



**CRIATIVIDADE TECNOLÓGICA  
NA  
ENGENHARIA DE PROCESSOS INORGÂNICOS**

**ABRAHAM ZAKON**

**Prof. Associado  
Eng<sup>o</sup> Químico, M. Sc., D. Eng.**

**Laboratório de Cimentos e Cerâmicos  
Departamento de Processos Inorgânicos  
Escola de Química - Centro de Tecnologia  
Universidade Federal do Rio de Janeiro**



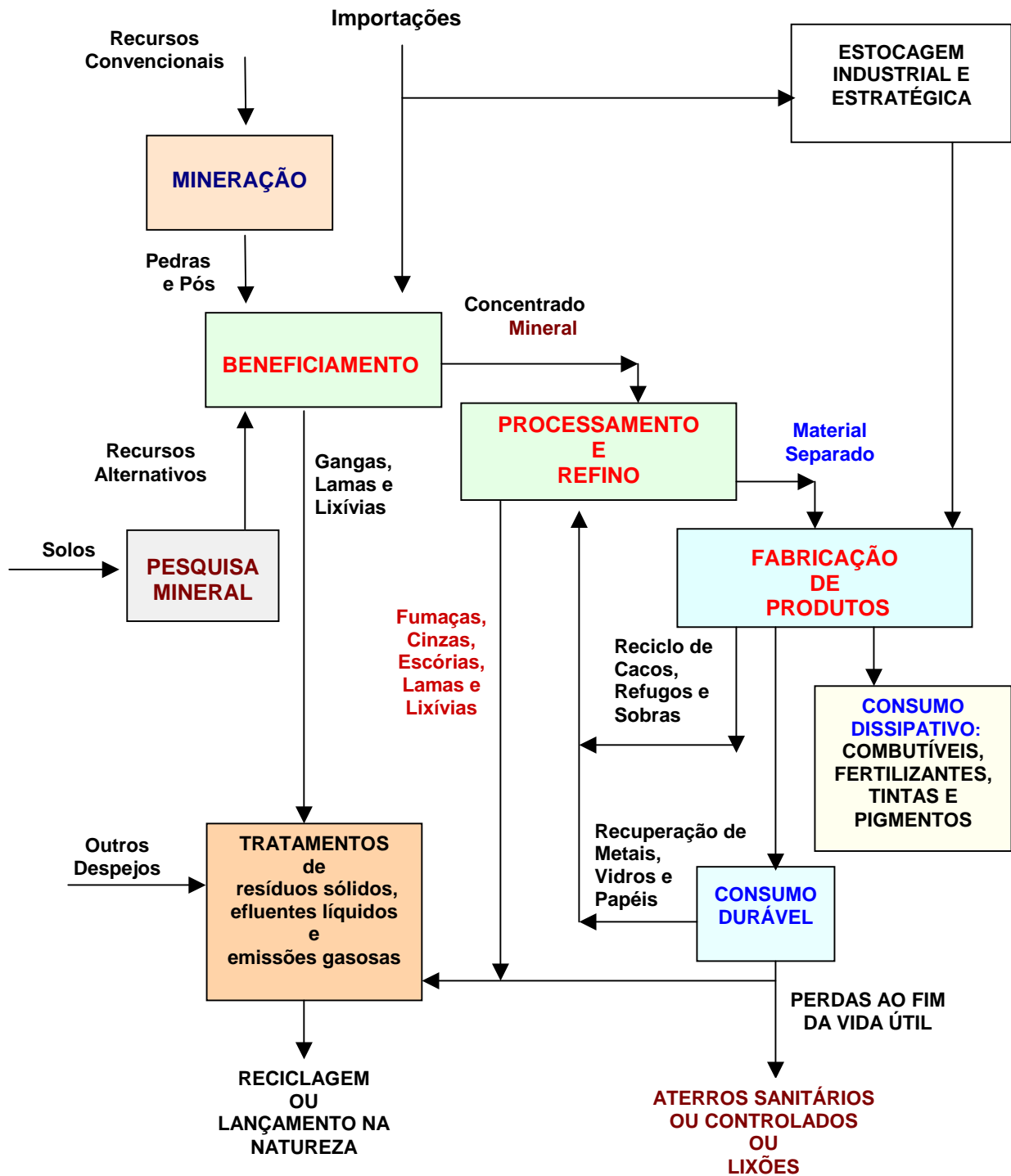
**Arequipa - Outubro de 2008**

**PARTE 2.1**

**TRATAMENTOS DE MATÉRIAS-PRIMAS E REJEITOS  
SÓLIDOS, LÍQUIDOS E GASOSOS**

## CICLOS E RECICLOS TECNOLÓGICOS DE MATERIAIS INORGÂNICOS

(adaptado de Goeller, 1982)

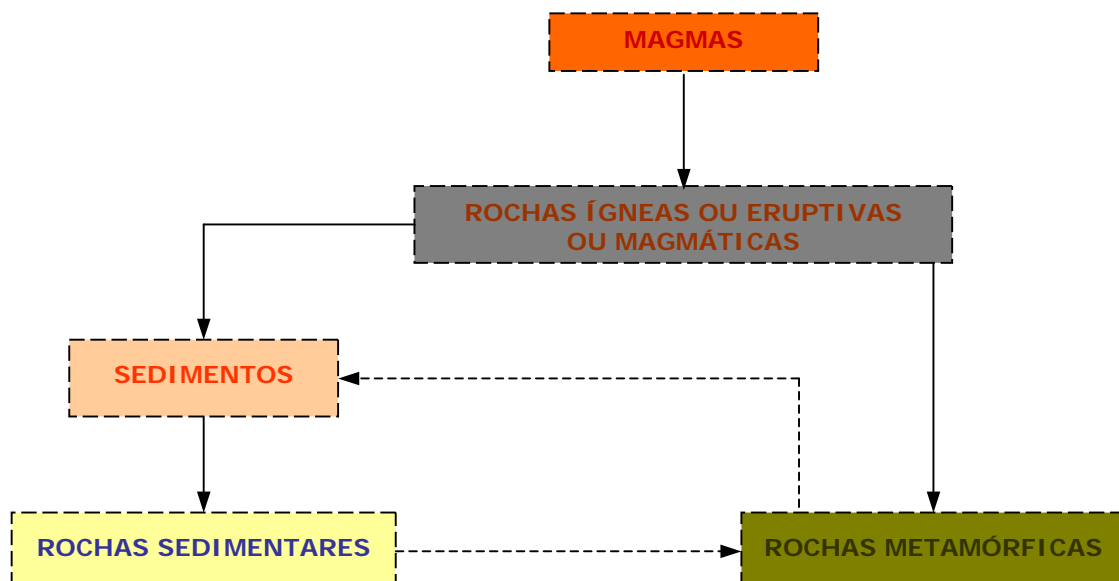


## NÍVEIS DE OCORRÊNCIA DE MINERAIS



OXIGÊNIO	45,2%
SILÍCIO	27,2%
ALUMÍNO	8,0%
FERRO	5,8%
CÁLCIO	5,1%
MAGNÉSIO	2,8%
SÓDIO	2,3%
POTÁSSIO	1,7%
TITÂNIO	0,9%
OUTROS	1,0%

## CICLO GEOQUÍMICO DAS ROCHAS



## CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS SÓLIDOS

(Souza Santos, 1980)

CLASSE	MATERIAIS NATURAIS	MATERIAIS ARTIFICIAIS
<b>METÁLICOS</b>	Ouro, prata, platina, paládio, cobre	Todos os metais e suas ligas, inclusive aqueles que ocorrem na Natureza
<b>CERÂMICOS</b>	Todos os minerais (e minérios) que são compostos químicos de metais e não-metais p. ex.: argilas, feldspatos, quartzo, magnesita, cromita, grafita, esmeril, coríndon, talco, pirofilita, gipsita, calcita, carborundum	Todos os produtos não-metálicos obtidos após a reação química em temperaturas elevadas p.ex.: refratários, tijolos e telhas; louças doméstica e sanitária; cimentos Portland; vidros plano e arco, abrasivos sintéticos, catalisadores sílico-aluminosos; zeólitas; isolantes térmicos para uso acima de 750 °C;
<b>POLIMERIZADOS</b>	Borracha natural, fibras de celulose, quitina, resina "shellac"	Todos os outros altos polímeros; exemplos: polietileno, nylon, borracha sintética, polipropileno, cloreto de polivinila
<b>DE ORIGEM BIOLÓGICA</b>	Madeira, diatomito, betumem, calcário conchífero	Madeira tratada, papel, placas, cal, tijolos isolantes de diatomito, couro

(Hillig, 1985)

**COMPÓSITO** = MATERIAL A + MATERIAL B

**COMPÓSITO** = FASE A ("MATRIZ CONTÍNUA") +

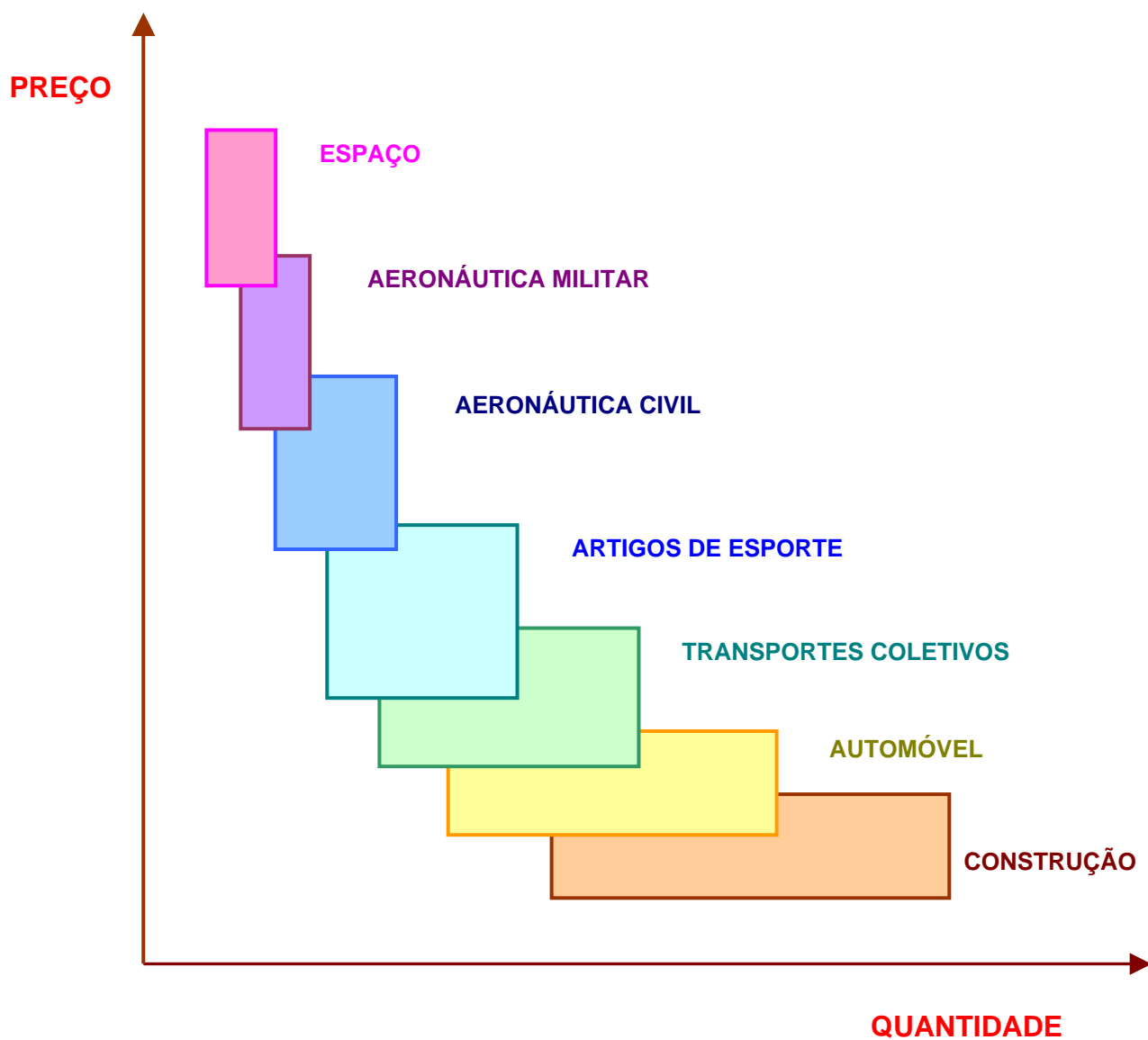
FASE B ("AGENTE OU ESTRUTURA DE REFORÇO")

