

O PARADIGMA/ /PARADOXO DA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS: DA MATÉRIA À ENERGIA, DO INÚTIL AO ESSENCIAL*

José Filipe dos Santos Oliveira

Prof. Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa(*)

Resumo

A valorização energética de resíduos tem conhecido nas últimas décadas progressos muito assinaláveis. De uma forma geral, essa valorização tem sido ensaiada por via química, submetendo os resíduos a temperaturas elevadas na presença de oxigénio. A produção de emissões gasosas, associada a este tipo de processos, conduziu a situações tendencialmente inaceitáveis do ponto de vista ambiental. Uma via alternativa será um tratamento térmico na ausência de oxigénio, designada por pirólise. Quando essa pirólise é efectuada, a temperaturas progressivamente mais elevadas, pode atingir-se uma transformação dos materiais em gases, com um teor calórico muito significativo e com formação de cinzas. Na sequência de ensaios, realizados na NASA, com o objectivo de construir painéis susceptíveis de suportar as elevadas temperaturas, verificadas aquando da reentrada das naves espaciais na atmosfera, atingiu-se o estado de plasma, em condições de ausência de oxigénio, nas quais a temperatura atinge valores da ordem dos 4000 aos 7000°C. Este processo, que pode ser designado como pirólise plasmática, permite produzir energia a partir de resíduos perigosos, ao mesmo tempo que as cinzas produzidas sofrem um processo de vitrificação.

Apresentam-se alguns resultados obtidos em diferentes unidades, tratando resíduos perigosos muito diversos. Os resultados permitem constatar a eficiência verificada no que respeita à destruição de moléculas com elevado nível de toxicidade, nomeadamente compostos organoclorados, incluindo PCB's, dioxinas, furanos, etc, de resíduos hospitalares, industriais e outros. Ao mesmo tempo obtém-se uma quantidade de energia significativamente superior à que foi consumida no processo.

Da análise do processo dos pontos de vista ecológico, energético e económico, pode concluir-se que se trata de um tipo de tratamento que não sendo ideal (em especial devido aos custos envolvidos) permite contudo encarar a eliminação de resíduos, perigosos ou outros, como uma forma interessante de produção de energia, com uma redução da poluição remanescente a níveis residuais.

Abstract

In the last decades the energetic valorisation of residues has increased. As a rule this valorisation has been done by chemical treatment, submitting the residues to high temperatures in the presence of oxygen. The productions of gas emissions that are associated to those processes have produced several environmental problems. An alternative process will be a thermic treatment in absence of oxygen designated by pyrolysis. When the pyrolysis is utilised with increasing high temperatures, a degradation of the materials is achieved with the production of

* Texto da "Oração de Sapiência" na Universidade Lusófona de Verão (Padrão dos Descobrimentos, Julho 2001).

gas, with an important caloric content, and ashes. Following the experimental work that NASA has performed, to develop panels that could be resistant to the high temperatures observed when the spatial shuttles reenters the atmosphere, the plasm state was achieved, in the absence of oxygen and within a temperature range of 4000 to 7000°C. Using this process, that can be called plasmatic pyrolysis, it is possible to produce energy from dangerous residues and at same time occurs the vitrification of the ashes that are produced during the process.

The data obtained in several plants treating quite diverse dangerous residues, like those from hospitals, industries and others sources, had showed that the degradation of molecules, with high levels of toxicity namely the organochloride compounds, including for instances, PCBs, dioxines and furanes, was very high. At same time the amount of energy obtained was higher than that consumed during the process.

Taking in account an ecological, energetic and economic analyse of the process it can be concluded that this treatment can not be looked as the ideal one (particularly due to high costs). It can be a way only to eliminate the dangerous residues or others ones and also as an interesting process to produce energy with a decrease to residual levels of the remainder pollution.

Introdução

O tratamento dos resíduos, que o desenvolvimento tecnológico tem vindo a gerar neste Mundo que é o nosso, ultrapassou em muito as capacidades de auto-regeneração de que o Planeta dispunha. As consequências são cada dia que passa mais evidentes: a nível da degradação da paisagem, submersa às vezes em lixeiras nauseabundas, quando olhamos para as massas de água, tornadas esgotas a céu aberto, ou ao vermos os campos desertos, transformados em solos contaminados ou em vias de desertificação acelerada. Tudo isso são custos que temos de pagar e cujos reflexos no Futuro não poderemos já recusar.

