



RECICLAGEM DE RESÍDUOS MÍNERO-ENERGÉTICOS E URBANOS



Prof. Associado

ABRAHAM ZAKON

Eng. Químico, M.Sc. e D. Eng.

Lab. Mineralogia Industrial e Energética
Departamento de Processos Inorgânicos
Escola de Química, Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Titular

PÉRSIO DE SOUZA SANTOS

Eng. Químico, M.Sc., D.Eng., L. D.

Lab. Matérias-Primas Particuladas e Sólidos Não-Metálicos
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

CETEM-RJ – 13 de Junho de 2011

OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL*

**OTIMIZAR O
APROVEITAMENTO
DE
RECURSOS NATURAIS**

**VIA
RECICLAGEM DE
DESCARTES COM SUA
VALORIZAÇÃO COMERCIAL**



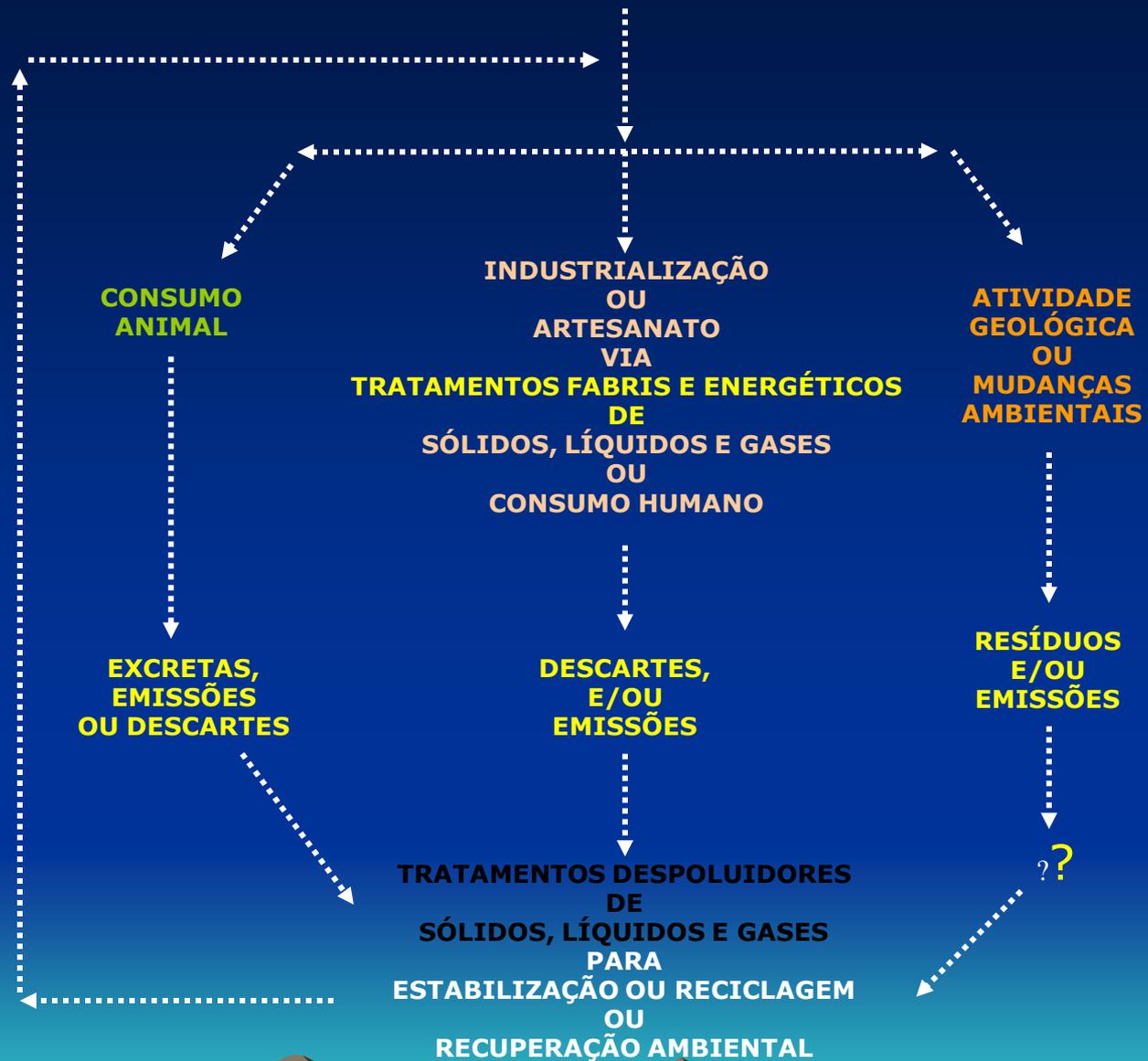
**EVITAR OU REDUZIR
IMPACTOS AMBIENTAIS
E A
MISÉRIA HUMANA**

**VIA
DIVERSIFICAÇÃO
DE OPORTUNIDADES
TECNOLÓGICAS SEGURAS**



RECURSOS NATURAIS

**É VIÁVEL
RECICLAR
DESCARTES E
RESÍDUOS
E
SUBSTITUIR O
CONSUMO DE
ALGUNS
RECURSOS
MINERAIS E
ENERGÉTICOS,
ATRAVÉS DE
ROTAS
TERMOQUÍMICAS.**



PROCESSOS TERMOQUÍMICOS PARA RECICLAR RESÍDUOS SÓLIDOS

TERMOPROCESSAMENTOS COM SINTERIZAÇÃO (FUSÃO INCIPIENTE)

