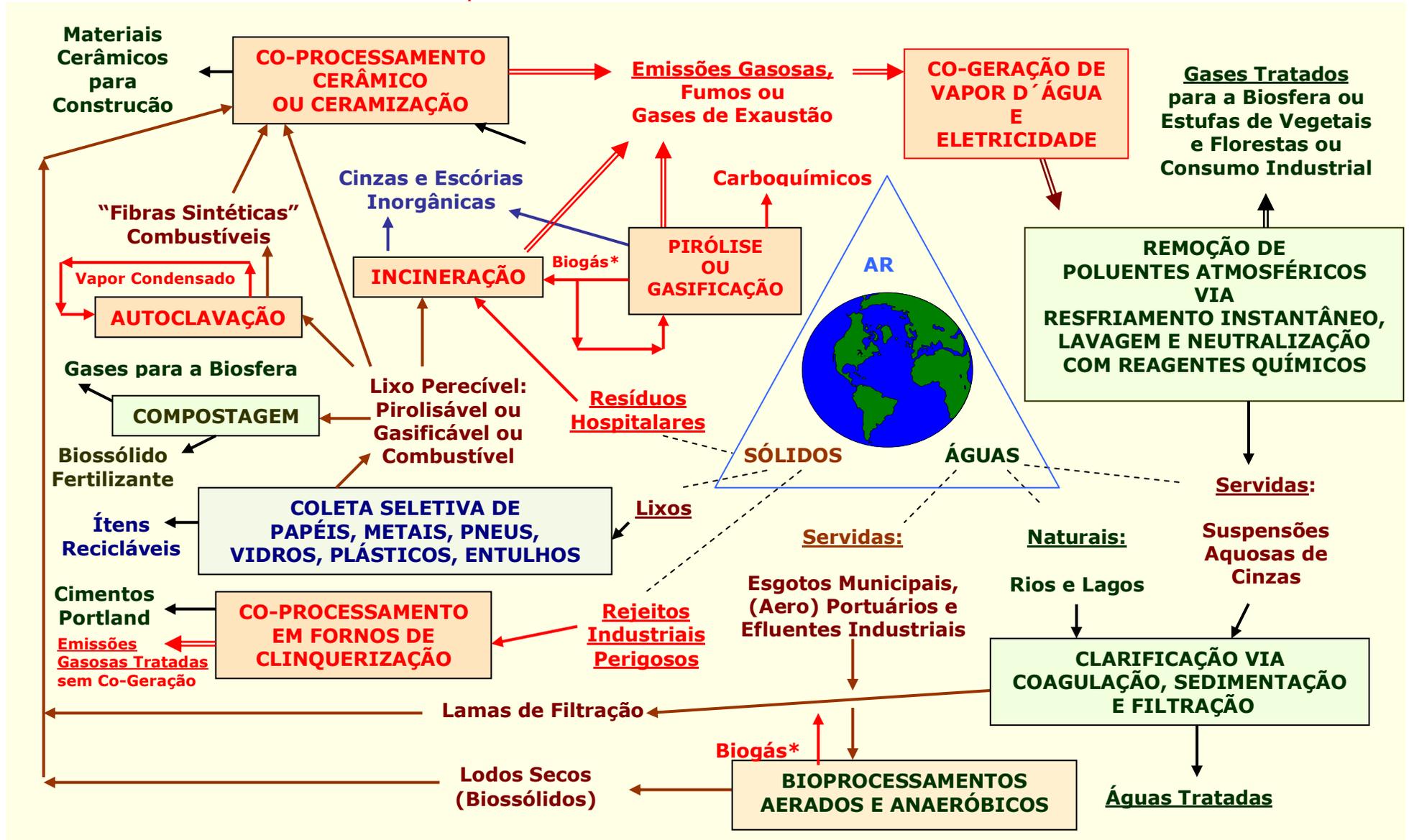
DEGRADAÇÃO E FORMAÇÃO DAS DIOXINAS E FURANOS

Os principais precursores são os cloretos.