Mas o Homem, apesar dos actos incorrectos que tem vindo a cometer (ou a deixar cometer, sem assumir em relação a eles a necessária atenção), tem tido (ou alguns Homens têm tido), a capacidade de procurar novas soluções (mesmo que, às vezes, os seus responsáveis não saibam atempadamente aplicar), no sentido de, pelo menos, corrigir alguns desses seus/nossos erros.

É aliás no sentido de apontar caminhos de esperança (embora com a consciência das limitações do “nosso” saber), que me proponho convosco partilhar algumas realizações e informações, a que tive o privilégio de ter acesso, juntamente com algumas reflexões, pelas quais sou responsável. Tudo sobre a problemática de uma realidade que não podemos esquecer, tal a importância que no nosso dia a dia vai cada vez mais assumindo: os resíduos.

Nestes, sem esquecer a globalidade do problema, referir-me-ei em especial aos que apresentam perigosidade ecológica e sanitária, os denominados resíduos perigosos, com os quais temos de saber conviver e de controlar correctamente, tanto quanto nos for possível, para que deles não resultem, directa ou indirectamente, mediata ou imediatamente, impactes que se traduzam em prejuízos incontroláveis.

Importa, porém avançar, neste momento, com alguns conceitos que, em nossa opinião não poderemos deixar de tomar em conta, numa aproximação do Mundo real, da vida, do Ambiente e da acção do Homem sobre esses outros componentes, agentes e actores da nossa realidade quotidiana.

Até há alguns anos atrás, quando se pretendia definir as fases da vida de um Homem, citavam-se quatro: o Nascimento, o Crescimento, a Reprodução e a Morte. Nos nossos dias, com o aumento dos conhecimentos e da sensibilidade ambiental, pode, e deve, juntar-se uma outra fase: a Poluição, que, como veremos, é inevitável e pela qual todos somos responsáveis.

Uma consulta a um qualquer Dicionário de Referência da língua portuguesa, permite dele transcrever as seguintes definições dos termos poluir e poluição, correntemente utilizados na linguagem escrita e falada. Teremos assim:

Poluir (do latim *polluere*) = Sujar, manchar, corromper, desacreditar, deslustrar, profanar, deshonrar, macular, praticar acção infamante.

Poluição = Acto ou consequência de poluir.

Por outro lado, sabemos que, pelo Segundo Princípio da Termodinâmica, todas as actividades são geradoras de poluição, ou, se quisermos, são geradoras de resíduos (materiais e/ou energéticos). Todos somos poluidores, não havendo tecnologias limpas, como já atrás referimos, nem podendo ninguém invocar ausência de culpa, pela degradação da qualidade do Estado do Ambiente.

Pode, por isso, precisar-se o termo poluição, recorrendo à seguinte formulação:

- alteração indesejável nas características físicas, químicas e biológicas do ar, do solo e da água, que podem afectar, ou afectarão, prejudicialmente a vida do Homem ou de outras espécies, os processos industriais, as condições de vida e o património cultural; ou
- o que pode, ou poderá, malbaratar os nossos recursos em matérias primas (Oliveira, 1992).

Como é óbvio, haverá que identificar quais os custos da poluição, que importa não esquecer. De entre os custos, directos e indirectos, mediatos e imediatos da poluição, poderemos destacar os seguintes: – Perda de recursos, através de uma exploração esbanjadora e desnecessária;

“a poluição é muitas vezes um recurso for a de sítio”
(National Academy of Sciences)

– O custo da redução e do controlo da poluição é, em regra, muito (demasiado) elevado;

“A melhor forma de controlar a poluição é evitá-la”

PRINCÍPIO DA PREVENÇÃO (U. Europeia)

O custo, em termos de Saúde humana, animal e vegetal, é exorbitante e, muitas vezes escamoteado nas análises de custos-benefícios, nas Avaliações de Impactes Ambientais e nas Auditorias Ambientais. (OLIVEIRA, 1995)

Toda a actividade, antrópica ou não, gera resíduos, que se vão acumulando no Ambiente e que este é capaz, mas apenas em determinada medida, de reintegrar nos seus ciclos vitais. Mas, como se sabe dos princípios da Termodinâmica, não há nenhuma acção 100% eficiente, no que respeita aos materiais e à energia envolvidos. Nenhuma reacção tem rendimento igual à unidade, pelo que tudo e todos contribuímos para a poluição, cujos efeitos depois nos atingem.