aglomeração de finos, ceramização*,
clinkerização* e co-processamento*

TERMOSSÍNTESES COM FUSÃO TOTAL

fundição metalúrgica*, vitrificação*

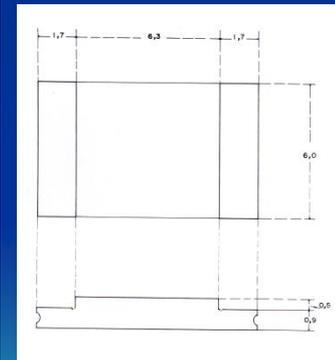
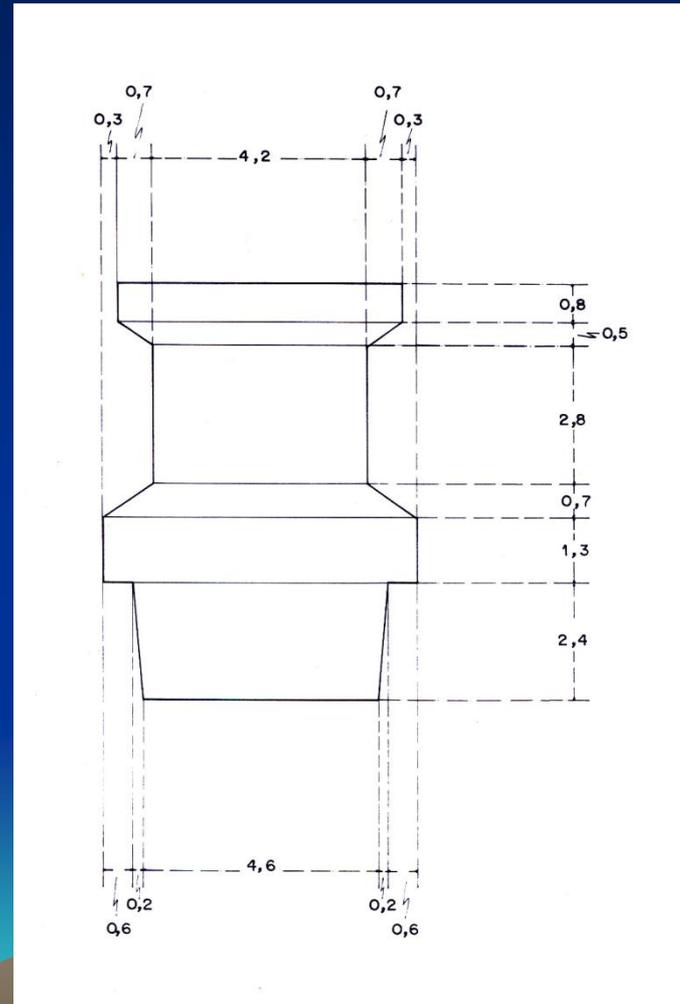
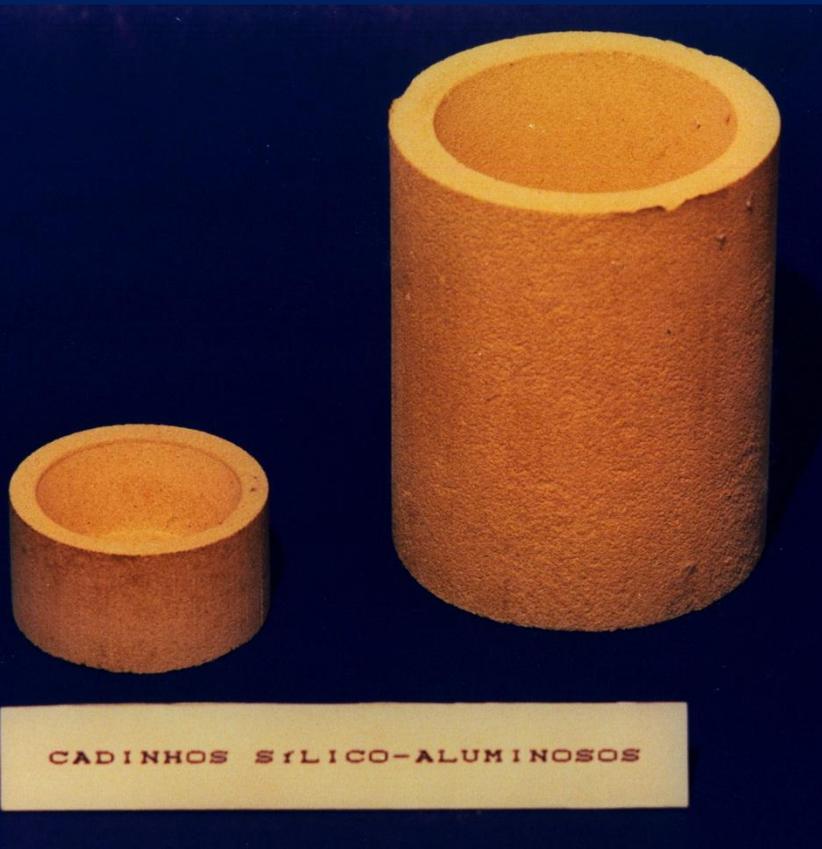
TERMODESTRUÇÕES CRISTALOQUÍMICAS

incineração*, pirólise* e gasificação*
destilação metalúrgica e refino
autoclavagem*

* Com formação de novos compostos químicos sólidos ou fluidos.



CADINHOS CERÂMICOS PARA ENSAIOS LABORATORIAIS COM RESÍDUOS EM FORNOS ELÉTRICOS E DE COMBUSTÃO



FORAM REALIZADOS ENSAIOS DE QUEIMA SOBRE:

**1º - MISTURAS DE CALCÁRIO E XISTOS MOÍDOS
VISANDO
IDENTIFICAR A POSSÍVEL FORMAÇÃO DE
CLÍNQUERES PARA CIMENTOS PORTLAND;**

**2º - CINZAS MOÍDAS DE LIXO AEROPORTUÁRIO PRÉ-INCINERADO,
PARA
AVALIAR OS EFEITOS DE DIFERENTES TEMPOS DE QUEIMA.**



METODOLOGIA LABORATORIAL

- TIJOLOS REFRAATÓRIOS SÍLICO-ALUMINOSOS
FORAM BRITADOS E MOIDOS
PARA GERAR PARTÍCULAS PASSANTES EM #100.

FORAM REQUEIMADOS ATÉ 1.300°C ou 1500°C
APÓS A CONFORMAÇÃO A ÚMIDO E
SECAGEM/ENDURECIMENTO DOS CADINHOS.

- CALCÁRIO, XISTOS E
CINZAS DE LIXO AEROPORTUÁRIO PRÉ-INCINERADO
FORAM MOÍDOS PARA GERAR
PARTÍCULAS PASSANTES EM #100.

FORAM QUEIMADOS A 1300°C DENTRO DOS CADINHOS.



A CONFEÇÃO DOS CADINHOS CERÂMICOS ARTESANAIS

**MISTURA DE
ARGILAS
REFRATÁRIA E
PLÁSTICA**



**1a QUEIMA EM
FORNO ROTATIVO**

**RESFRIAMENTO E
BRITAGEM
DAS PELOTAS**



**CHAMOTA
INDUSTRIAL**



**MISTURA COM
LIGANTES E
PLASTIFICANTES
+ PRENSAGEM**

**2a QUEIMA EM
FORNO DE
CÂMARA
INDUSTRIAL**



TIJOLO REFRATÁRIO



**RESFRIAMENTO +
BRITAGEM DO TIJOLO
+
MOAGEM DAS BRITAS**



**CHAMOTA
LABORATORIAL**



**MISTURA COM
LIGANTES* +
LUBRIFICANTE* +
PRENSAGEM +
SECAGEM**

**3a QUEIMA EM
FORNO
LABORATORIAL**



CADINHOS



TEIXEIRA, M.B.F.
Produção de Cadinhos Sílico-Aluminosos para Laboratórios -
XI Jornada Interna de Iniciação Científica,
Orientadores: Professores A. Zakon e Pêrsio de Souza Santos,
CCMN-CT-UFRJ, Rio de Janeiro, 1988

TEIXEIRA; M.B.F.; ZAKON, A.; SANTOS, P.S.
Produção de Cadinhos Cerâmicos Por Prensagem Unidirecional
29o Congresso Brasileiro de Química, São Paulo, outubro de 1989.

COMPONENTES DOS CADINHOS CERÂMICOS ARTESANAIS

1 - MATERIAL REFRAATÁRIO ESCOLHIDO PARA CHAMOTA DOS CADINHOS

TIJOLOS SÍLICO-ALUMINOSO TIPO IBAR* G:

Composição típica: Al_2O_3 42,0 %
 SiO_256,0 %
 Fe_2O_3 1,7 %

Temperatura máxima de uso: .. 1700 °C

* Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários S.A. - Grupo Votorantim.

2 – OUTROS COMPONENTES

LIGANTES *: DE BAIXA TEMPERATURA: GOMA ARÁBICA LÍQUIDA (Ind. Goyana)

DE ALTA TEMPERATURA: SOLUÇÃO NEUTRA DE SILICATO DE SÓDIO (UNA)

(R($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) p/p 3,3; densidade a 20 °C- 41 °Bé;
viscosidade a 20 °C - 350 cp ;
componentes: 8,8% Na_2O ; 29,0% SiO_2 ; 62,2% H_2O .)