Também, admite-se que:

- a) a combustão incompleta da matéria orgânica forma fragmentos orgânicos que atuam como precursores;**
- b) a existência de cloro (liberado do resíduo durante a pirólise) e metais constitui um fator imprescindível para a formação das dioxinas e furanos.**
- c) o precursor orgânico adsorve na superfície metálica, e, seguindo uma seqüência complexa de reações, forma os componentes indesejáveis.**

TERMOPROCESSAMENTOS E A DESPOLIÇÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DE LIXOS, REJEITOS INDUSTRIAIS E DEJETOS ANIMAIS



DESPEJO DE LIXOS E REJEITOS EM VAZADOUROS

- LIXÃO

- RESULTA DA DESCARGA DESCONTROLADA NO SOLO, A CÉU ABERTO
- **DISSEMINA DOENÇAS ATRAVÉS DE INSETOS E RATOS,**
- CONTAMINA O SOLO E AS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS
- DECOMPÕE A MATÉRIA ORGÂNICA DO LIXO E PRODUZ O **CHORUME** (LÍQUIDO ESCURO, MAU CHEIROSO, **POLUIDOR DO SOLO, ÁGUAS E AR**),
- FAVORECE O DESCONTROLE DOS TIPOS DE MATERIAIS DESPEJADOS
- **INCORPORA RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE E INDUSTRIAIS,**
- PESSOAS RESIDEM NO LOCAL, CATAM MATERIAIS E CRIAM PORCOS

- ATERRO CONTROLADO

- USA RECURSOS E TÉCNICAS DE ENGENHARIA CIVIL
- **CONFINA OS RESÍDUOS SÓLIDOS NUMA ÁREA PRÉ-SELECIONADA,** COBERTOS DIARIAMENTE COM MATERIAL **INERTE (?)**.
- A BASE DA ÁREA OCUPADA NÃO É IMPERMEABILIZADA
- NÃO HÁ TRATAMENTO DO CHORUME NEM DE GASES GERADOS.

ATERRO SANITÁRIO

- CONTÉM VÁRIAS CAMADAS **IMPERMEABILIZADAS** SUPERPOSTAS
- PROMOVEM A DIGESTÃO ANAERÓBICA NAS CAMADAS DEPOSITADAS
- USA DRENOS DE COLETA DO CHORUME, ÁGUAS SUPERFICIAIS E GASES
- **NÃO EVITA TOTALMENTE A LIBERAÇÃO DE FLUIDOS PARA O AMBIENTE**
- NÃO ACELERA A “INERTIZAÇÃO” DO MATERIAL
- A DECOMPOSIÇÃO É PROLONGADA.

A industrialização do lixo urbano possibilita realizar:

- a catação (criteriosa) de componentes na municipalidade;
- a coleta seletiva (industrializada) em galpões apropriados;
- a compostagem de frações orgânicas;
- a lixiviação de frações ou lotes de lixo;
- a termodestruição de frações ou lotes de lixo;
- reduzir ou eliminar as demandas de áreas de aterro de lixo.

A incineração do lixo possibilita:

- 1º - reduzir a poluição;
- 2º - eliminar os aterros, lixões ou vazadouros;
- 3º - eliminar as emissões descontroladas de metano em aterros;
- 4º - gerar energia termoelétrica ou, simplesmente, calor;
- 5º - reciclar as cinzas nas indústrias de materiais de construção;
- 6º - captar o dióxido de carbono para usos comerciais, industriais e reflorestamento.

DESAFIOS E METAS ATUAIS DA DESTINAÇÃO DO LIXO MUNICIPAL

DESAFIOS ECONÔMICOS GLOBAIS:

- desenvolver formas sustentáveis de beneficiamento e aproveitamento de produtos obtidos a partir do lixo.
- reciclar substâncias sólidas e fluidas, e,
- poupar o consumo de fontes não-renováveis de energia.

SUSTENTABILIDADE DA TERMODESTRUIÇÃO DE LIXO:

será crescente se precedida de catação e coleta seletiva.

DESAFIO AMBIENTAL:

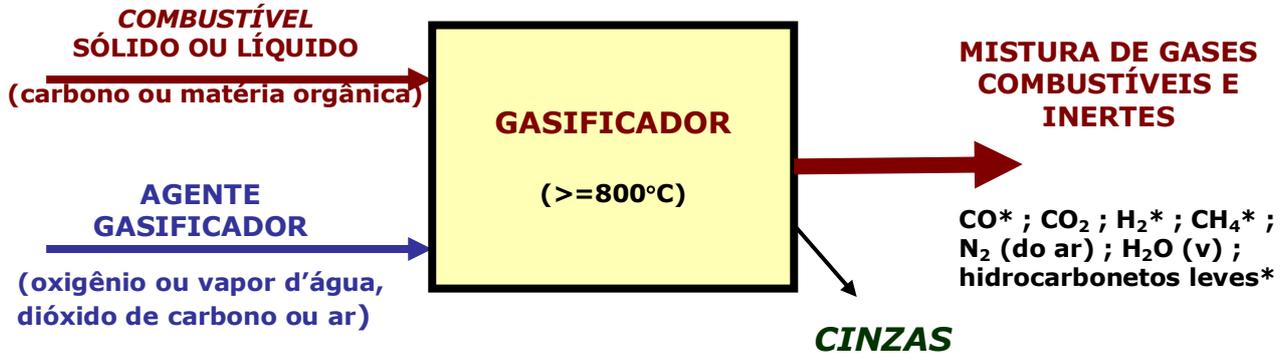
evitar a poluição atmosférica,
particularmente, a emissão de dioxinas e furanos,
e impedir a poluição dos solos e bacias hidrográficas.