Mas, como é óbvio, alguns sectores, ou algumas actividades, são mais responsáveis do que outras pelos desequilíbrios ambientais. Uma folha, que cai de uma árvore sobre o rio, não constitui uma forma significativa de poluição, mesmo que provoque, temporariamente, uma acumulação indevida de materiais naquele ponto do ecossistema.

Não é pois verdade, como diria ORWELL, parafaseando “O Triunfo dos Porcos”, que todos os poluentes sejam iguais, existindo poluentes que são mais iguais que os outros, tal como em relação a tudo o mais a que esta frase se pode aplicar.

Há problemas distintos, que não podem ser confundidos nem desvalorizados, recorrendo a quaisquer tipos de razões ou de manipulações. Há poluentes que põem em risco a saúde do Homem e das populações animais e vegetais que com ele se interrelacionam, que afectam o equilíbrio ambiental e a Vida na sua globalidade, de muitas e variadas formas.

Haverá que tomar, desde logo, consciência das relações existentes entre:

- a dispersão dos resíduos
- o malbaratar dos recursos naturais
- a poluição a longo prazo

A partir daí, foram os Homens e as nações tomando progressivamente consciência de que há só uma Terra e de que, como ressalta do relatório MEADOWS (“The Limits to Growth”), o nosso planeta constitui uma unidade funcional baseada em dois axiomas:

- o crescimento exponencial num sistema finito conduz, inevitavelmente, à exaustão de recursos disponíveis e à sua destruição;
- todos os elementos de um tal sistema são interdependentes.

É este um típico problema de crescimento/poluição/geração de resíduos, cada vez menos manejáveis, que a intensificação da produção de organismos/alimentos, destinados a alimentar as indústrias, fez nascer na sua envolvente ambiental.

Este avanço conceptual (e muitos dos progressos seguintes), resultaram dos avanços e discussões desencadeados pelo Clube de Roma, procurar dar consciência, aos Homens da década de 70, da necessidade de gerir os resíduos produzidos.

Mas, o que devemos entender por resíduo? Começemos por uma proposta de definição:

- Resíduo – Co-produto que não podemos, não queremos ou não sabemos utilizar num determinado momento e local, mas que, noutras circunstâncias, poderiam ser utilizados (OLIVEIRA, 1995).

A noção de resíduo é uma noção relativa, em especial em dois aspectos:

- Qualquer objecto torna-se um resíduo, quando deixa de exercer a sua função primária em relação ao seu utilizador; contudo
- O que é considerado resíduo quanto à sua função primária, pode ser útil para uma função secundária.

Este facto, abundantemente demonstrado pela simples observação da Natureza, explica porque motivo alguns resíduos continuam a ter um valor significativo (ao menos potencial e num contexto determinado) do ponto de vista do local e das tecnologias envolvidas.

A diversidade de composição dos resíduos e a disparidade do seu comportamento ambiental, obrigam a considerar a sua gestão global como uma operação complexa, exigindo uma diversidade, cada vez maior, de soluções e de tecnologias, que se têm de complementar, de forma racional e harmónica.

Sabendo que “o melhor resíduo” é o que não chegou a ser formado, que “é melhor valorizar do que tratar” e que “a reciclagem é preferível a qualquer outro destino dos resíduos (mais ou menos “final”)), importa estar atento às tecnologias emergentes que, um pouco por todo o lado, nos são propostas. Na realidade, muitas dessas tecnologias não são na realidade, novas. Foram apenas modificadas e/ou, eventualmente, adaptadas e completadas, face às novas realidades.

O que importa será poder garantir que em todos os casos e em todos os locais, os resíduos formados gerarão impactes tão reduzidos quanto possível e que a sua valorização máxima foi antes conseguida. Importará, acima de tudo, minimizar a sua produção a montante e maximizar a sua eco-compatibilidade, isto é, a sua capacidade de co-existência com a envolvente ambiental. Certamente que isso não será fácil, mas, dentro de certos limites, terá de ser, e é, possível.

2

Recordando Einstein, agora que o põem em causa

A Ciência, felizmente para a Humanidade, não deixa de progredir e de pôr continuamente em causa os seus próprios fundamentos. E, eis senão quando, uma das bases da Teoria que Einstein elaborou, e pela

qual recebeu de um qualquer júri *ad hoc*, a qualificação de Maior Cientista do Século XX, é posta em causa: a constante c , representativa da velocidade da luz no vácuo, seria passível de ser ultrapassada e já o teria sido em condições laboratoriais (mais de 300 vezes)!