PLASTIFICANTE: ÓLEO LUBRIFICANTE DE MOTOR ("Lubrax 4" do tipo SAE 20/40)



PROPORÇÕES DE SÓLIDOS E LÍQUIDOS ACEITÁVEIS PARA PRODUIR CADINHOS CERÂMICOS

PÓ DE CHAMOTA LABORATORIAL COM ADENSAMENTO MÁXIMO 100g

MISTURA DE LIGANTES E LUBRIFICANTE (V/V) 10 a 20 ml

SILICATO DE SÓDIO, SOLUÇÃO COMERCIAL.....20 %

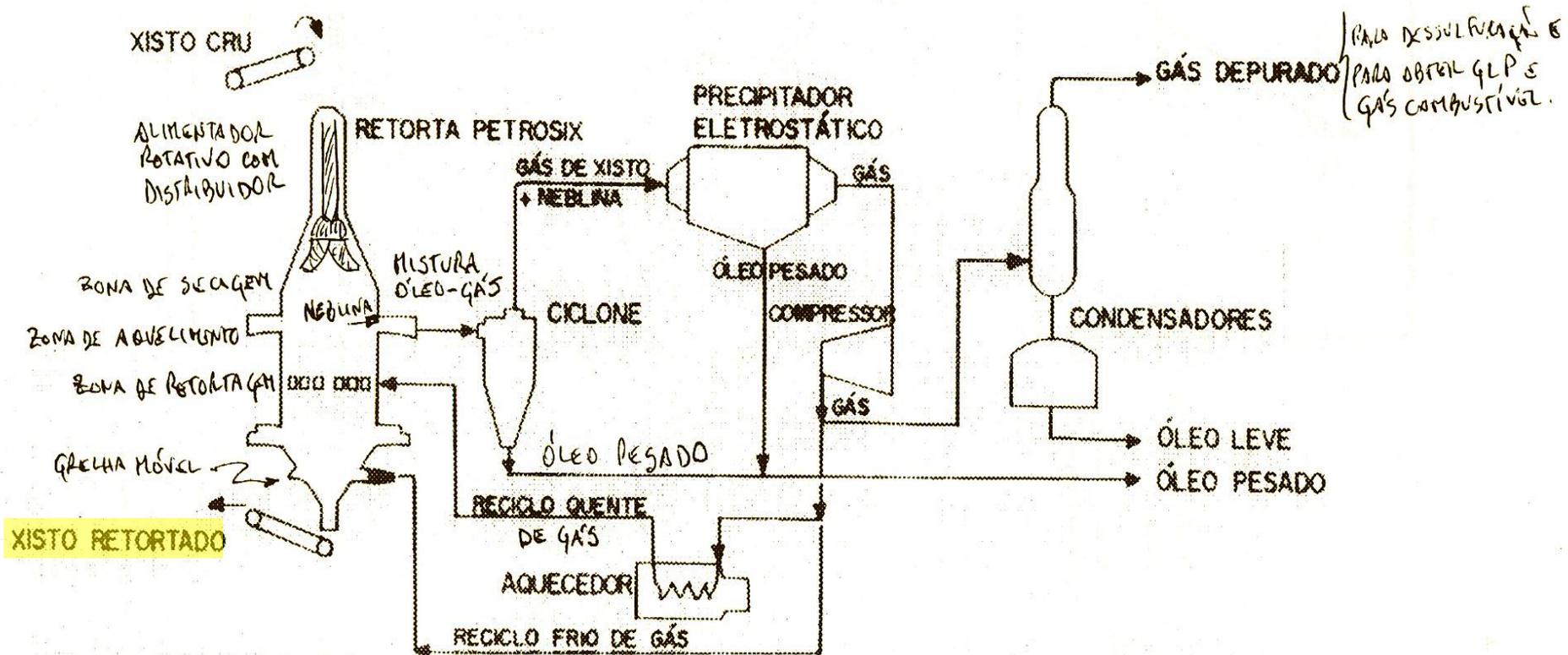
ÓLEO LUBRIFICANTE.....20 %

GOMA ARÁBICA.....60 %



RESÍDUOS MÍNERO-ENERGÉTICOS DO PROCESSO PETROSIX

XISTO NATURAL, FORA DA ESPECIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

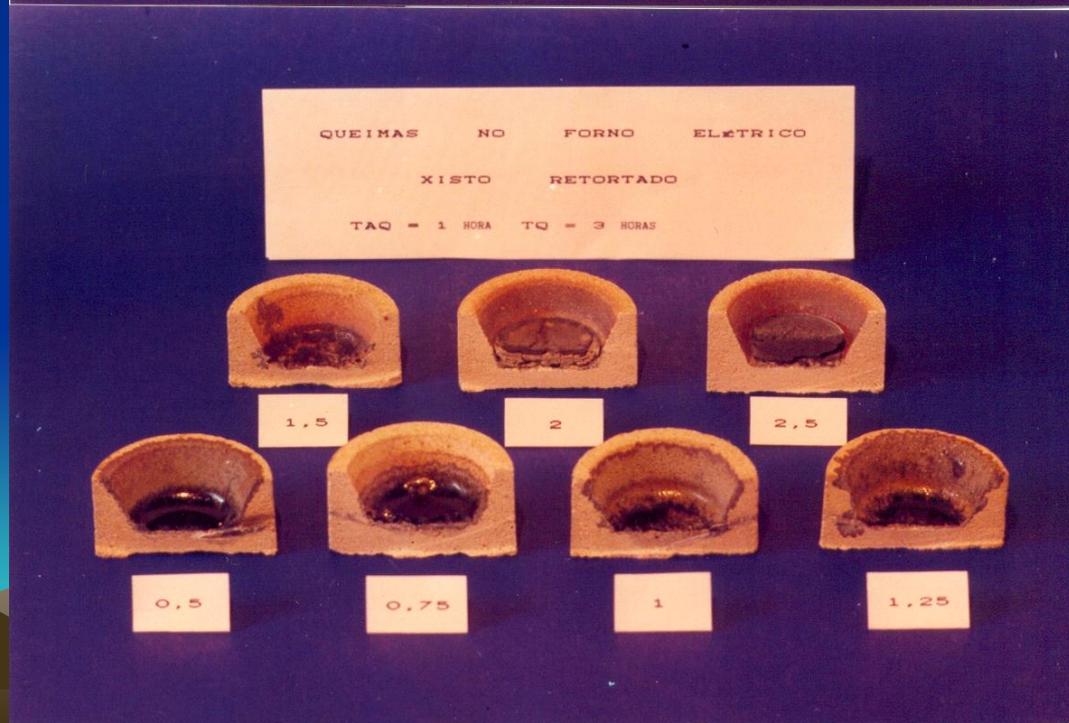
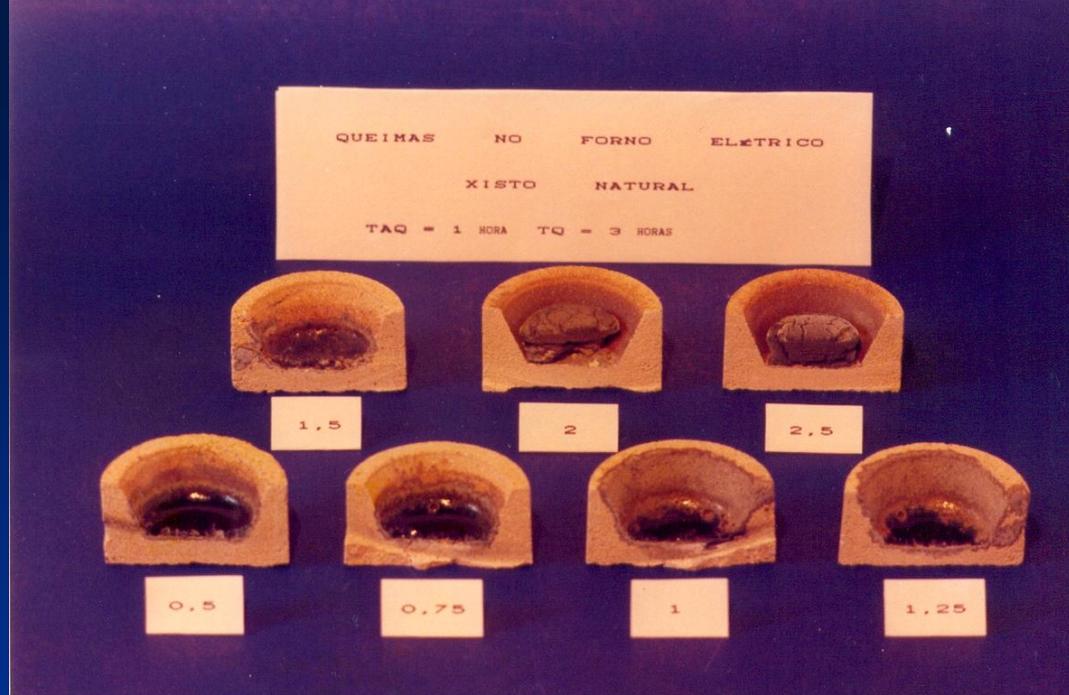