INCINERAÇÃO, GASIFICAÇÃO E PIRÓLISE DE LIXO:

- ◆ produzem carboquímicos líquidos, emissões gasosas, cinzas e escórias inorgânicas, após a conversão parcial ou total dos seus componentes.
- ◆ possibilitam captar as emissões gasosas, tratá-las e co-gerar vapor d'água e eletricidade.

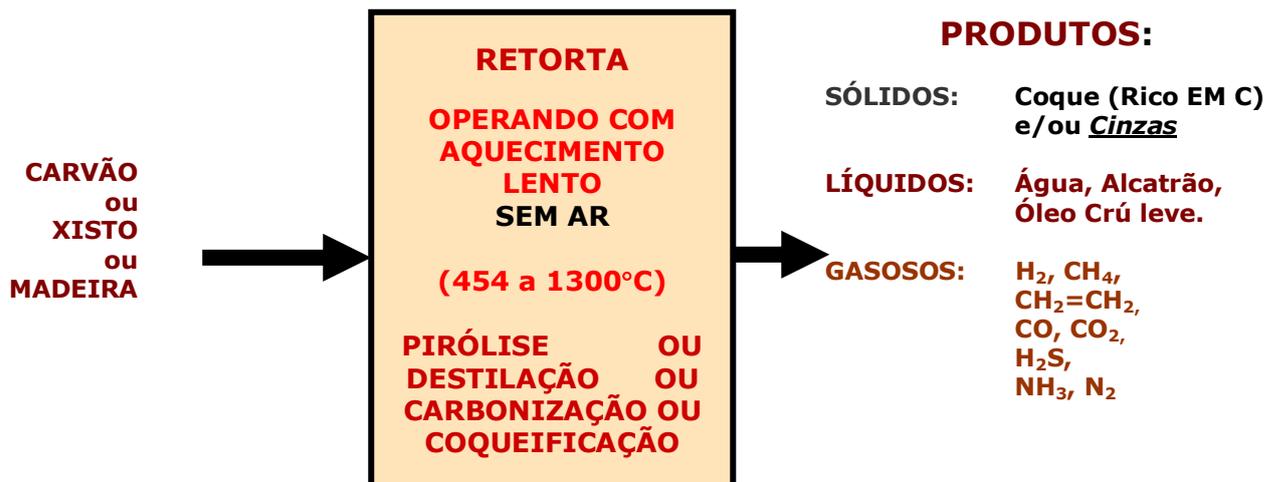
TERMODESTRUÇÃO OU CRAQUEAMENTO DE COMBUSTÍVEIS E MATERIAIS

(A) GASIFICAÇÃO DE MATERIAIS NÃO-COQUEIFICÁVEIS



Notas: O calor necessário à gaseificação provém da combustão de parte do gás combustível gerado
 * Cada composto assinalado nos produtos gasosos é uma fração combustível gerada ou liberada.

(B) PIRÓLISE OU DESTILAÇÃO DESTRUTIVA DE CARVÃO E SIMILARES (Inclusive na incineração de lixos, se a queima for imperfeita).



PIRÓLISE – opera em atmosfera redutora.

GASIFICAÇÃO – ocorre em ambiente redutor ou oxidante.

PROCESSOS INDUSTRIAIS DE PIRÓLISE OU CARBONIZAÇÃO OU COQUEIFICAÇÃO

(adaptado de Shreve e Brink, Jr.,1980)

- **Em temperaturas baixas - - 454 a 704 °C**
 - **FORMA-SE PEQUENA QUANTIDADE DE PRODUTOS GASOSOS;
PREDOMINAM OS PRODUTOS LÍQUIDOS.**

- **EM TEMPERATURAS ALTAS - - 900 a 982 °C (a CSN opera a Coqueria em 1300 °C)**
 - **QUANDO APLICÁVEL A CARVÃO BETUMINOSO,
OCORRE MAIOR RENDIMENTO DOS PRODUTOS GASOSOS,
E PEQUENA PRODUÇÃO DE ALCATRÃO.**
 - **O RESFRIAMENTO DO COQUE É FEITO COM ÁGUA.**