HILLIG, W.B. - **Composite Materials** - in: Kirk-Othmer Concise Encyclopedia of Chemical Technology - A Wiley-Interscience Publication - p.307-308, John Wiley & Sons, NY, 1985.

SOUZA SANTOS, P. - **Alternativas de matérias-primas para a indústria química brasileira** - Atas do Simpósio ACIESP, nº 25, p.202, 1980.

## APLICAÇÕES DOS NOVOS MATERIAIS EM NOVOS PRODUTOS

(Sá, 1989)



## CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE ENGENHARIA

<i>TIPOS CONSAGRADOS</i>	<i>FUNÇÃO</i>	<i>APLICAÇÃO EM</i>	<i>FORMAS COMERCIAIS</i>
AGLOMERANTES MINERAIS ARGAMASSAS, CONCRETOS CERÂMICOS CIMENTO-AMIANTO METAIS PEDRAS NATURAIS VIDROS	<b>ESTRUTURAIS</b>	EDIFÍCIOS PONTES, BARRAGENS ARTEFATOS, PEÇAS	<b>CONFORMADOS</b>
	<b>CONDUTORES</b>	MÁQUINAS PEÇAS, CARÇAÇAS EQUIPAMENTOS	
TINTAS E VERNIZES	<b>REVESTIDORES</b>	JANELAS, LOUÇAS VÁRIOS ÍTENS	<b>NÃO-CONFORMADOS</b>
BETUMINOSOS	<b>ISOLANTES</b>	ESTRADAS, EDIFÍCIOS	
MADEIRAS BORRACHAS PLÁSTICOS		EDIFÍCIOS, CASAS ARTEFATOS, PEÇAS, E MÁQUINAS, AUTOS	

## PREÇOS DE MATERIAIS

(adaptado de Ashby e Jones, 1980)

<i>FINALIDADE</i>	<i>TIPO OU FUNÇÃO</i>	<i>PREÇO POR TONELADA,</i>	
		<i>UK L</i>	<i>US\$</i>
<b>CONSTRUÇÃO BÁSICA</b>	Madeira, concreto, aço estrutural	30-250	60-550
<b>ENGENHARIAS MÉDIA E LEVE</b>	Metais, ligas e polímeros para aviação, automóveis e aparelhos	250-2500	550-5500
<b>MATERIAIS ESPECIAIS</b>	Ligas para lâminas de turbinas, compósitos avançados (polímeros reforçados com fibras de vidro ou de boro)	2500-90,000	5500-200,000
<b>METAIS PRECIOSOS</b>	Rolamentos de safira, contatos de prata, microcircuitos em ouro	90,000-1 m	200,000-2.2 m
<b>DIAMANTE INDUSTRIAL</b>	Ferramentas de corte e polimento	400,000 m	900,000 m

## DUREZA DE SÓLIDOS

◆ **é uma propriedade indicativa da:**

- sua resistência à perfuração, risco, sulco ou corte;
- resistência de uma superfície sólida à penetração por outro material;
- resistência ao esmagamento;
- abrasividade do material e a conseqüente capacidade de desgaste do equipamento de moagem.

◆ **é medida por meio de uma escala apropriada como a de Moh ou "Mohs".**

◆ **serve para:**

- escolher uma substância para instrumentos de corte;
- selecionar um equipamento de redução do tamanho de partículas.

### FUNDAMENTOS E EXEMPLOS DAS ESCALAS DE DUREZA

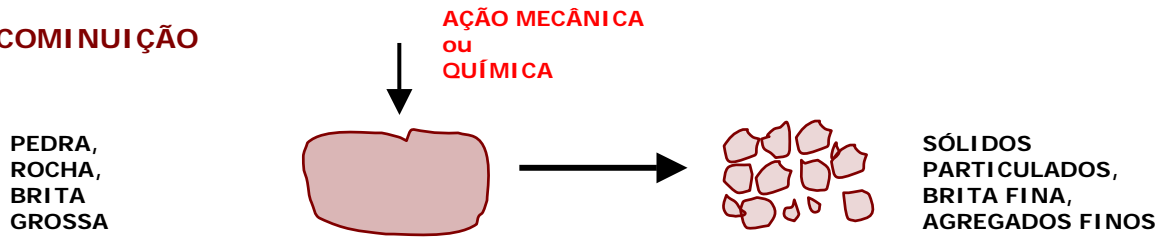
- um material mais duro risca outro mais mole;
- cada elemento risca os precedentes, e é riscado pelos subsequentes.
- **na prática, é possível determinar a dureza, utilizando-se:**
  - a unha da mão,
  - um estilete de aço, e
  - um fragmento de vidro.

### ESCALAS DE MOH DOS MINERAIS RISCADORES (DUREZA DINÂMICA OU DE CORTE)

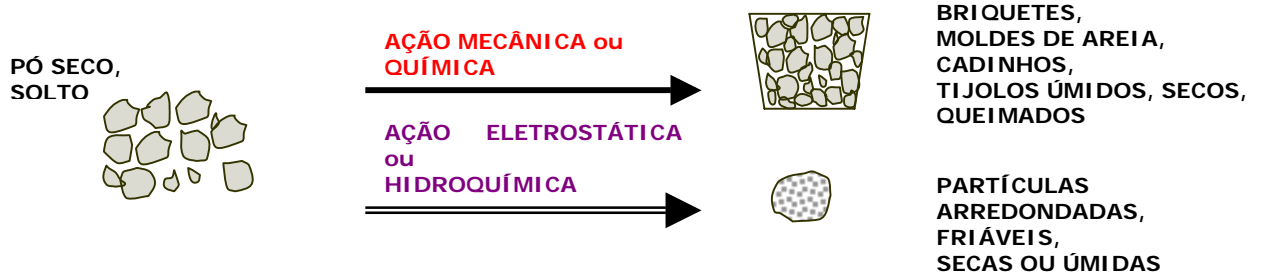
<i>ESCALA DE MOHS ORIGINAL</i> (Nowatzki & Zeltzer)			<i>ESCALA ALTERNATIVA DE DUREZA</i> (Perry & Chilton, p. 8-8)		
Dureza	Gradação	Riscadores	Dureza	Gradação e exemplos	
Baixa	1 - talco	unha	Moles	1 - talco, tortas secas de filtros-prensa, ceras, pedra-sabão, agregados de sais cristalinos	
	2 - gipsita	unha			2 - gesso, sal de rocha, sais cristalinos, carvão
Média	3 - calcita	canivete e vidro			Média Dureza
	4 - fluorita	canivete e vidro		4 - fluorita, fosfato mole, magnesita, calcário	
	5 - apatita	canivete e vidro		5 - apatita, fosfato duro, calcário duro, cromita, bauxita	
Alta	6 - ortoclásio	risca o vidro		Duros	6 - feldspato, ilmenita, ortoclásio, horblendas
	7 - quartzo	risca o vidro	7 - quartzo, granito		
	8 - topázio	risca vidro	8 - topázio		
	9 - coríndon	risca o vidro	9 - coríndon, safira, esmeril		
	10 - diamante	risca o vidro	10 - diamante		