A comprovar-se esse facto, tratar-se-ia de um avanço significativo do conhecimento, com repercussões, para já imprevisíveis, nos conceitos de Espaço e de Tempo, quiçá nas deslocações espaciais que um dia poderão ser realidade.

Contudo a base da Teoria da Relatividade, não é deste modo posta em causa, isto é, $E=Mc^2$, não deixa de significar, qualquer que seja o valor de c (que poderá nem sequer ser constante!), que a Matéria pode ser convertida em Energia (ou vice versa), em função da velocidade de deslocação do objecto considerado.

O que é importante para a nossa exposição é que, quer num caso quer noutro, a noção de resíduo pode ser posta em causa. Se a Energia é um factor de desenvolvimento escasso num Planeta limitado como é a Terra, haverá, teoricamente pelo menos, que considerar a conversão dos resíduos, que são Matéria, em Energia, conduzindo a situação de resíduo a uma situação nova, de mais valia evidente.

Para tal bastaria que, uma vez que a Fusão Atómica não é ainda dominada em laboratório, se dispusesse de uma tecnologia através da qual essa transformação em Energia, a partir da Matéria, pudesse ser realizada de forma eficiente e sem impactes que não conseguíssemos dominar. Ou seja, a recuperação dessa energia poderia ser parcial, mas teria de ser realizável, em condições que não gerassem poluição incontrolável, e com eficiência economicamente aceitável.

O problema será, portanto, a possibilidade de transformar qualquer resíduo em Energia, controlando as emissões, térmicas, químicas ou outras, decorrentes dessa operação. Deste modo, além de se poder produzir energia, em quantitativos certamente correspondentes aos cenários de consumo mais ambiciosos, todos os resíduos seriam, efectivamente, co-produtos, que saberíamos, quereríamos e conseguiríamos utilizar. Será esse o problema que iremos seguidamente analisar.

3

Recordando alguns pontos da história da ciência nos séculos XIX e XX

Se considerarmos o Universo no seu todo, verificaremos que, mais de 99% da matéria que o constitui se encontra no estado de Plasma (estado típico da matéria a altas temperaturas), sendo o remanescente constituído pelos três estados clássicos da Matéria que nos rodeiam: o estado sólido, o estado líquido e o estado gasoso não ionizado. O Plasma é constituído, como sabemos, por partículas carregadas electricamente, facto que lhe confere propriedades físicas que os gases não ionizados

não possuem, tornando o seu comportamento, naturalmente diferente, e sempre muito mais complexo que o dos gases usuais. Estamos perante um meio constituído como que por dois fluidos, um com carga positiva e outro com carga negativa, com densidades semelhantes, formando um todo, cuja neutralidade eléctrica média é daquele modo assegurada.

A mais importante massa de Plasma existente na vizinhança da Terra será logicamente o Sol, seguindo-se-lhe o conjunto de estrelas e galáxias que, sob a forma de um Plasma, em geral de baixa densidade, preenchem o espaço sideral. De entre os efeitos conhecidos e visíveis do Plasma, importa realçar as suas interações com os campos magnéticos que nos rodeiam, de que são exemplos as auroras boreais, as cinturas de radiação de Van Allen, o vento solar e as distorções, por vezes importantes, verificadas no campo magnético da Terra.

Na atmosfera terrestre, gera-se igualmente um estado de Plasma, quando se verifica a descarga de um relâmpago durante uma tempestade, ou, quando é produzida uma descarga eléctrica num tubo contendo um gás rarefeito.

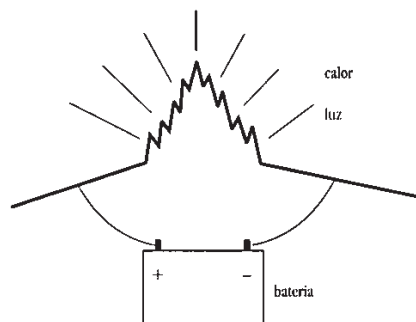
Existe, para além disso, a possibilidade de utilizar a Física dos Plasmas para recriar condições de pressão e temperatura elevadas, aplicáveis quer à produção de energia, pela fusão termonuclear controlada (a que agora nos não referiremos), quer, à geração de Plasmas de baixa densidade, em condições térmicas da ordem dos 10000-12000°C, utilizáveis como fontes de calor. Ora, tais condições serão suficientes para o tratamento térmico de resíduos, em reactores fechados, podendo recuperar-se parte da energia libertada a partir da Matéria, assim convertida em Energia. Por isso, termos de valorizar energeticamente os gases produzidos no decurso do processo de fusão, controlando-os e purificando as emissões, de modo a evitar processos e situações poluidoras indesejáveis.