+ XISTO CALCINADO, APÓS QUEIMA DE XISTO RETORTADO NA CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO

**FORMULAÇÕES
EMPÍRICAS
DE
XISTOS
NATURAL E RETORTADO
APÓS
QUEIMAS EM
FORNO ELÉTRICO.**

FORAM OBTIDOS:

**MATERIAIS
POROSOS (SINTERES),
VÍTREOS
E
VITRO-CERÂMICOS.**



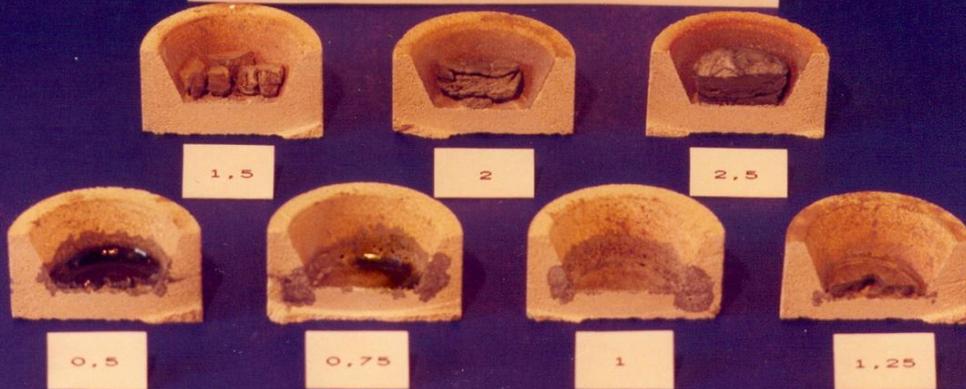
ZAKON, A. - Reciclagem de Rejeitos Sólidos Industriais: Desenvolvimento de Clinquer para Cimento - Portland em Escala de Laboratório, a partir de Xisto Retortado do Processo Petrosix (Petrobrás) - Escola Politécnica da USP, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Tese de Doutorado, Orientador: Prof. Dr. Pérsio de Souza Santos, São Paulo, 1991.

**FORMULAÇÕES
EMPÍRICAS
DE
XISTOS
NATURAL E RETORTADO
APÓS
QUEIMAS EM
FORNO A GÁS GLP.**

FORAM OBTIDOS:

**MATERIAIS
POROSOS (SINTERES),
VÍTREOS
E
VITRO-CERÂMICOS.**

QUEIMAS NO FORNO A GÁS GLP
XISTO NATURAL
TAQ = 1 HORA TQ = 3 HORAS



QUEIMAS NO FORNO A GÁS GLP
XISTO RETORTADO
TAQ = 1 HORA TQ = 3 HORAS



**FORNO DE CLINQUERIZAÇÃO
E
COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS PERIGOSOS
PARA FABRICAR CIMENTOS PORTLAND**



REAÇÕES QUÍMICAS GLOBAIS DOS FORNOS DE CLINQUERIZAÇÃO EM FÁBRICAS DE CIMENTO PORTLAND

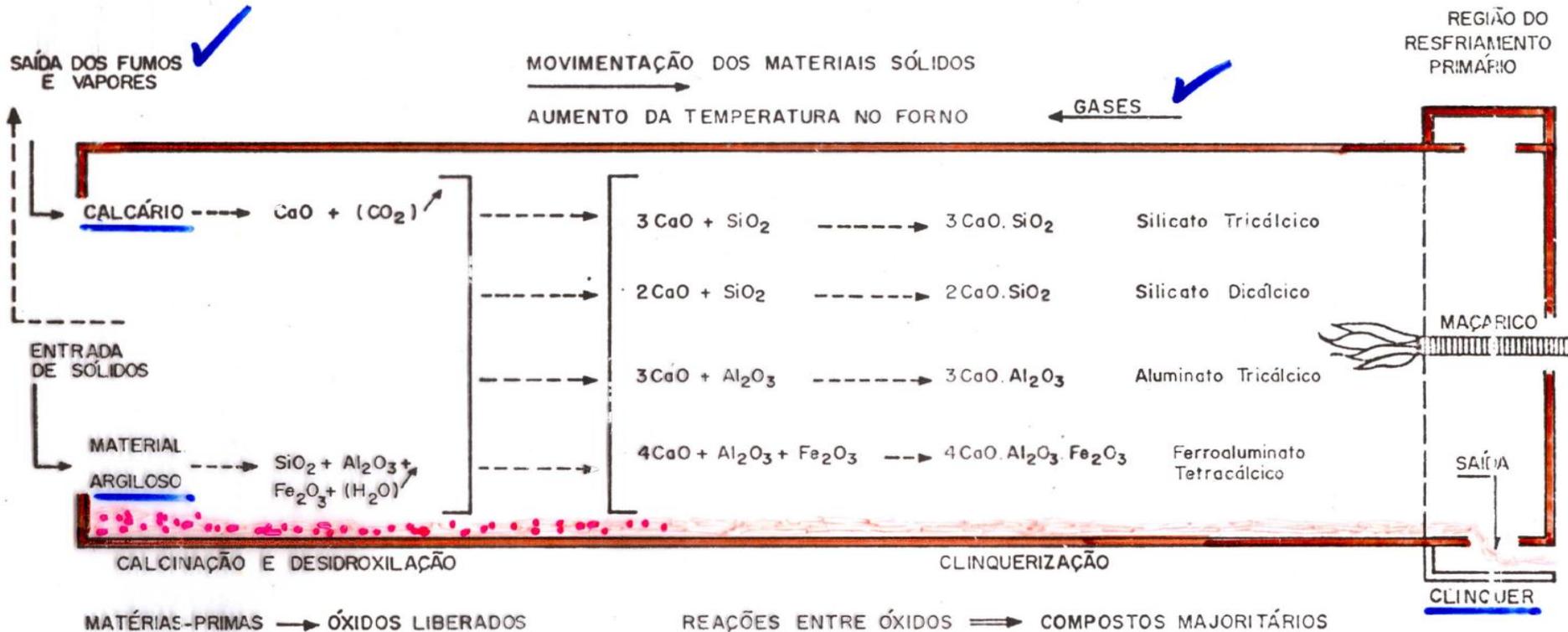


FIGURA - ESQUEMA DAS REAÇÕES QUÍMICAS DA SÍNTESE DOS COMPOSTOS MAJORITÁRIOS DE CLINQUER NUM FORNO ROTATIVO PARA PRODUÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND.