## AÇÕES MECÂNICAS, QUÍMICAS E TÉRMICAS SOBRE SÓLIDOS OU MINÉRIOS PARTICULADOS

### A - COMINUIÇÃO



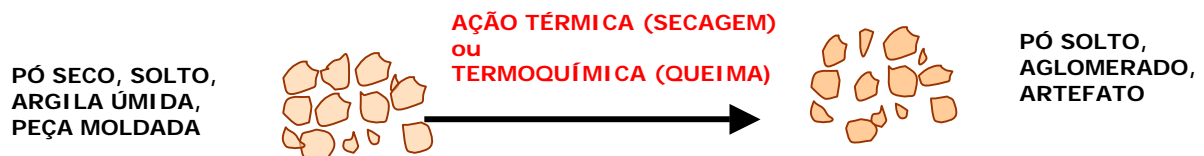
### B – AGLOMERAÇÃO A FRIO



### C – SINTERIZAÇÃO (AGLOMERAÇÃO (A FRIO E) A QUENTE)



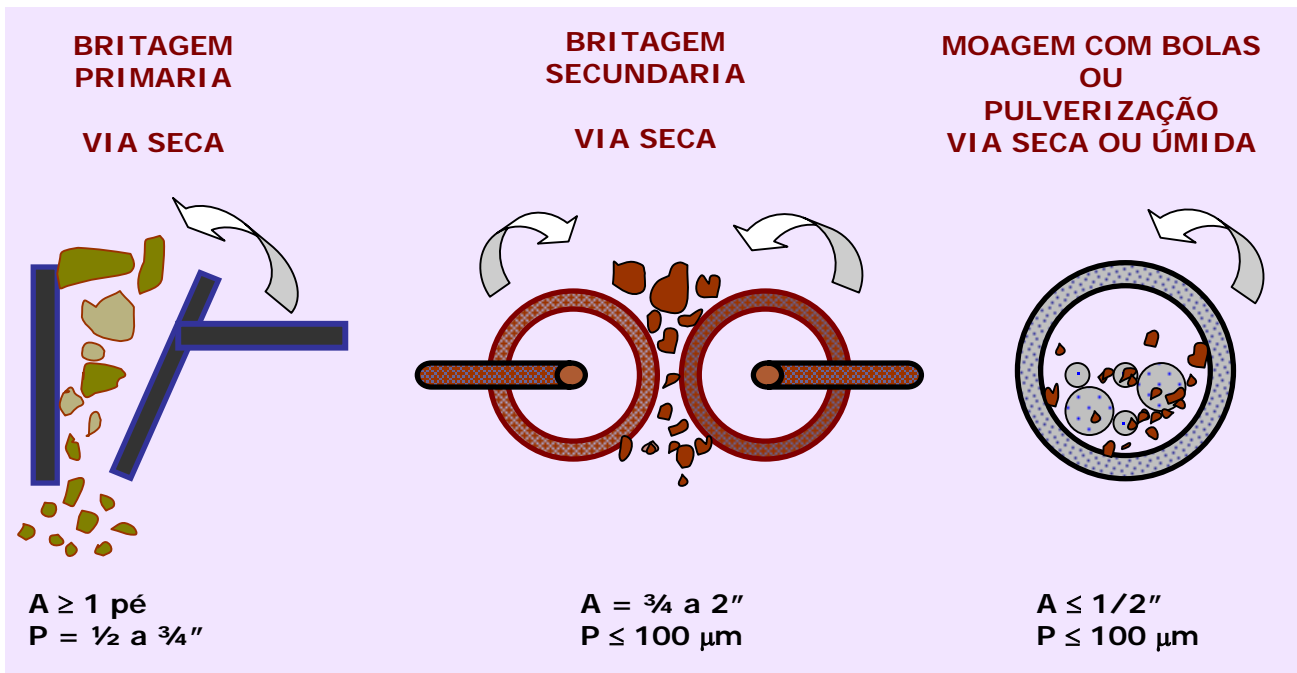
### D – QUEIMA CERÂMICA



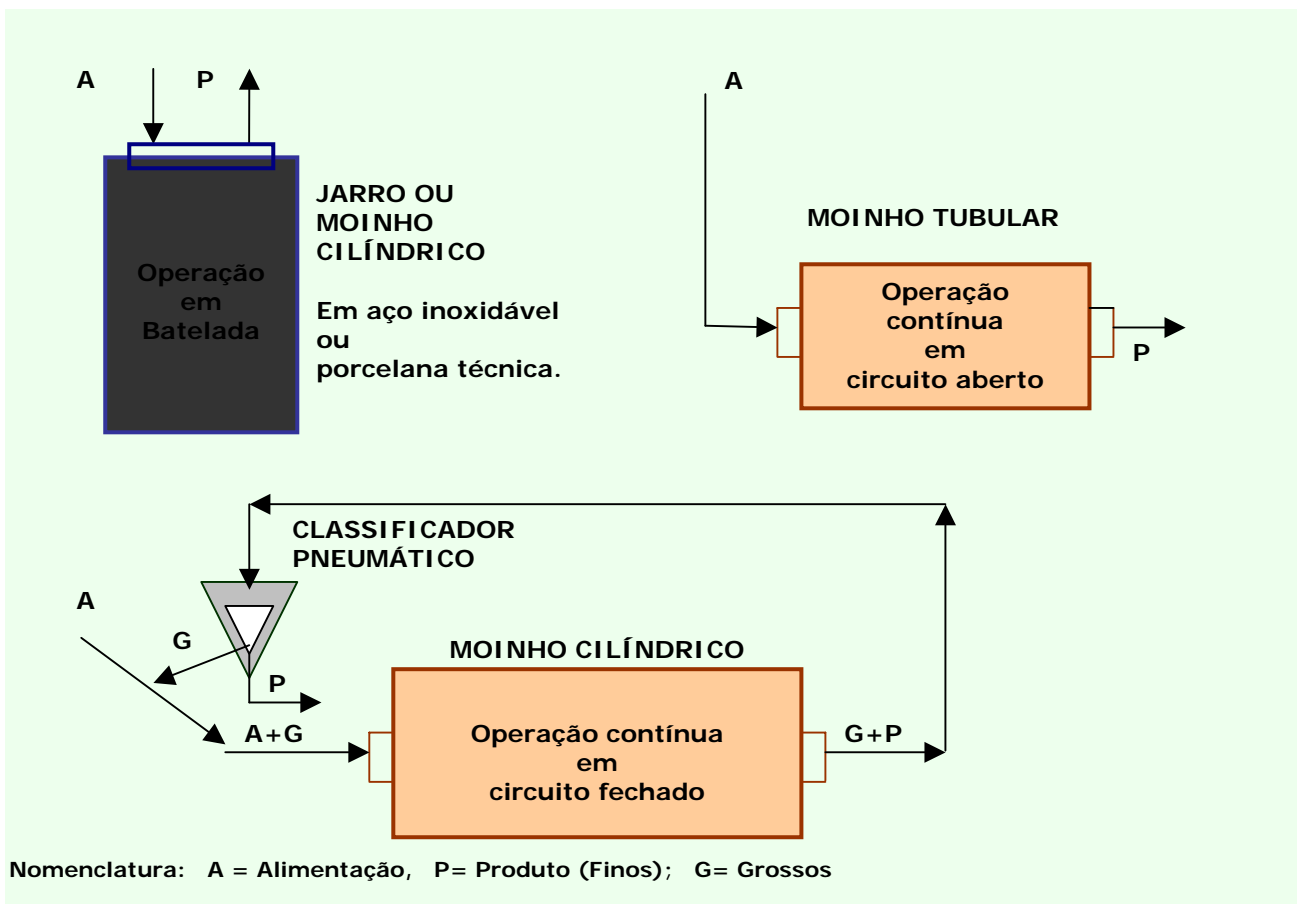


## PROCESSOS PARA REDUÇÃO DE TAMANHOS DE MINÉRIOS

(Zakon, 1992)

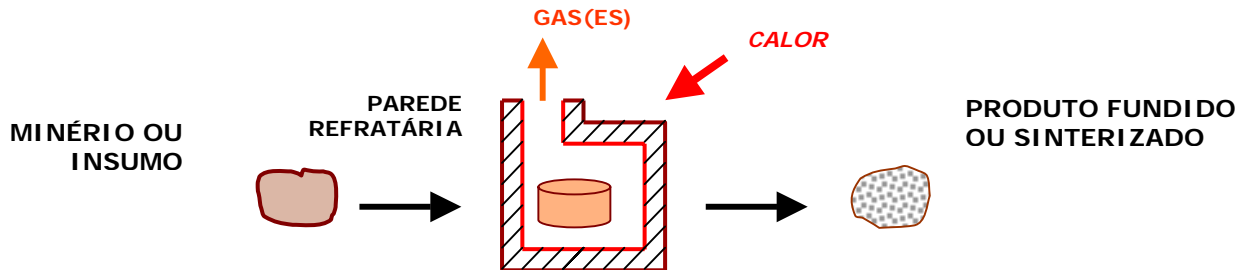


### (B) REGIMES DE OPERAÇÃO LABORATORIAL E INDUSTRIAL

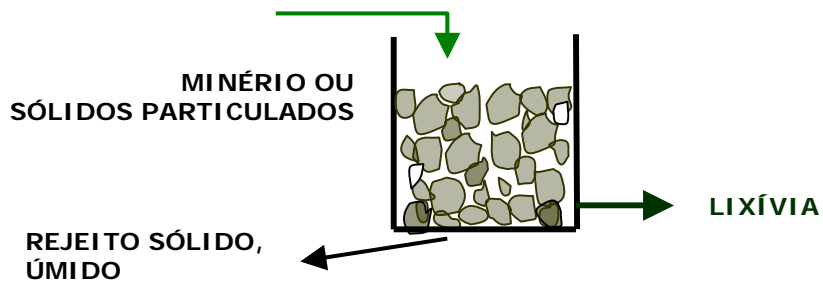


## AMBIENTES DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA, HIDROQUÍMICA E ELETROQUÍMICA PARA SÓLIDOS E MINÉRIOS