O uso na prática de Plasmas, aplicando estes princípios, é desde há muito aplicado. Com efeito, Sir Humphrey Davy, já em 1804, recorreu à formação de um estado de Plasma, para converter a energia eléctrica, produzida numa bateria, em calor e luz (Camacho, 1995). Pouco tempo depois da descoberta do arco voltaico, Davy ligando dois pedaços de chumbo a uma bateria, dispondo-os de tal modo que entrassem em contacto, conseguiu, deste modo, realizar uma descarga em arco, criando um estado de plasma. Uma vez gerada a descarga em arco, os eléctrodos foram colocados de modo a conseguir manter-se o processo de forma continuada, sob a forma de uma coluna estabilizada, sendo a energia do arco voltaico convertida em luz e calor (Figura 1).

A aplicação deste princípio à construção das primeiras tochas de plasma industriais foi efectuada em unidades metalúrgicas, cerca de 1880. Uma tal situação foi obtida, efectuando a descarga de uma corrente eléctrica intensa, através de um gás rarefeito, de modo a formar-se uma chama cuja temperatura atingia 8000°C,

temperatura essa mais elevada que a de qualquer outra fonte térmica existente na altura (Siemens, 1887).

Figura 1
Criação de uma descarga de plasma em arco



No início do século xx, Schoenherr, na Alemanha (1909) construiu, de acordo com estes mesmos princípios, tochas para a produção de acetileno, que, desde então, continuaram a ser utilizadas. Na Noruega, Birkeland (1906) construiu uma tocha térmica, utilizada na tecnologia do Azoto, que foi depois abandonada. Estas duas tochas eram do tipo que seguidamente denominaremos de eléctrodos ocos.

No final dos anos 60, o uso de tochas tornou-se generalizado em todo o Mundo, em especial sob a forma do tipo de eléctrodo sólido de Gage (1968).

Paralelamente, um outro problema surgiu, no qual era essencial a geração e controlo de temperaturas muito elevadas. Referimo-nos aos programas espaciais da NASA e à necessidade de defender os astronautas das elevadas temperaturas que se desenvolvem, numa qualquer nave espacial, quando esta reentra na atmosfera terrestre, a alta velocidade. A solução inicial proposta, baseava-se na aplicação de um escudo, constituído por um material que entrava em ignição, devido ao atrito, quando a nave mergulhava na atmosfera. Esta ignição dissipava muita da energia térmica libertada, o que tinha como consequência que a temperatura no interior da cabina não ultrapassava cerca de 27°C, mesmo quando as temperaturas exteriores atingiam mais de 1000°C (caso das cápsulas Mercúrio e Gémeos, orbitando em torno da Terra), ou mais de 2750°C, como se verificou quando o módulo de comando das Naves Apolo regressava à Terra, depois de completar a Missão lunar, de que estava encarregada.

Ao desenvolver o escudo térmico inicial do Projecto Mercúrio, e, em especial, ao tentar melhorá-lo para as Naves Apolo, a NASA deparou-se com o problema de ser necessário ensaiar na Terra os materiais, que iriam ser submetidos ao choque térmico, durante a Missão espacial. Era, para tal, necessário gerar temperaturas da ordem dos 5000°C e superiores.

Reuniu-se para este efeito no *Ames Research Center*, uma equipa, encarregada de desenvolver um simulador do aquecimento verificado durante a reentrada das naves na atmosfera terrestre. A solução a que se chegou, depois de ensaios exaustivos, foi baseada no desenvolvimento de tecnologias de plasma. Uma corrente eléctrica de intensidade elevada, passando através de um gás rarefeito, criava um estado de plasma, ionizando esse gás, e produzindo uma chama de temperatura elevadíssima (superior a 11000°C).

Com o apoio de algumas indústrias, a NASA construiu modernos sistemas de aquecimento, por meio de descargas efectuadas em estado de plasma (tochas térmicas), que permitiram, no laboratório, submeter os materiais dos escudos de protecção, a temperaturas superiores às que previsivelmente teriam de suportar ao reentrar na atmosfera terrestre. Contribuindo, assim, para o êxito dos voos espaciais tripulados. Não tendo inventado as tochas de plasma foi, contudo, o interesse demonstrado pela NASA no seu desenvolvimento, que permitiu a produção, nos anos 70 e 80, de tochas de plasma, com aplicações múltiplas.