RESULTADOS LABORATORIAIS DAS QUEIMAS DOS XISTOS

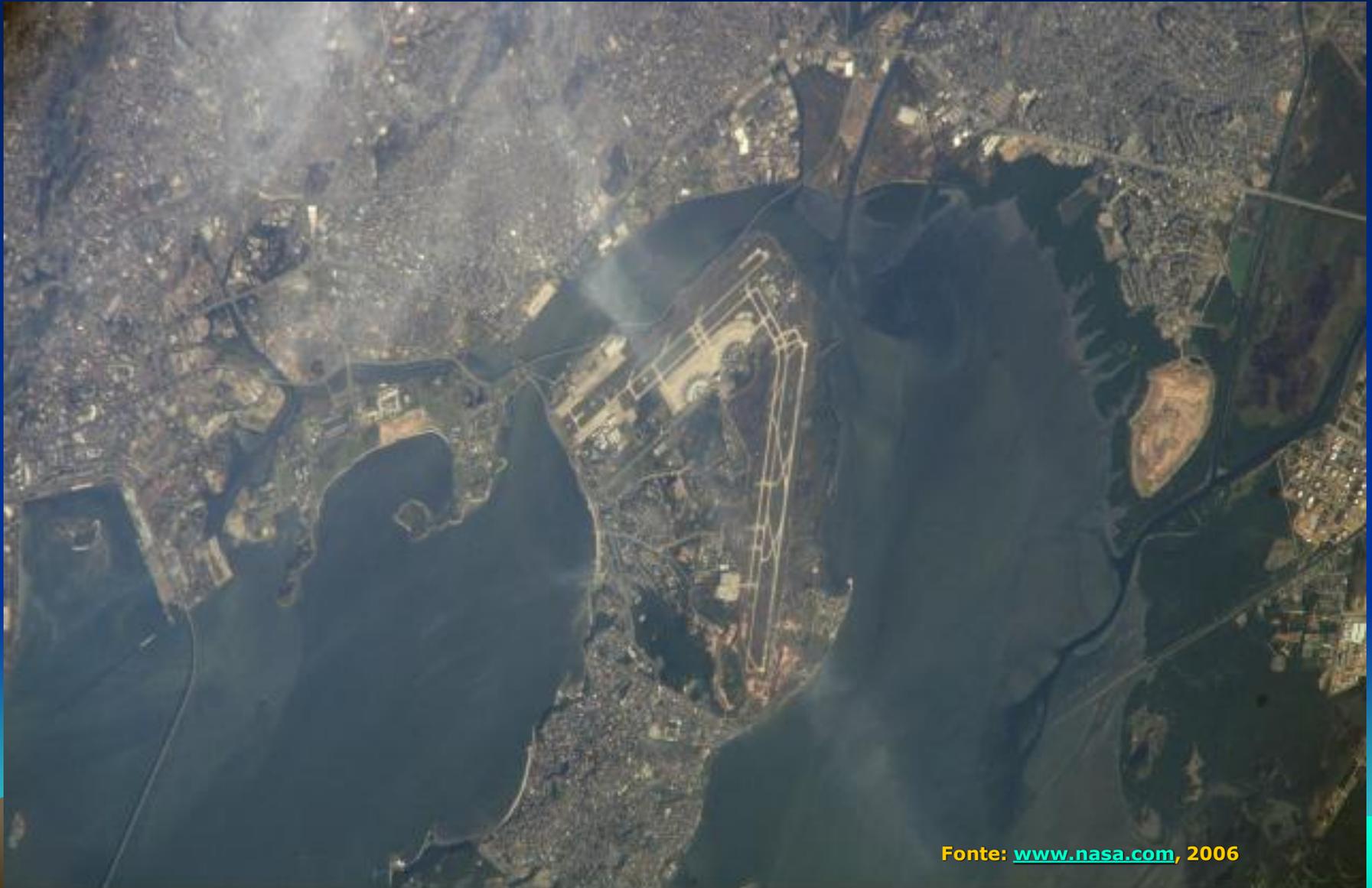
- **1º - XISTO CALCINADO**
CONFORME OBTIDO NA UPI-SIX EM CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO:
NÃO APRESENTA OS COMPONENTES CRISTALOGRAFICOS MAJORITÁRIOS CARACTERÍSTICOS DE CLÍNQUER PARA CIMENTO PORTLAND.
- **2ª - QUEIMANDO INDIVIDUALMENTE**
O XISTO RETORTADO,
O XISTO NATURAL DA CAMADA SUPERIOR,
O XISTO NATURAL DA CAMADA INFERIOR,
O XISTO CALCINADO EM ATMOSFERA OXIDANTE A 1280 °C

FORAM OBTIDOS OS COMPONENTES CRISTALOGRAFICOS MAJORITÁRIOS CARACTERÍSTICOS DE CLÍNQUER PARA CIMENTO PORTLAND.
- **3ª - QUEIMANDO FARINHAS DE CALCÁRIO CALCÍTIICO E XISTO RETORTADO EM ATMOSFERA OXIDANTE ENTRE 1280 OC E 1450 °C**

FORAM OBTIDOS OS COMPONENTES CRISTALOGRAFICOS MAJORITÁRIOS CARACTERÍSTICOS DE CLÍNQUER PARA CIMENTO PORTLAND.
- **4ª - CONCLUSÃO: É POSSÍVEL OBTER CLÍNQUER PARA CIMENTO PORTLAND A PARTIR DE XISTOS PROCESSADOS E NATURAIS E CALCÁRIO CALCÍTIICO.**