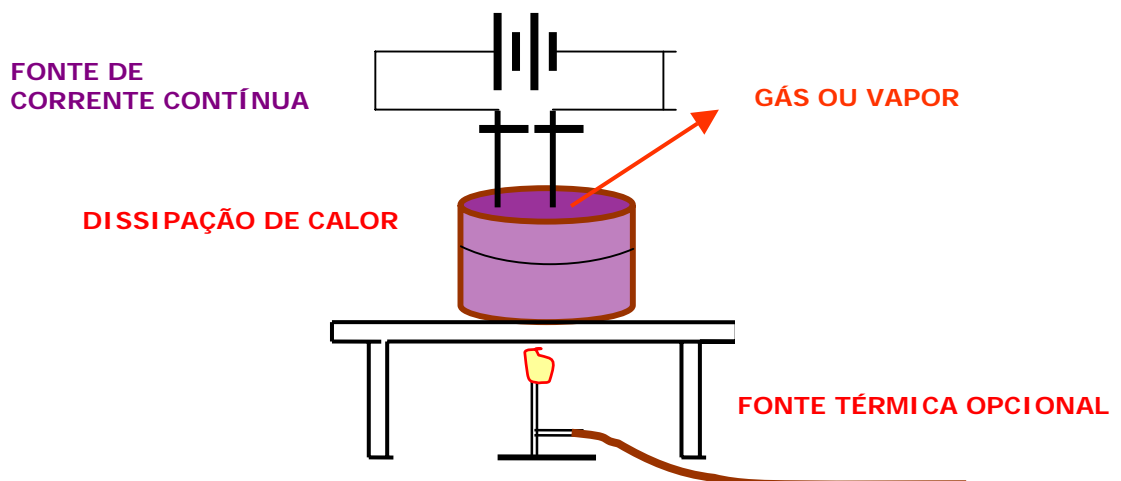
REATOR TERMOQUÍMICO = FORNO OU CUBA



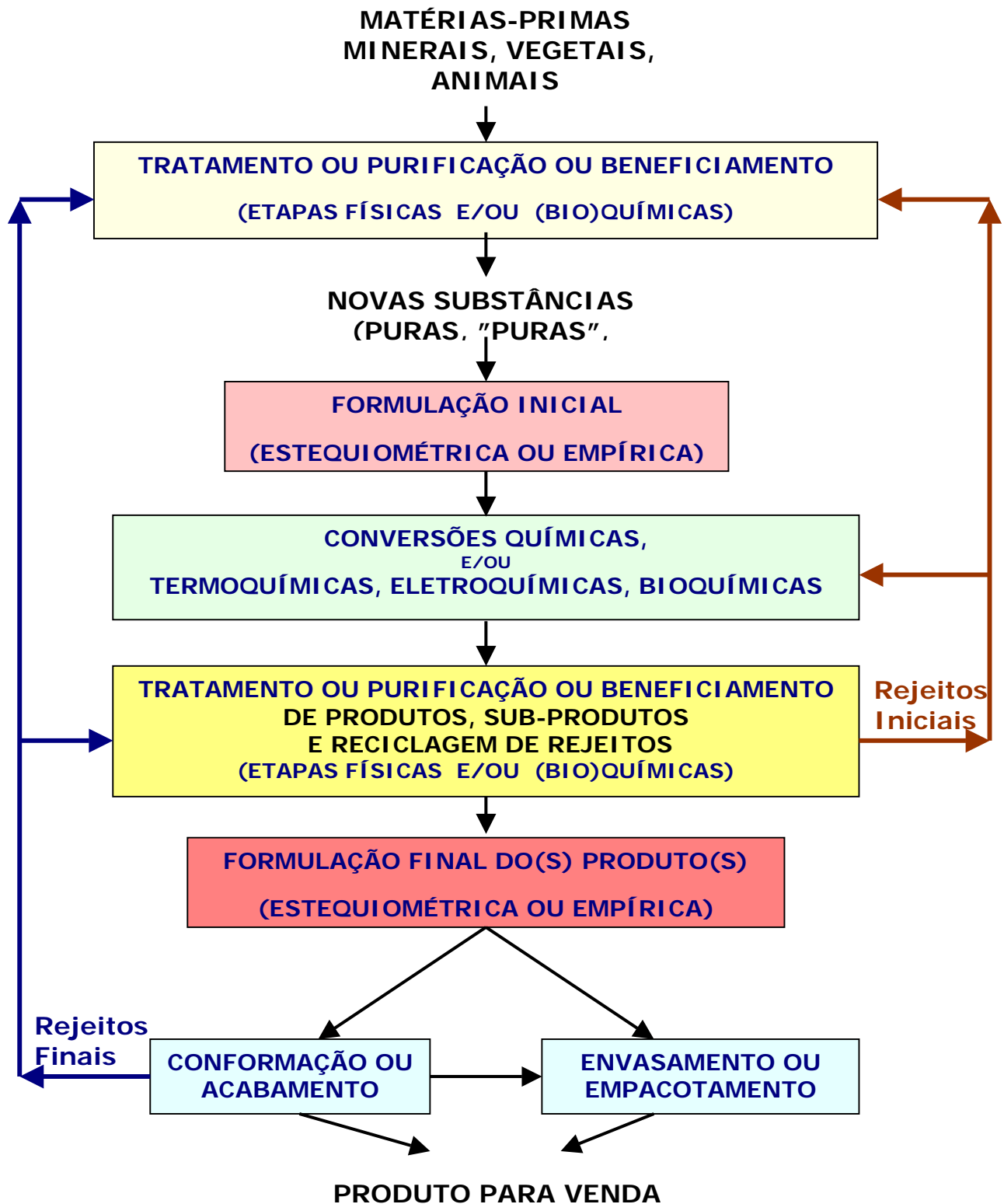
REATOR HIDROQUÍMICO = TANQUE OU VASO RECHEADO



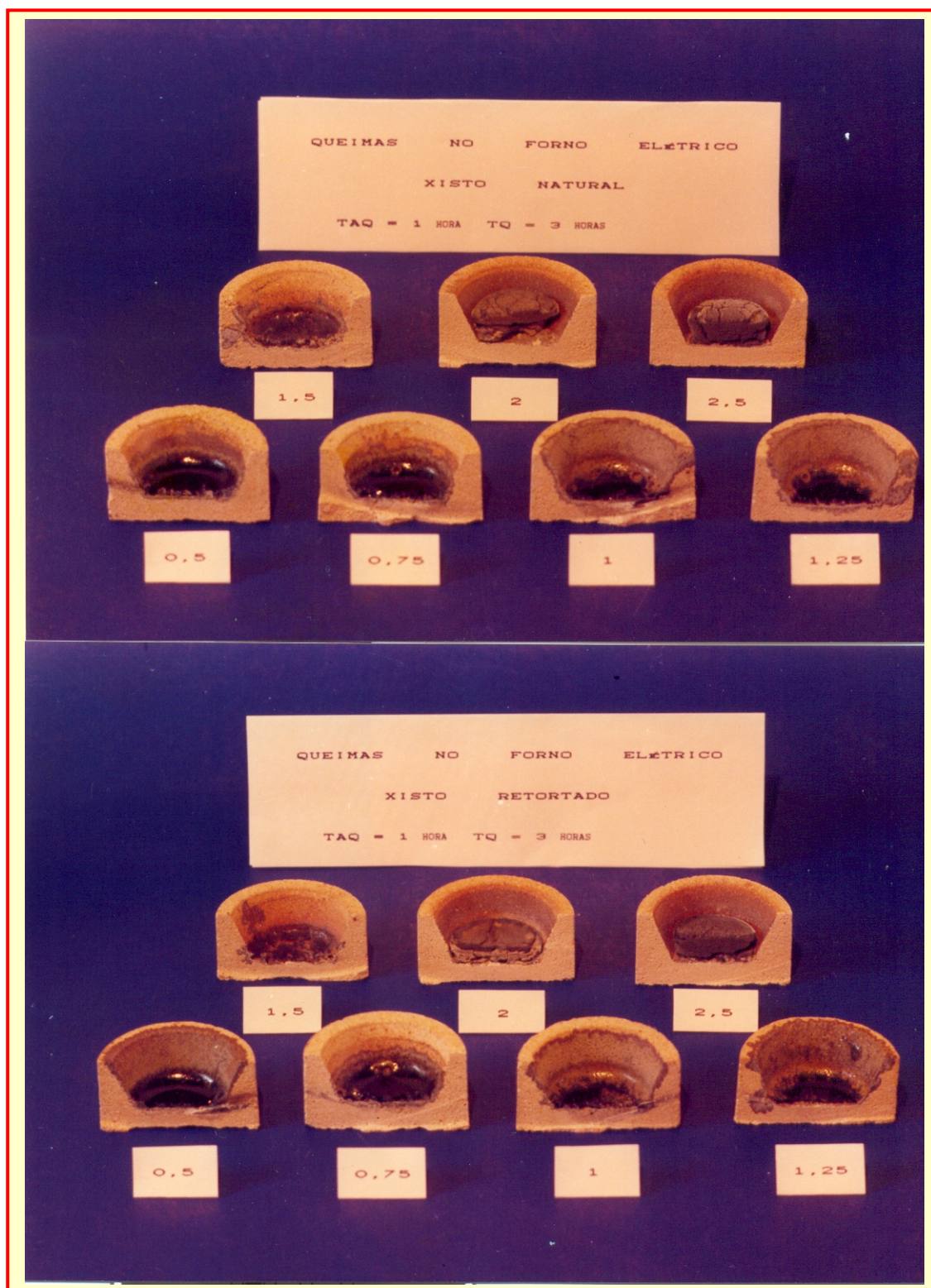
REATOR ELETROQUÍMICO = CÉLULA ELETROLÍTICA ou CUBA ou CADINHO COM LÍQUIDO OU SAL FUNDIDO



## A FORMULAÇÃO NOS PROCESSOS QUÍMICOS INDUSTRIAIS SUSTENTÁVEIS



## FORMULAÇÕES EMPÍRICAS DE CLÍNQUERES PARA CIMENTOS PORTLAND (1)



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



## FORMULAÇÕES EMPÍRICAS DE CLÍNQUERES PARA CIMENTOS PORTLAND (2)

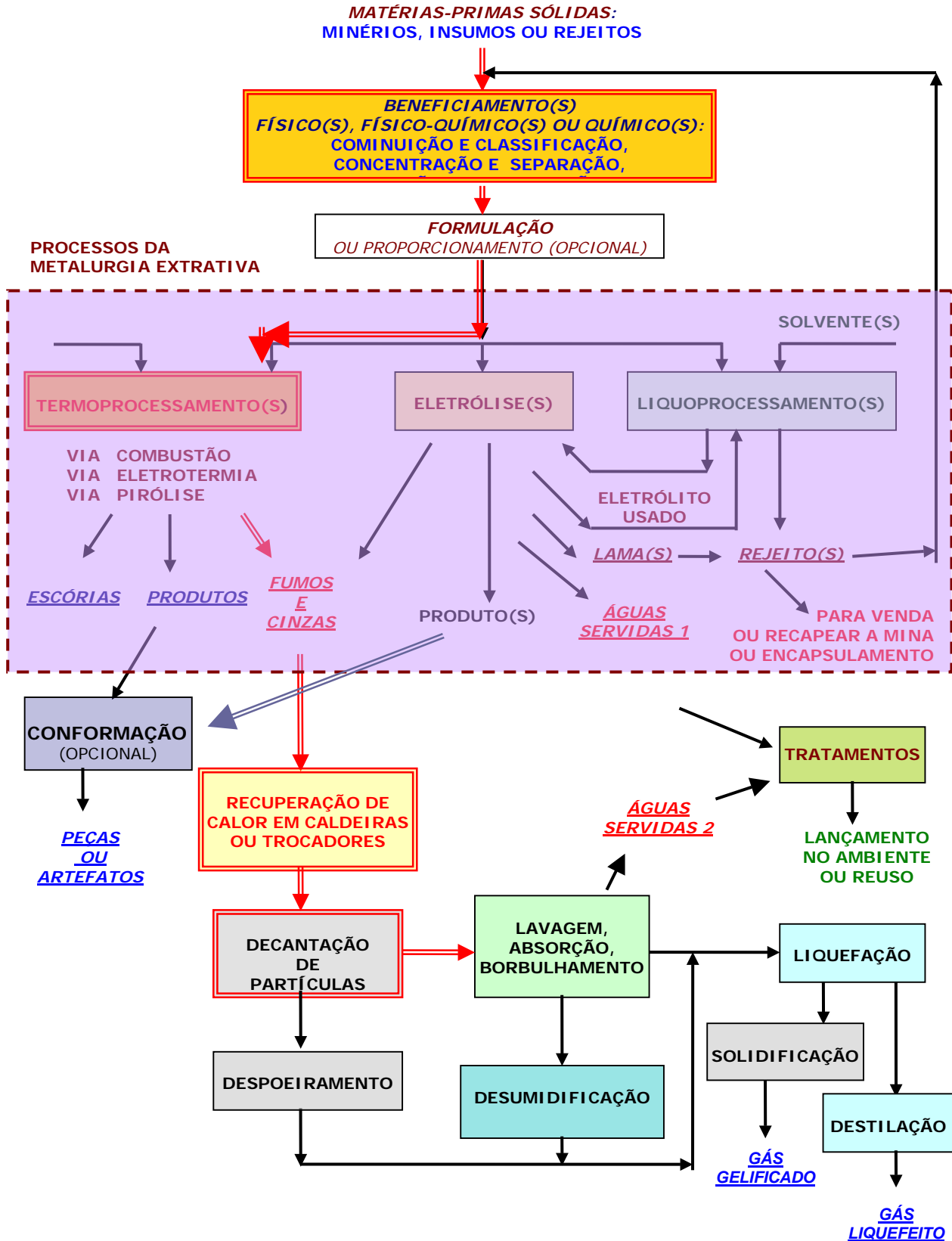


Ref.: ZAKON, A.. - *Reciclagem de Rejeitos Sólidos Industriais: Desenvolvimento de Clínquer para Cimento Portland em Escala de Laboratório, a partir de Xisto Retortado do Processo Petrosix (Petrobrás)* – Orientador: Dr. Pérsio de Souza Santos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Curso de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