Em meados dos anos 70, a hipótese do recurso às tecnologias de plasma térmico, como processo de tratamento de resíduos, começou a emergir, ao mesmo tempo que era também considerado o seu uso na recuperação de recursos de diversos tipos, também mediante processos térmicos. O interesse demonstrado por diversas Universidades, Institutos de Investigação, Indústrias e Organismos Estatais, no desenvolvimento de tecnologias de aplicação do plasma, ao processamento e tratamento de resíduos perigosos e outros, não parou de crescer. Este desenvolvimento verificou-se nos EUA, no Japão, em França, na Holanda, Alemanha e Reino Unido, se bem que o número de instalações industriais não tenha aumentado ao mesmo ritmo.

Essa situação conduziu à multiplicação do número dos aterros e incineradoras construídos. A divulgação destes sistemas cresceu muito rapidamente, por razões ligadas aos menores investimentos iniciais, aos menores custos de manutenção e à menor consciência, que então havia (e que hoje ainda perdura), dos riscos e obrigações ambientais envolvidas na gestão e tratamento desses resíduos.

De entre os exemplos de realizações, verificadas na área do recurso à tecnologia do plasma no tratamento/eliminação de resíduos específicos, poderemos referir os seguintes:

- Vitrificação de resíduos nucleares efectuada pelo Departamento de Energia do Governo dos USA;
- Criação pela *Environmental Protection Agency* (EPA) de um laboratório de investigação dedicado à tecnologia do plasma térmico;
- Destruição de armamento e munições tornados obsoletos ou exigindo destruição, por parte do *US Army Defense Ammunition Centre*;
- Destruição de resíduos perigosos gerados nas bases e navios da armada norte americana;

0 paradigma/paradoxo...

- e) Destruição de RSU's no Japão, onde nalgumas ilhas, a exiguidade de espaços disponíveis obriga à adopção de soluções deste tipo;
- f) Destruição de resíduos e materiais contaminados por PCB's e outros produtos organo-clorados no Canadá;
- g) Destruição de resíduos perigosos variados (resíduos radioactivos de baixa-média radioactividade, óleos e lamas contaminadas, resíduos hospitalares), realizada em Muttentz, na Suíça (Counts *et al.*, 1999).

Mais recentemente, são de citar as aplicações de tochas térmicas no tratamento de solos contaminados com diversos poluentes, e ao seu uso na vitrificação de solos, no sentido de estabilizar encostas, controlar aluimentos, ou reforçar a estabilidade de zonas de construção submetidas a esforços significativos.

4 Tôchas térmicas

As tochas térmicas, hoje em dia utilizadas, são, portanto, um dos resultados efectivos das tecnologias aeroespaciais desenvolvidas pela NASA, nos anos 70, e constituídas essencialmente por sistemas de conversão de energia eléctrica em energia térmica, pela criação de um estado de Plasma e aproveitamento das suas características específicas.

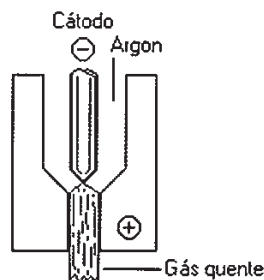
Existindo embora diversos tipos de tochas térmicas, a construção de um sistema estável, apresentando estas características, implica a co-existência das três componentes seguintes:

- a) Uma fonte de energia eléctrica autónoma com um circuito capaz de produzir e manter uma descarga no estado de plasma, com o nível energético desejado;
- b) Uma fonte de plasma gasoso, ou de gases, que podem ser diversos. Em geral utilizam-se gases simples, mono ou diatómicos, tais como o hélio, o argon ou o azoto. Pode ainda recorrer-se, em determinadas condições, a gases mais complexos, como o benzeno, o etileno ou o hexafluoreto de enxofre;
- c) Uma estrutura adequada que inclua a instalação de um eléctrodo, comumente designado como tocha de plasma.