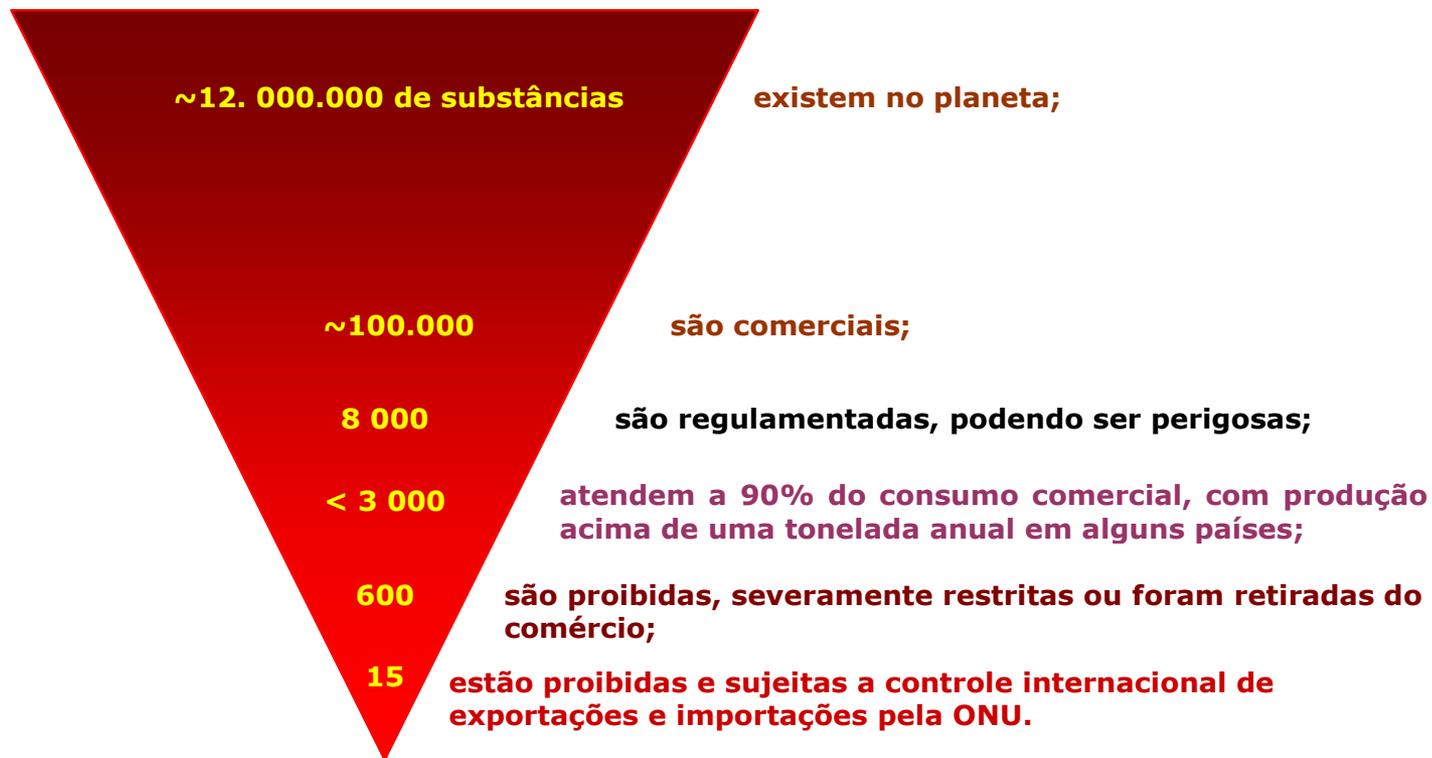


DESAFIOS: 1º - DESTINAÇÃO DE LIXO: ATERROS X INCINERAÇÃO
2º - A POLUIÇÃO AMBIENTAL



Fonte: www.nasa.com, 2006

UNIVERSO DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS



PERICULOSIDADE

- é definida por propriedades físicas, químicas e infecto-contagiosas que apresentam, isoladamente ou associadas, as características de:

- corrosividade,
- reatividade,
- explosividade,
- toxicidade,
- inflamabilidade,
- patogenicidade,
- radiatividade,
- termodegradabilidade* e
- biodegradabilidade*.

- **Materiais termodegradáveis e biodegradáveis:**

- podem gerar combustíveis, inflamáveis, explosivos, venenos, corrosivos, patogênicos, ou,
- possibilitam reduzir a resistência mecânica de algum artefato ou obra de engenharia.

LIXOES E ATERROS PRODUZEM CHORUME

Uma parte do chorume é tratada por processos químicos e biológicos e outra parte é aspergida sobre as pistas de trânsito dos caminhões para evitar a formação de poeira.

Ponto de afloramento do chorume na base do Aterro Municipal de Gramacho, RJ

Fotografia obtida por Daniel Zakon em 06/junho/2007.

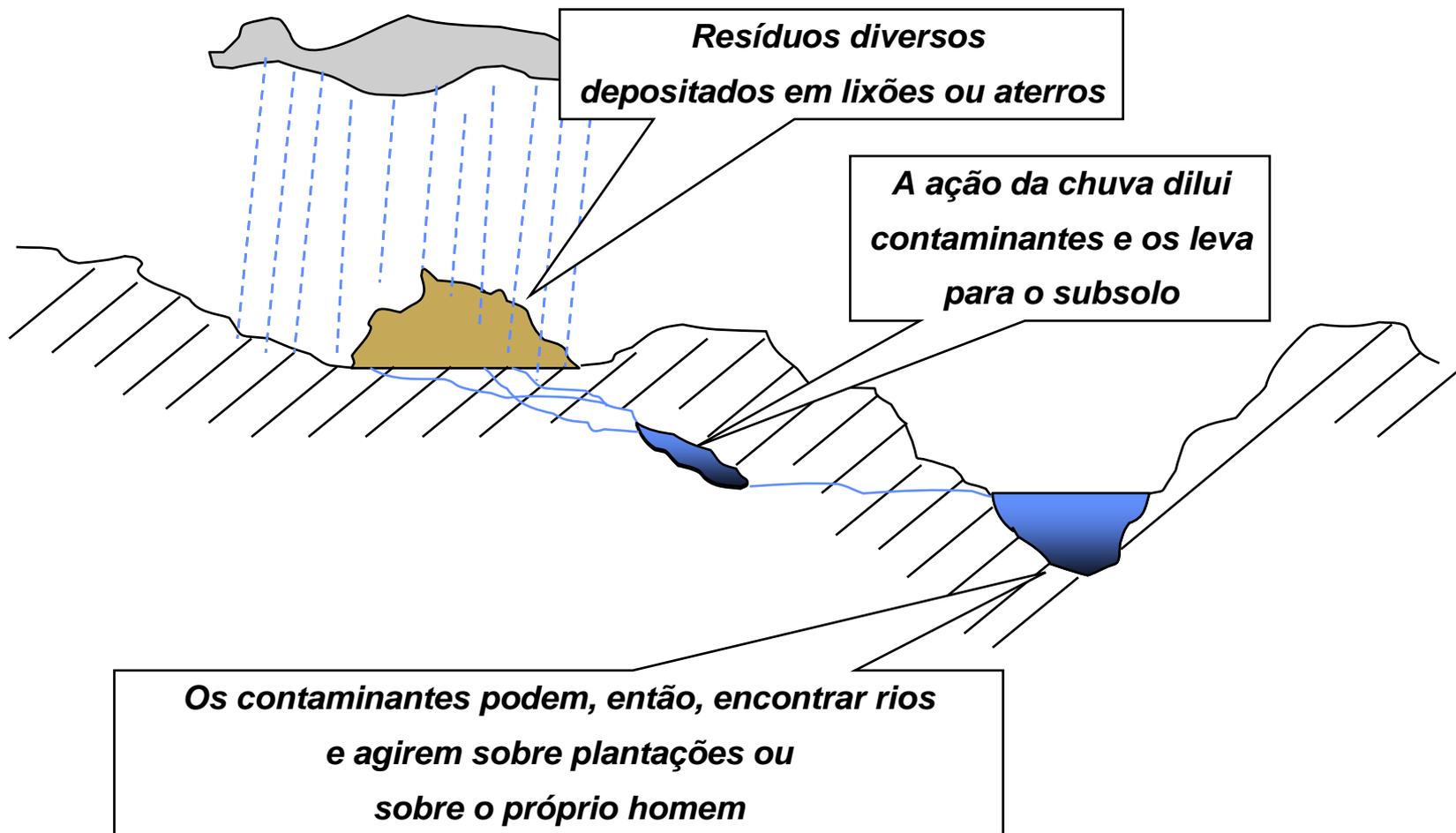


OS CAMINHOES PRODUZEM POEIRA NOS ATERROS ANTES DE DESPEJAR O LIXO MUNICIPAL

A aspersão de chorume nas pistas de trânsito dos aterros não impede totalmente a formação de poeira nos dias quentes.