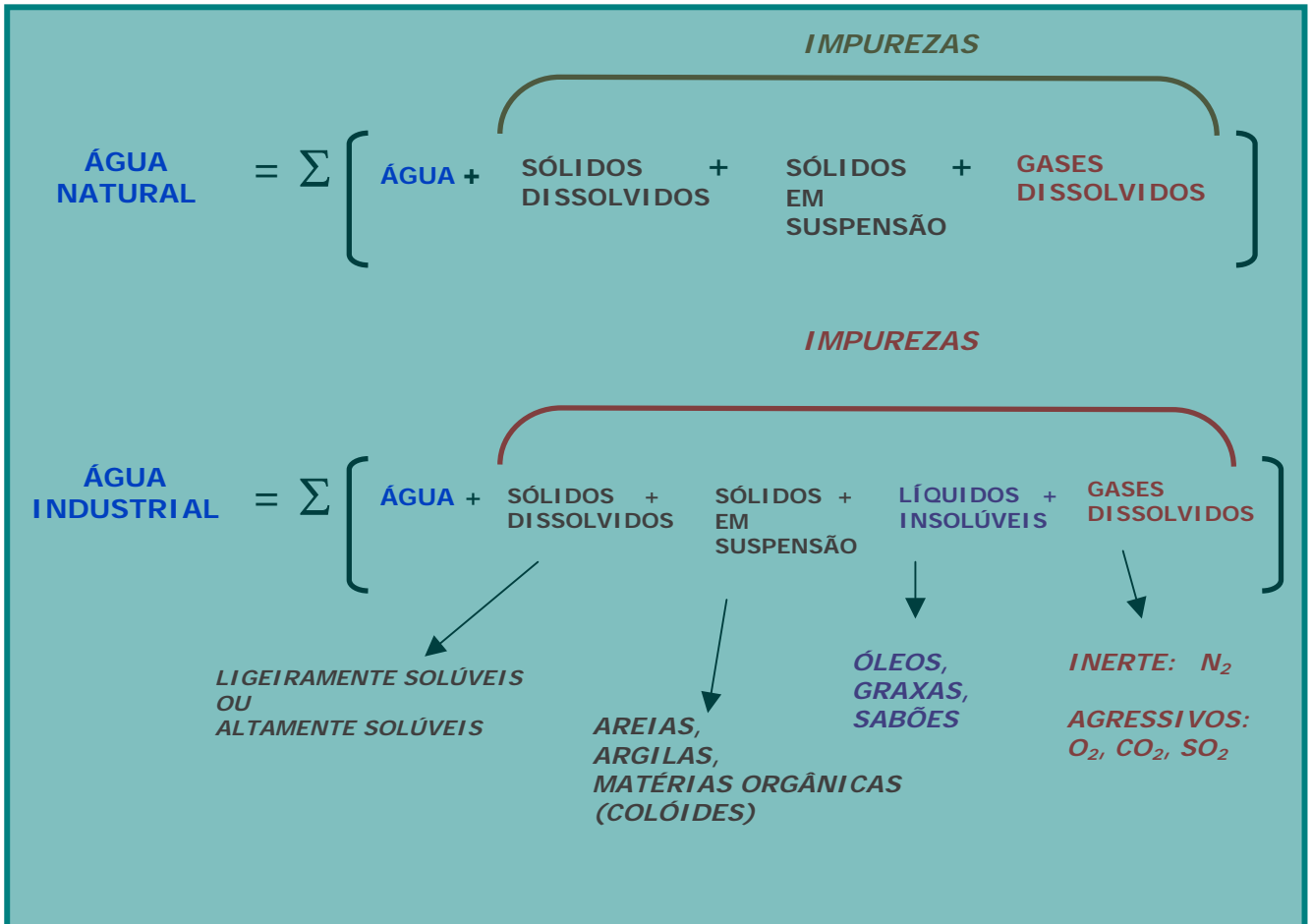
# TRATAMENTOS GERAIS DE SÓLIDOS INTEGRADOS AOS DE LÍQUIDOS, LIXÍVIAS, FUMOS E GASES PARA FINS INDUSTRIAIS E AMBIENTAIS

(adaptado de Zakon, 1992)

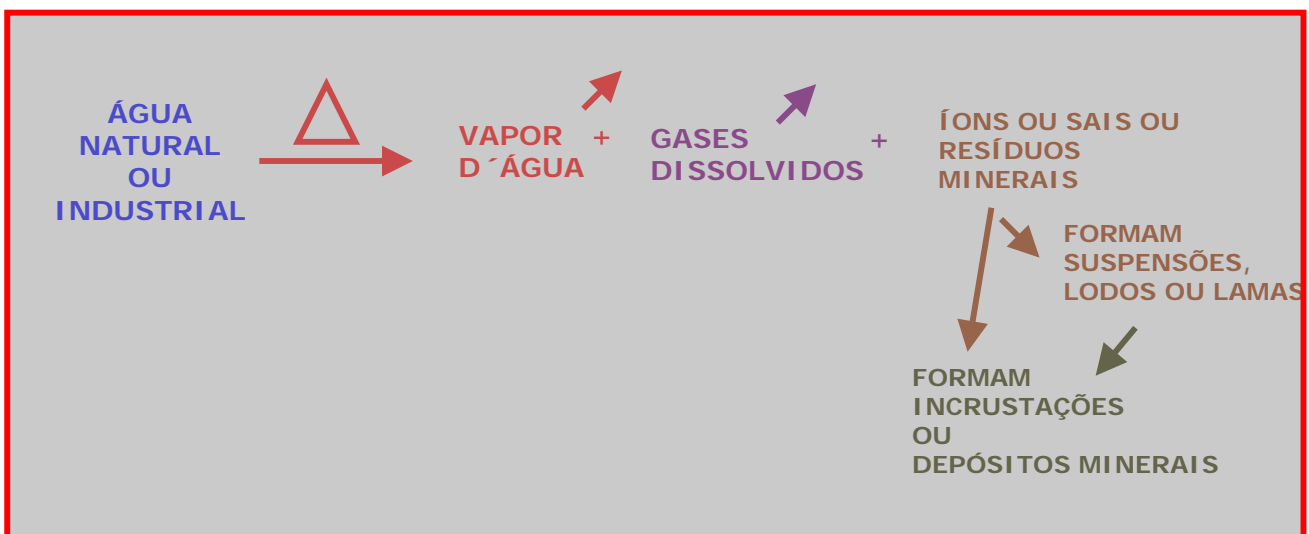


## COMPOSIÇÕES QUÍMICAS GENÉRICAS DAS ÁGUAS CONSUMIDAS EM INDÚSTRIAS

(adaptado de Pera, 1966)