O resultado será, pois, traduzido na construção de um tubo em aço inoxidável, de comprimento e diâmetro variáveis, que recebe energia eléctrica, água de arrefecimento (destinada a controlar a temperatura do sistema) e uma pequena quantidade de gás, cujo fluxo entra por uma das extremidades do tubo, e que vai gerar, na outra extremidade, um arco de plasma, em chama. Esta chama constitui uma fonte de calor muito intensa (pode atingir 20000°C), libertando uma radiação UV, da ordem de 8-9% do total, como se pode observar na Figura 2. A com-

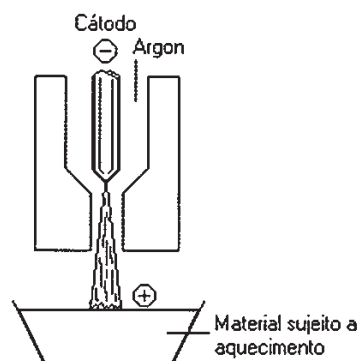
paração das Figuras 1 e 2, mostra bem a similitude dos sistemas usados nos dois casos.

Figura 2
Arco não transferível



Uma versão mais moderna do sistema é apresentada na Figura 3, que reproduz a configuração do sistema patenteado em 1972, pelo Prof. Salvador Camacho. Este sistema é designado Tocha de Plasma de polaridade invertida, na qual é evidenciada a presença de um Anodo (+), de um colimador, do gerador de um vórtice gasoso situado entre ambos e ainda de uma ligação externa a um Cátodo, que poderá ser constituído por metal em fusão, ou por material refractário.

Figura 3
Arco transferível



A formação e estabilização do arco implica a existência desses pontos fixos, os eléctrodos, mesmo que a respectiva polaridade possa ser permanentemente invertida no decurso do processo de descarga.

A existência de um fluxo de gás é indispensável, na medida em que é da sua ionização que resulta a formação do plasma. A maior parte do gás é utilizado na estabilização da coluna do arco e apenas 1%, ou

menos, é convertido em plasma. A estabilização ocorre no centro do eléctrodo oco instalado, sendo a situação aí gerada afectada pela dinâmica do fluxo gasoso atrás referido. Com efeito, o resultado vai depender do tipo de gás queimado, das temperaturas geradas no sistema e da deslocação de partículas, gerando-se um gradiente de voltagem ao longo da coluna.

Dois tipos de sistemas podem ser instalados neste tipo de arcos de plasma, designados como transferíveis e não transferíveis, respectivamente.

Os arcos não transferíveis contêm na própria tocha os dois eléctrodos, podendo o seu funcionamento ser iniciado por uma das estratégias seguintes:

- 1) Instalando um eléctrodo temporário que será depois eliminado, juntamente com um dos outros eléctrodos;
- 2) Os eléctrodos serem alimentados simultaneamente, induzindo-se a formação de um gás com reduzida ionização, pela descarga de um potencial de cerca de 1000 volts. Uma vez iniciada a formação do arco, os dois eléctrodos são separados;
- 3) Efectuando um arranque a elevada frequência, de modo a induzir a formação do plasma, depois do que o circuito instalado é suficiente para permitir a transição dessa fase para a situação de tocha de plasma instalada no eléctrodo.

A pluma (de plasma e de ar quente) é injectada pela extremidade da tocha, que se encontra assim em estado operacional. Este tipo de solução foi adoptada com êxito, por exemplo, em reactores dedicados à produção e síntese de produtos químicos, à recuperação de metais e ao seu corte, ao processamento de produtos orgânicos e nos ensaios de escudos térmicos efectuados pela NASA, nos anos 70.

O modelo de arco transferível contém apenas um dos eléctrodos na tocha, localizando-se o outro no material a processar. Uma vez iniciada a formação do arco numa superfície condutora adequada, a tocha é posicionada sobre o material que vai ser sujeito a tratamento. Quando o material funde, torna-se electricamente condutor, podendo a tocha ser deslocada da posição inicial. Uma vez estabelecido e estabilizado o banho, o material a transformar é adicionado, recorrendo-se ao sistema de alimentação existente.

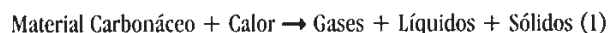
Este sistema funciona bem em actividades metalúrgicas diversas, no fabrico de aço, na vitrificação de resíduos variados e em qualquer outro processo que implique a necessidade de existência de uma fonte significativa de calor. Em princípio, o eléctrodo situado na tocha poderá ser quer o cátodo, quer o ânodo. Contudo, importa ter em conta que a taxa de erosão do cátodo é, em regra, 100 vezes superior à do ânodo, pelo que é mais lógico instalar este na tocha e usar como cátodo o material a tratar.