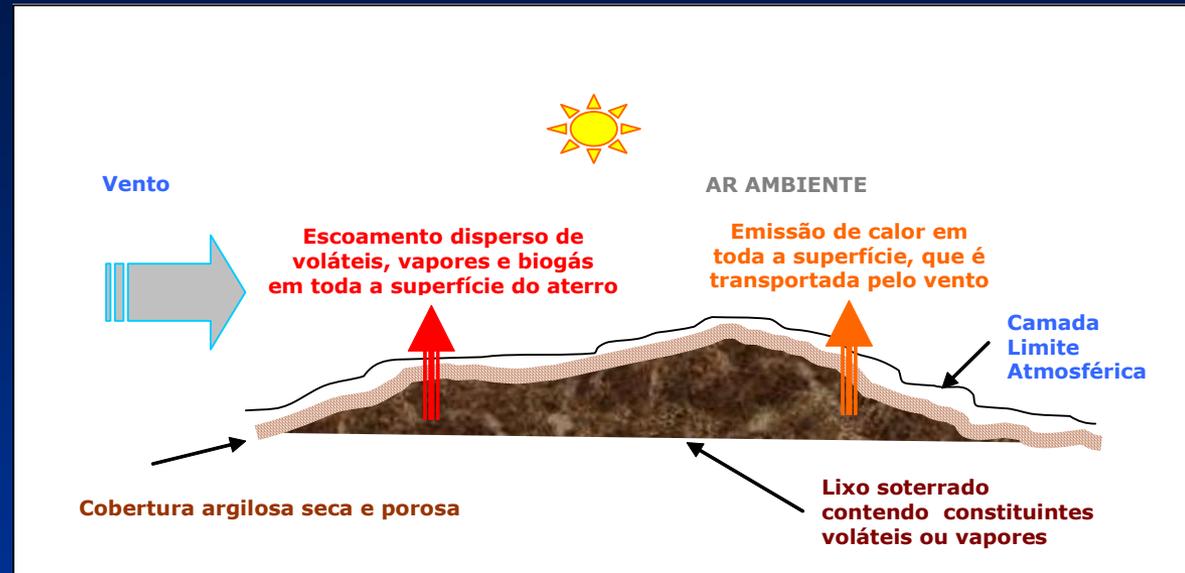


O LIXO MUNICIPAL É PERIGOSO

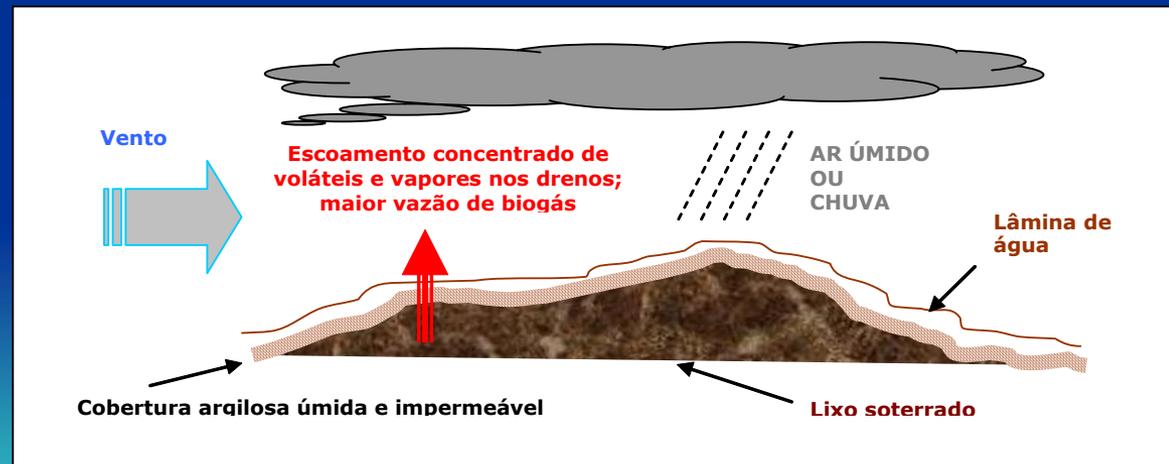


EMISSÕES GASOSAS EM ATERROS CONTROLADOS E SANITÁRIOS

DIFUSÃO MOLECULAR DOS GASES OU VAPORES PARA O AR EM DIAS ENSOLARADOS



CONVECÇÃO DOS GASES OU VAPORES NO AR EM DIAS DE CHUVA



TERMODECOMPOSIÇÃO OU TERMOCONVERSÃO QUÍMICA DE COMBUSTÍVEIS, RESÍDUOS AGRO-INDUSTRIAIS E LIXO

TERMODESTRUÇÃO TOTAL

INCINERAÇÃO = COMBUSTÃO OU QUEIMA TOTAL COM O_2 ESTEQUIOMÉTRICO
OU COM EXCESSO DE AR

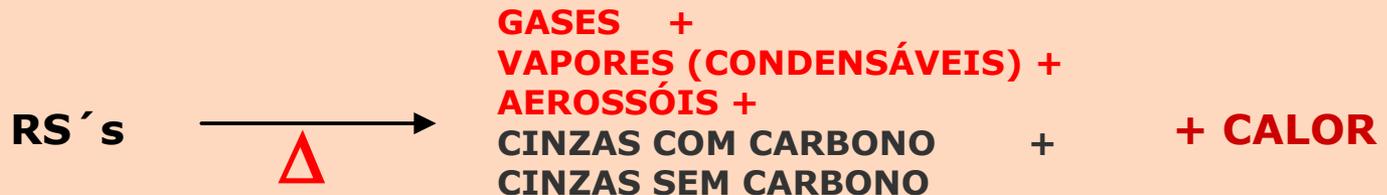
TERMODESTRUÇÃO PARCIAL OU CRAQUEAMENTO

PIRÓLISE = DECOMPOSIÇÃO EM AUSÊNCIA DE O_2 OU AR

GASIFICAÇÃO = DECOMPOSIÇÃO COM O_2 OU AR INSUFICIENTE



PRODUTOS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS A 1000 °C



PIRÓLISE – opera em atmosfera redutora.

GASIFICAÇÃO – ocorre em ambiente redutor ou oxidante.

INCINERAÇÃO - opera com 40 a 100% de excesso de ar.