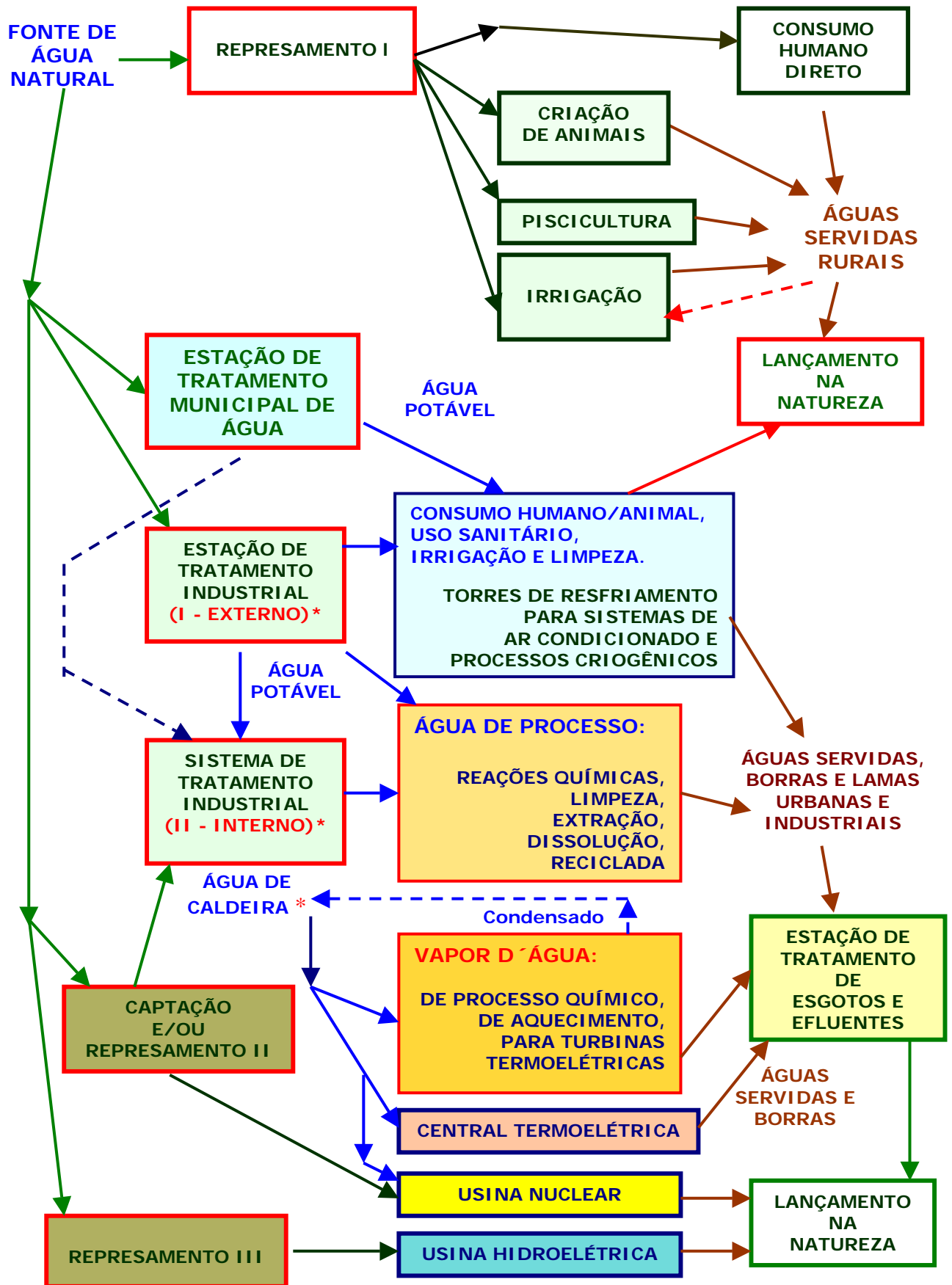


## CONSEQUÊNCIAS DOS USOS DAS ÁGUAS EM UNIDADES DE PROCESSO



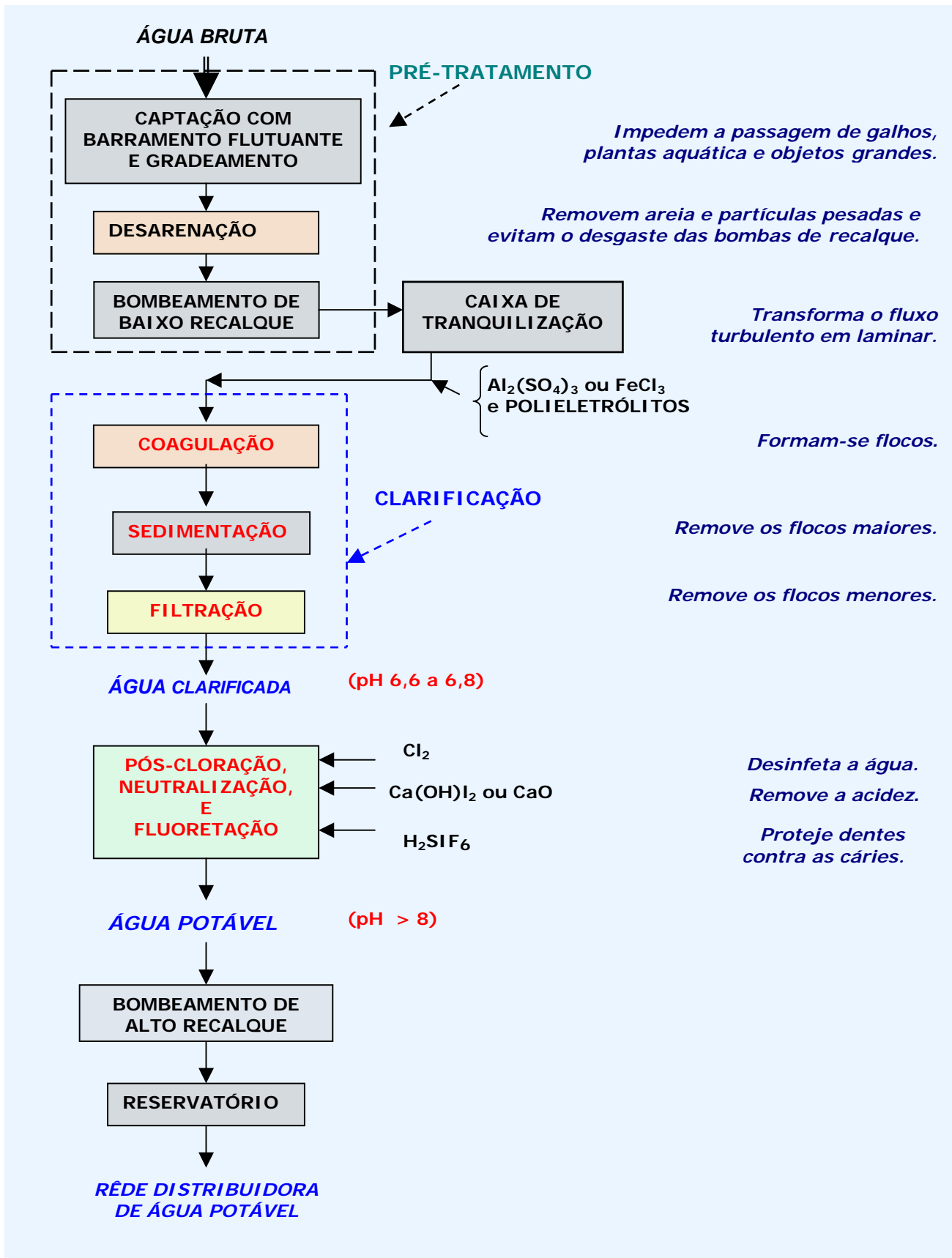


## APROVEITAMENTO E TRANSFORMAÇÃO DAS ÁGUAS NATURAIS, INDUSTRIAIS E SERVIDAS



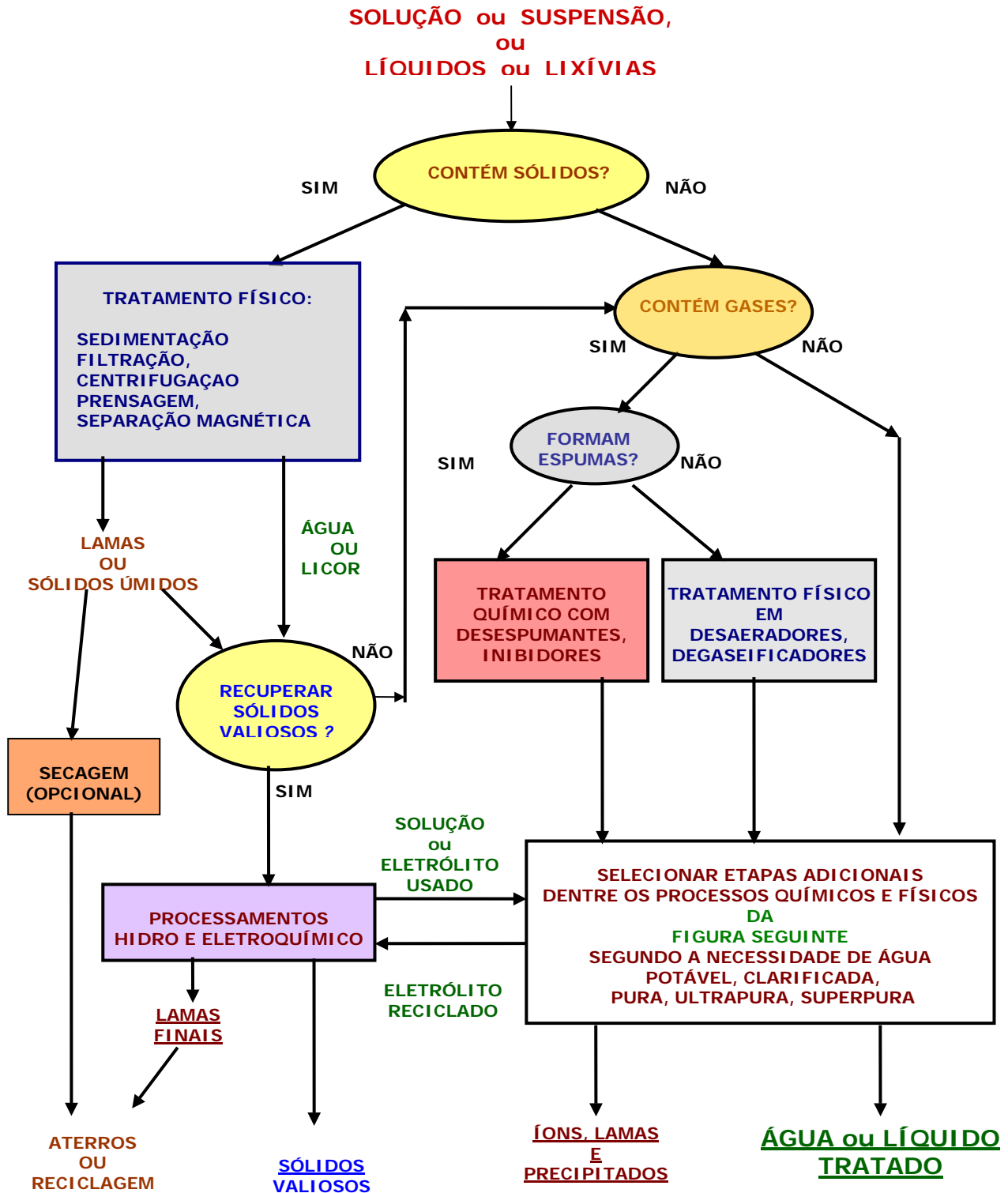
## UNIDADES DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA CEDAE – GUANDÚ, RJ

(Gama Alves, 1996 e Publicações da Cedae-RJ)



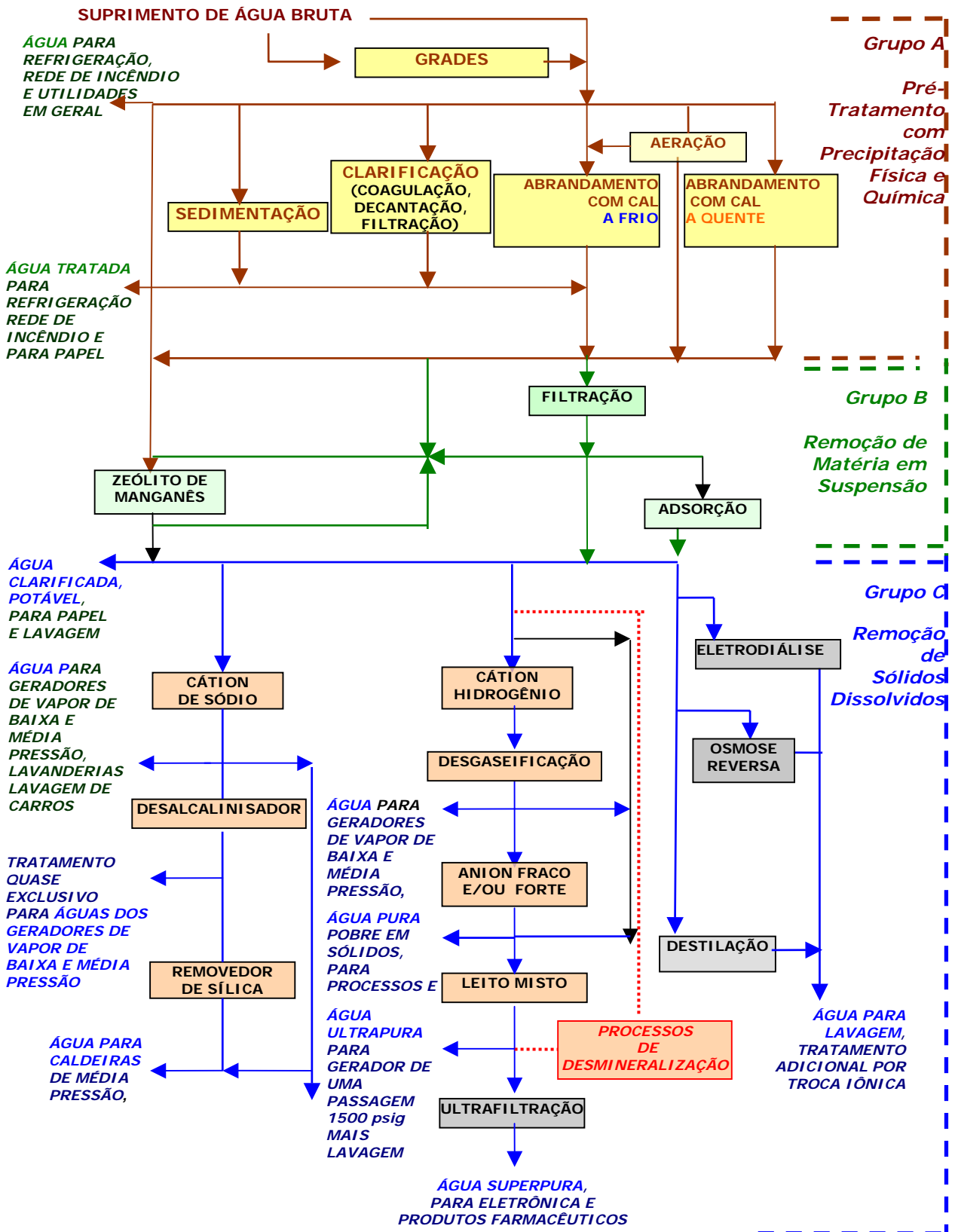
## TRATAMENTOS GERAIS DE LÍQUIDOS, LIXÍVIAS E ÁGUAS SERVIDAS