A COMPOSIÇÃO GENÉRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

$$RSU'S = \Sigma (\text{ PLÁSTICOS + PAPÉIS + BORRACHAS + PANOS + COUROS + } \\ \text{ ALIMENTOS + ÓLEOS + GRAXAS + } \\ \text{ LÍQUIDOS EMBEBIDOS OU DISSOLVIDOS (} \text{ÁLCOOIS+} \\ \text{ QUEROSENE + GASOLINA + ÉTER + DETERGENTES + } \\ \text{ ÁGUA SANITÁRIA + REMOVEDORES + SAPONÁCEOS) + } \\ \text{ RESTOS ANIMAIS + RESTOS VEGETAIS + } \\ \text{ METÁLICOS (LATAS + TAMPAS + ARTEFATOS DIVERSOS)} \\ \text{ VIDROS (CLAROS E COLORIDOS) + } \\ \text{ CERÂMICOS EM PÓ OU CONFORMADOS + } \\ \text{ ENTULHOS DE OBRAS + LAMAS DOS TEMPORAIS + } \\ \text{ LAMAS DE DRAGAGEM DE CANAIS E RIOS) }$$

OU RESUMIDAMENTE:

$$RSU'S = \Sigma (\text{ COMBUSTÍVEIS OU PIROLISÁVEIS OU GAISIFICÁVEIS+ } \\ \text{ SOLUÇÕES ÁCIDAS E BÁSICAS + } \\ \text{ PRODUTOS METÁLICOS _+ } \\ \text{ PRODUTOS VÍTREOS + } \\ \text{ PRODUTOS CERÂMICOS + } \\ \text{ ENTULHOS DE OBRAS + } \\ \text{ LAMAS DE ENXURRADAS + } \\ \text{ LAMAS DE DRAGAGEM DE CANAIS E RIOS) }$$

CLASSIFICAÇÃO INTEGRADA DE LIXOS, RESÍDUOS SÓLIDOS E EFLUENTES FLUIDOS

- 1. RESÍDUOS URBANOS**
- 2. REJEITOS INDUSTRIAIS**
- 3. MATERIAIS PATOLÓGICOS, DEGENERATIVOS OU SOB SUSPEITA**
- 4. REJEITOS RURAIS**
- 5. OBJETOS SIGILOSOS E SIMILARES**

CLASSIFICAÇÃO DO IBAM (2001)

- 1. LIXO DOMÉSTICO OU RESIDENCIAL**
- 2. LIXO COMERCIAL**
- 3. LIXO PÚBLICO**
- 4. LIXO DOMICILIAR ESPECIAL:**
 - ENTULHO DE OBRAS**
 - PILHAS E BATERIAS**
 - LÂMPADAS FLUORESCENTES**
 - PNEUS**
- 5. LIXO DE FONTES ESPECIAIS:**
 - LIXO INDUSTRIAL**
 - LIXO RADIOATIVO**
 - LIXO DE PORTOS, AEROPORTOS E
TERMINAIS RODOFERROVIÁRIOS**
 - LIXO AGRÍCOLA**
 - RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE**

EMISSÕES ATMOSFÉRICAS GERADAS EM COMPOSTAGEM, ATERROS SANITÁRIOS E NA INCINERAÇÃO

(adaptado de Assunção, 2000)

- 1. A incineração é aparentemente o tratamento mais poluidor.**
- 2. As usinas de compostagem podem emitir odores desagradáveis, se o revolvimento das leiras for inadequado. Os gases resultantes são emitidos sem controle químico ou físico.**
- 3. Os lixões e aterros sanitários emitem:**

CH₄ da anaerobiose metanogênica e
CO₂ oriundo da digestão aeróbia ou anaeróbia não-metanogênica,
e outros gases orgânicos não-metânicos mais tóxicos.
- 4. Nas queimas espontâneas, as emissões gasosas dos lixões e aterros podem formar CO, NO_x, SO₂, Cl₂, e fumaça.**
- 5. O CH₄ e o CO₂ atuam na formação do efeito estufa.**
- 6. O CH₄ absorve a radiação infravermelha 11 vezes mais que o CO₂ e sua queima deve ser usada, ao menos, em co-geração de energia.**
- 7. As emissões gasosas do incinerador podem ser depuradas.**

DIOXINAS E FURANOS

(Assunção, 2000)

- * São poluentes altamente tóxicos**
- * São sub-produtos de processos envolvendo o cloro, como:**

fabricação de pesticidas, branqueamento de papel e celulose,
incêndios,
incineração de resíduos hospitalares, lixos e resíduos industriais,
combustão em veículos automotores;
- * São formados entre 250 e 400 °C na combustão de resíduos químicos, tornando necessário a passagem muito rápida das emissões de incineradores nesse intervalo, para evitar sua formação.**

**A DESPOLUIÇÃO
SOB A ÓTICA DA
ENGENHARIA DE PROCESSOS INORGÂNICOS**