A gasificação é uma variante da pirólise que consome matérias primas não-coqueificáveis para produzir gases combustíveis e cinzas. A incineração é o caso limite da pirólise e da gasificação,

ATERRO SANITÁRIO DE ITAQUAQUECETUBA (SP) SOFRE EXPLOSÃO em 25 de abril de 2011

(EcoAgência Solidária, 29/4/2011;

<http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2011/04/moradores-temem-novo-deslizamento-em-lixao-que-explodiu-na-grande-sp.html>)



Máquinas trabalhando no local da explosão



Chorume invadiu quintais após explosão em aterro sanitário de Itaquaquecetuba (Foto: Juliana Cardilli/G1)

FALTA INCLUIR NAS NORMAS TÉCNICAS DOS RESÍDUOS PERIGOSOS OU ESPECIAIS:

*** MATERIAIS TERMODEGRADÁVEIS**

- podem ser destruídos por ação térmica e gerar
combustíveis,
inflamáveis,
explosivos,
venenos,
corrosivos,
reagentes patogênicos.

*** MATERIAIS BIODEGRADÁVEIS:**

- podem sofrer a ação de algum agente biológico que
reduza a sua resistência mecânica em
algum objeto natural,
artefato ou
obra de engenharia.

ESQUEMA GENÉRICO DE UM INCINERADOR VERTICAL DE LIXO

EMISSÕES GASOSAS

+ CINZAS VOLANTES

RSU's APÓS
COLETA SELETIVA
INDUSTRIAL

QUEIMADORES

INCINERAÇÃO
A
1000° C

CINZAS
CADENTES

EMISSÕES GASOSAS
PARA A CALDEIRA

QUEIMADORES

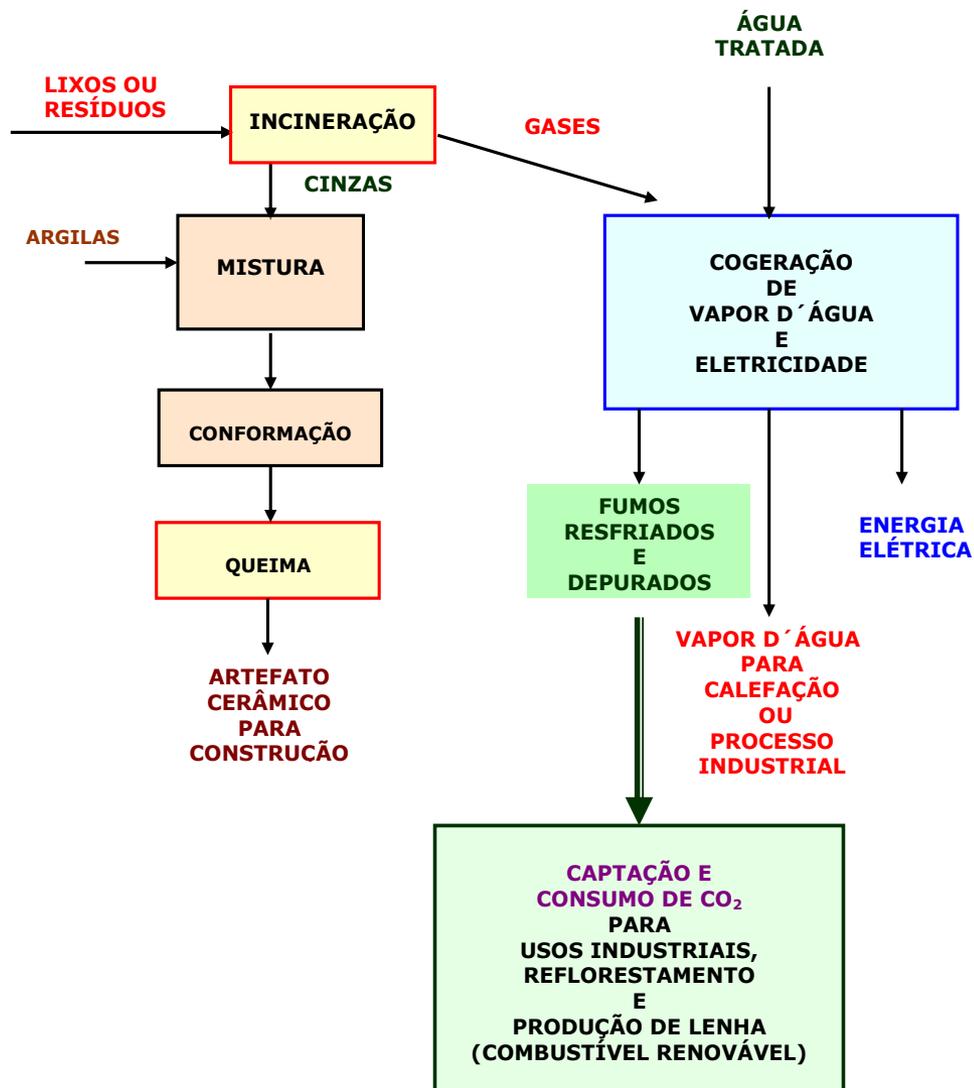
PÓS-QUEIMA
DOS
FUMOS
A
1200° C

MAIS
CINZAS
CADENTES



- A OBTENÇÃO DE ARTEFATOS CERÂMICOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO FOI COMPROVADA E VEM SENDO DESENVOLVIDA POR VÁRIOS GRUPOS INTERESSADOS.
- A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA É OBTIDA NA USINAVERDE LOCALIZADA NO CAMPUS DO FUNDÃO.
- A CAPTAÇÃO E CONSUMO DE CO₂ PARA PRODUZIR BICARBONATO DE SÓDIO E BARRILHA ESTÁ SENDO DESENVOLVIDA PELO PROF. DR. JOÃO ALFREDO MEDEIROS, LABORATÓRIO DE ANÁLISE AMBIENTAL E MINERAL INSTITUTO DE QUÍMICA DA UFRJ.

CERAMIZAÇÃO DAS CINZAS DE INCINERAÇÃO DE LIXO



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



A - Cinzas originais obtidas após queima a 900 °C do lixo das aeronaves no incinerador do Aeroporto Internacional do RJ e classificadas na peneira ABNT no 10 .

B - Cinzas originais moídas e passantes 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 fundo do cadinho, revelando a possibilidade de revestir peças cerâmicas.

VANTAGENS DA INCINERAÇÃO INDUSTRIAL DE LIXO

- * Emprega 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 são matérias-primas cerâmicas, e se requeimadas apresentam propriedades pozolânicas e podem ser incorporadas em argamassas de revestimento.**
- * Os fumos sofrem tratamentos físicos e químicos para remover pó (partículas), gases e vapores tóxicos.**



RECICLAGEM DE RESÍDUOS MÍNERO-ENERGÉTICOS E URBANOS

CONCLUSÕES:

- **Xistos natural, retornado e calcinado servem para produzir cimentos Portland.**
- **Cinzas da incineração de lixo servem para produzir pós, artefatos cerâmicos e argamassas de revestimento.**
- **Usinas termoelétricas de lixo são vantajosas, pois reduzem ou eliminam as agressões ao meio ambiente.**
- **Cadinhos cerâmicos artesanais de baixo custo facilitam os ensaios de queima com resíduos minerais, industriais e urbanos.**

Agradecimentos:

Prof. Emérito Cláudio Costa Neto, Pólo Piloto de Xistoquímica, IQ-UFRJ.

Eng. M.Sc. Nefitaly Batista de Almeida Jr., Lab. Mineralogia Industrial e Energética, DPI – EQ, UFRJ.

Infraero Aeroportos