(Zakon, 1992)



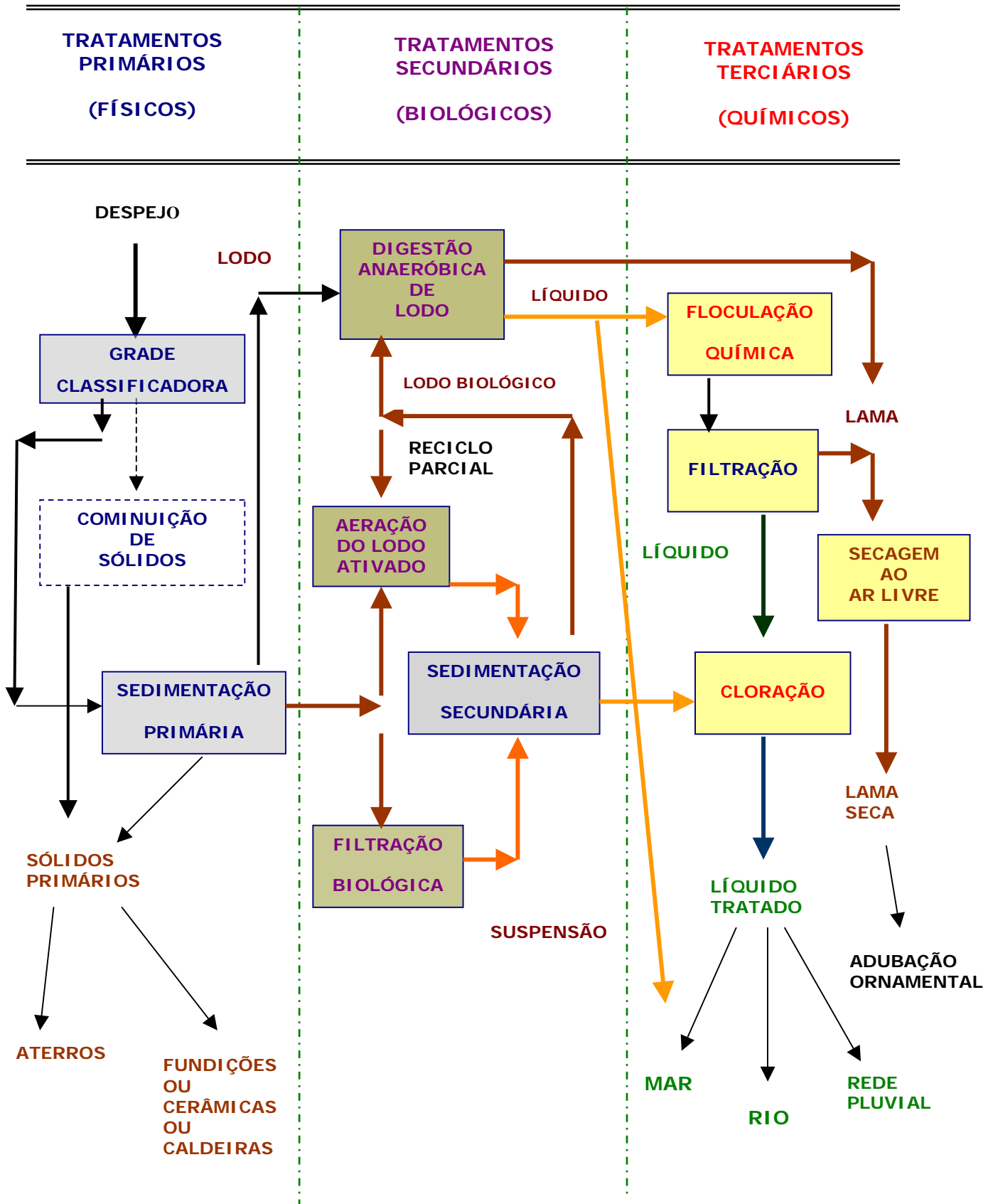
# PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA FINS INDUSTRIAIS

(Drew, 1979).



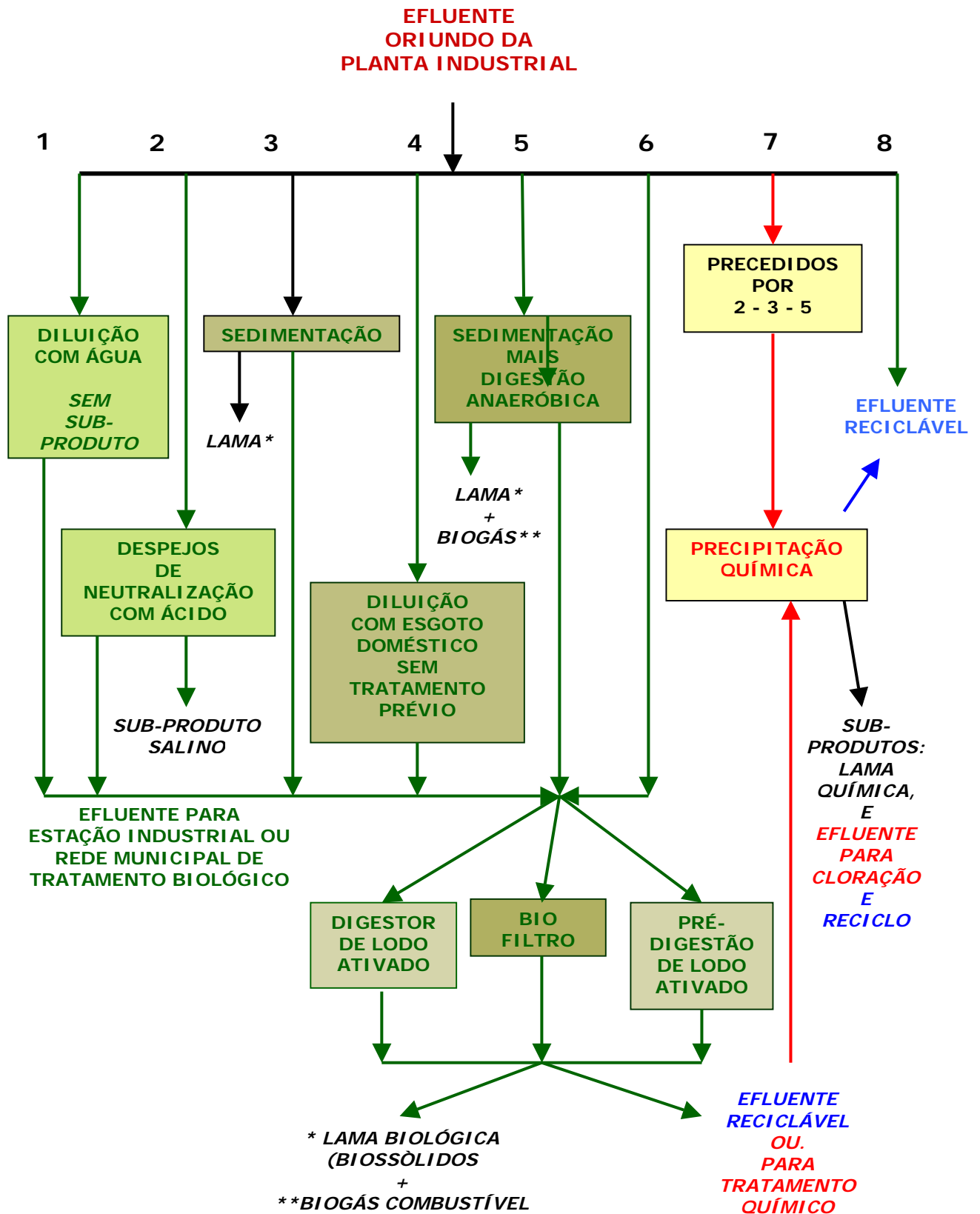
## TRATAMENTOS FÍSICOS, BIOLÓGICOS E QUÍMICOS

### DE DESPEJOS AQUOSOS COMUNITÁRIOS E INDUSTRIAIS



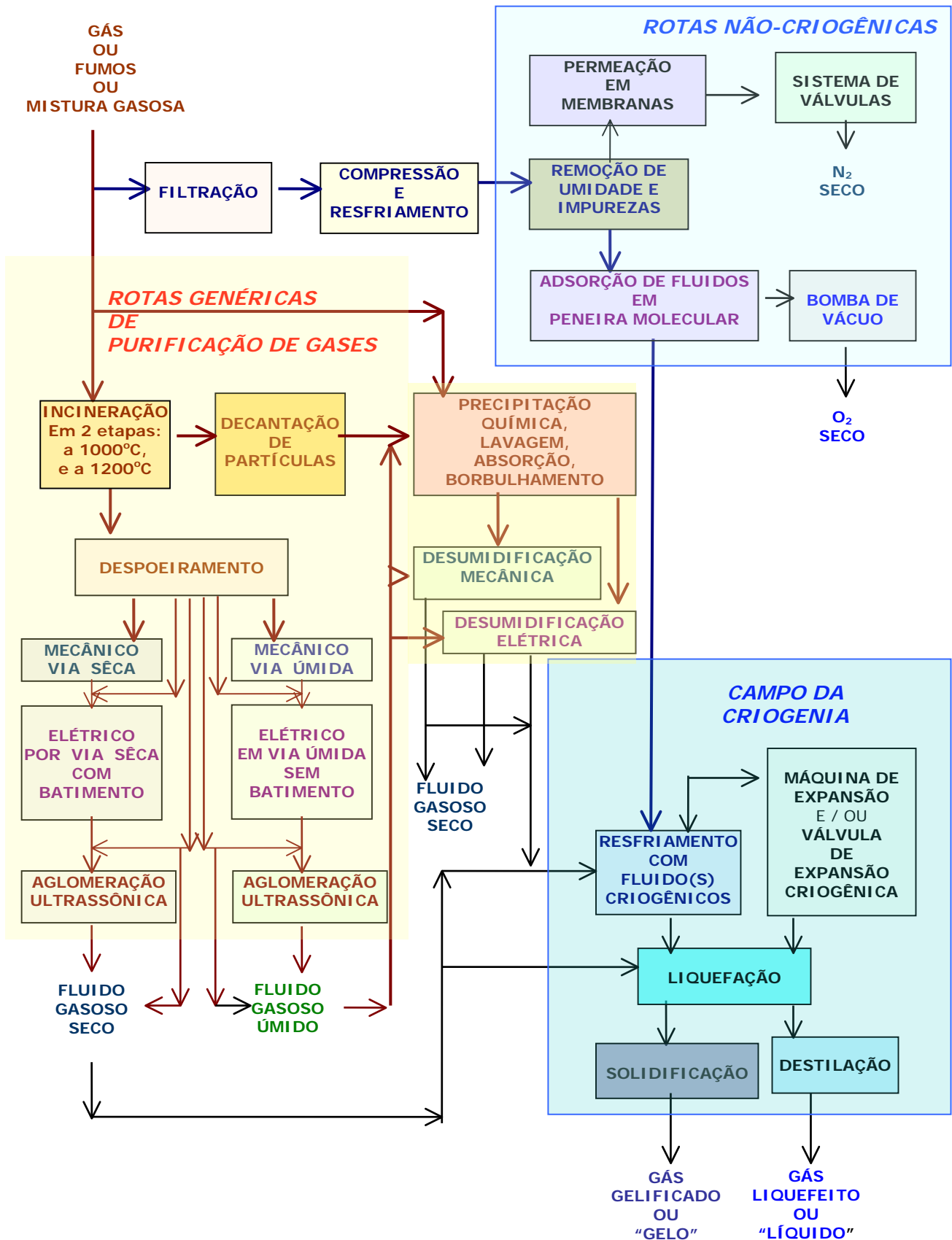
## OPÇÕES PARA O TRATAMENTO DE DESPEJOS AQUOSOS INDUSTRIAIS

(adaptado de Besselievre, 1952)



## TRATAMENTOS GERAIS PARA GASES E EMISSÕES GASOSAS

(adaptado de Zakon, 1992)

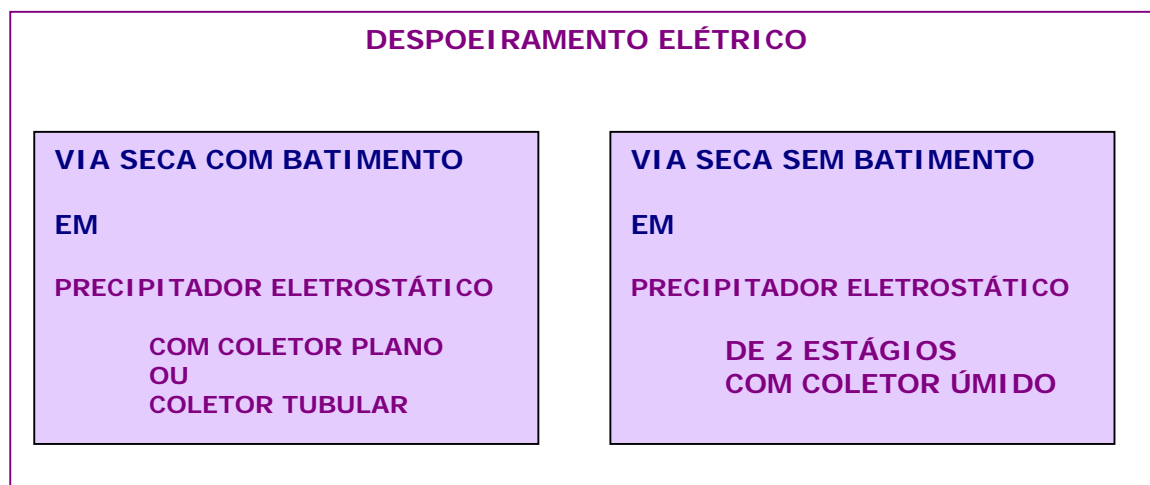


## TÉCNICAS PARA TRATAR EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

(Editores, *Chemical Engineering*, 1990).

TÉCNICAS DE TRATAMENTO	VAPORES ORGÂNICOS	VAPORES INORGÂNICOS	PARTICULAS	SO <sub>x</sub> e NO <sub>x</sub>
<b>INCINERAÇÃO</b>				
<b>ADSORÇÃO</b>				
<b>CONDENSAÇÃO</b>				
<b>ABSORÇÃO</b>				
<b>FILTRO DE MANGAS (<i>Baghouses</i>)</b>				
<b>PRECIPITAÇÃO ELETROSTÁTICA</b>				
<b>LAVAGEM DE GASES (<i>Wet scrubbing</i>)</b>				
<b>COMBUSTÃO MODIFICADA</b>				
<b>REDUÇÃO QUÍMICA</b>				

## ETAPAS DE ALGUNS TRATAMENTOS GERAIS PARA GASES



### REFERÊNCIAS:

- 1 – WHITE MARTINS – *Visitas técnicas efetuadas desde 1978 e catálogos diversos.*
- 2 – GUEDES FILHO, E. – *Gases para fins industriais, suas propriedades, seus benefícios - Petro & Gás*, nº 8, pág. 18-24, julho (1987)
- 3 – PERRY, R. H. e CHILTON, C.H. - *Manual de Engenharia Química, 5ª Edição* - Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- 4 – JOARLETTE, J-P. – *Geração de oxigênio e nitrogênio por vias não-criogênicas e sua utilização na indústria siderúrgica - Metalurgia & Materiais*, 50 (436): 1199 – 1203, dezembro (1994).
- 5 - Editor(s) - *Cover story – Wiping out air pollution - Chemical Engineering*, 97 (9): 106-107, september 1990.



## ETAPAS DE ALGUNS TRATAMENTOS GERAIS PARA GASES

### LIQUEFAÇÃO CRIOGÊNICA DE GASES

VIA

COMPRESSÃO  
ESFRIAMENTO  
REFRIGERAÇÃO  
ABSORÇÃO DE IMPUREZAS EM COLUNA RECHEADA  
RESFRIAMENTO  
EXPANSÃO

### SOLIDIFICAÇÃO DE GASES

VIA

DESCOMPRESSÃO E PRODUÇÃO DE NEVE  
PRENSAGEM  
CORTE DAS TORTAS DE GELO

### DESTILAÇÃO CRIOGÊNICA DE GASES

#### CONDENSAÇÃO PARCIAL SOB PRESSÃO BAIXA

Até = <10 atm expandindo até 0,5 atm

RESFRIAMENTO COM  
GASES ORIUNDOS DA  
COLUNA DUPLA DE SEPARAÇÃO

+

COLUNAS RETIFICADORAS

GERANDO LÍQUIDO(S) PURO (S)

#### CONDENSAÇÃO PARCIAL SOB ALTA PRESSÃO

De 80 atm a 200 atm

RESFRIAMENTO COM  
FREON 12 E 22

+

EXPANSÃO ATÉ 6 a 7 atm  
COM OU SEM  
PRODUÇÃO DE TRABALHO

GERANDO LÍQUIDO(S) PURO(S)

#### REFERÊNCIAS:

- 1 – WHITE MARTINS – Visitas técnicas efetuadas desde 1978 e catálogos diversos.
- 2 – GUEDES FILHO, E. – Gases para fins industriais, suas propriedades, seus benefícios - *Petro & Gás*, nº 8, pág. 18-24, julho (1987)
- 3 - PERRY, R. H. e CHILTON, C.H. - *Manual de Engenharia Química*, 5ª Edição - Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- 4 – JOARLETTE, J-P. – Geração de oxigênio e nitrogênio por vias não-criogênicas e sua utilização na indústria siderúrgica - *Metalurgia & Materiais*, 50(436): 1199 – 1203, dezembro (1994).

## UTILIDADES NAS INDÚSTRIAS (QUÍMICAS)

<i>PRODUTOS OPCIONAIS</i>	<i>APLICAÇÕES</i>
1. <b>ÁGUA DE PROCESSO</b>	REAÇÕES QUÍMICAS (**) LIMPEZA (**) EXTRAÇÃO (**) DISSOLUÇÃO (**) RECICLADA (**)
2. <b>ÁGUA DE CALDEIRA</b> (**)	BAIXA, MÉDIA E ALTA PRESSÃO
3. <b>ÁGUA POTÁVEL E DE SERVIÇO</b>	CONSUMO HUMANO E ANIMAL (*) USO SANITÁRIO (***) LIMPEZA DE AMBIENTES (***)
4. <b>ÁGUA PARA TORRE DE RESFRIAMENTO (E REFRIGERAÇÃO)</b>	ATENDIMENTO DE PROCESSO INDUSTRIAL (**) CONDENSADORES EVAPORATIVOS (**) SALMOURAS (**) SISTEMAS DE AR CONDICIONADO OU MERCADO CONFORTO (**)
5. <b>VAPOR D'ÁGUA</b>	PROCESSO QUÍMICO (**) AQUECIMENTO (**) TURBINAS A VAPOR (**)
6. <b>AR COMPRIMIDO</b>	"DE SERVIÇO" EM LIMPEZA E AÇÕES MECÂNICAS DESUMIDIFICADO PARA CONTROLE PNEUMÁTICO
7. <b>VÁCUO</b>	OPERAÇÕES UNITÁRIAS INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE
8. <b>GASES INDUSTRIAIS</b> (****)	
<b>N<sub>2</sub> LÍQUIDO (CRIOGÊNICO)</b>	CONGELAR ALIMENTOS, SANGUE, PERECÍVEIS, ÁGUA EM TÚNEIS NOS SOLOS MACIOS E ÚMIDOS
<b>O<sub>2</sub> LÍQUIDO (CRIOGÊNICO)</b>	INERTIZAÇÃO CONTRA FOGO E EXPLOÇÃO ACIARIA, SOLDAGEM, COMBUSTÃO, TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS
<b>ACETILENO</b>	<b>SOLDAGEM</b>
<b>ARGÔNIO</b>	ACIARIA, CORTE E SOLDAGEM
<b>CO<sub>2</sub> SÓLIDO OU LIQUEFEITO</b>	REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL E DE ALIMENTOS GASEIFICAÇÃO DE BEBIDAS
9. <b>COMBUSTÍVEIS</b>	QUEIMA EM CALDEIRAS E FORNOS MOTORES INDUSTRIAIS E VEÍCULOS
10. <b>ENERGIA ELÉTRICA</b>	COR. ALTERNADA EM MOTORES E APARELHOS, SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO E ELETRÔNICOS COR. CONTÍNUA EM MOTORES E APARELHOS, CÉLULAS ELETROQUÍMICAS

*ORIGENS DA ÁGUA (OU DO VAPOR)*

(\*) *FONTE NATURAL*

(\*\*) *TRATADA EM ESTAÇÃO INDUSTRIAL OU SISTEMA LOCAL*

(\*\*\*) *TRATADA EM ESTAÇÃO ESTADUAL OU MUNICIPAL*

(\*\*\*\*) *AS SIDERÚRGICAS INCLUEM ALGUMAS UNIDADES DE GASES INDUSTRIAIS NAS SUAS UTILIDADES.*