5

Processo de Pirólise recorrendo à formação de plasma, com vitrificação

O processo de Pirólise recorrendo à formação de plasma com vitrificação, é um processo de reacção pelo qual, simultaneamente, os materiais orgânicos são convertidos em gases, com poder calorífico recuperável industrialmente, e os materiais inorgânicos são fundidos, sofrendo um processo de vitrificação. Para que estes processos possam ocorrer simultaneamente, é essencial a presença de uma fonte térmica constituída por uma massa reduzida, mas dotada de elevada entalpia e proceder à adição de vapor.

A Pirólise constitui, como é sabido, um processo de decomposição térmica, em que um determinado material carbonáceo, sólido, é transformado em gases, líquidos e sólidos, de acordo com a equação genérica seguinte:



Se a fonte de calor não for deficiente em oxigénio, verifica-se a combustão do material carbonáceo, libertando-se uma elevada quantidade de calor e reduzindo-se significativamente o valor calórico dos gases de pirólise formados. Uma fracção do material carbonáceo pode transformar-se em combustível líquido, em especial quando a temperatura não atingir valores muito acima dos 400° C.

A temperatura de pirólise, a taxa de aquecimento aplicada e a composição do material sujeito ao tratamento, determinarão, conjuntamente, a constituição do gás de pirólise produzido no processo.

As proporções relativas de produtos formados, nos vários estados físicos, dependerão, em grande parte, da fonte de calor utilizada e dos constituintes químicos do produto tratado. Assim, por exemplo, se a pirólise for efectuada recorrendo à formação do estado de plasma, ou seja, em condições elevadas de temperatura e pressão, a fase líquida é eliminada, e a equação global assume a forma seguinte:



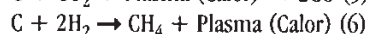
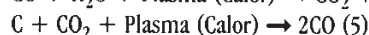
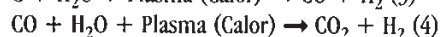
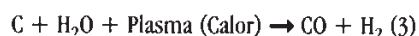
De acordo com as equações anteriores, qualquer produto, contendo compostos orgânicos, é conversível em gases de pirólise e numa mistura de metais e de vidro refractário, pela chama de gases ionizados, cuja temperatura atinge de 4000 a 7000°C.

Durante a pirólise, as elevadas temperaturas do plasma incandescente, conduzem à destruição das moléculas mais complexas presentes. A sua destruição conduz à formação aleatória de fragmentos que podem rearranjar-se noutros produtos, diferentes dos originais.

Quando a temperatura é mais reduzida, podem formar-se produtos líquidos. De qualquer modo, formam-se sempre cinzas, que podem fundir conjuntamente e depositar-se no reactor.

Quando a temperatura é optimizada, e é feita uma injeção de vapor na zona de temperatura mais elevada, os compostos formados, a partir de substâncias carbonáceas, serão, provavelmente, metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), hidrogénio (H_2), dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O).

Nesse caso é completamente eliminada a formação de hidrocarbonetos líquidos e as reacções primárias observadas serão as seguintes:



A equação (3) é endotérmica, convertendo o Carbono em Monóxido de Carbono, na presença de H_2O . A reacção (4) é uma reacção de transferência, que é favorecida apenas a temperaturas reduzidas, quando o CO_2 é estável. Às elevadas temperaturas do plasma, o CO_2 reage com o Carbono, segundo a equação (5), de modo a formar-se Monóxido de Carbono, que é mais estável a altas temperaturas, tais como as que se verificam no Plasma.

A formação de Metano (Equação 6) só é favorecida a temperaturas até cerca de 400 °C. Para temperaturas mais elevadas, a formação do Metano é menos favorecida, ao passo que, nessas condições, o Hidrogénio e o Monóxido de Carbono apresentam grande estabilidade. Verifica-se, portanto, face à estabilidade destes gases, uma grande instabilidade não só do metano como também do Dióxido de Carbono e do vapor de Água. O equilíbrio observado depende não só da temperatura como também da pressão verificada no reactor.

A título exemplificativo, poderemos apresentar resultados obtidos por Gollands *et al.* (1987), relativos a ensaios efectuados num dos laboratórios da EPA, nos quais se procedeu à destruição, em reactores de Pirólise com formação de Plasma, de diversos produtos organo-clorados.

Assim, no caso da destruição de tetracloreto de carbono, num ensaio efectuado pela EPA (conjuntamente com o *New York State Department of Environmental Conservation*), verificou-se que os gases libertados haviam sido os seguintes: O_2 , CO , CO_2 , HCl , NO_x e CCl_4 .

No caso da destruição de PCB's pelo sistema, os gases libertados foram o O_2 , CO_2 , CO , NO_x , HCl , materiais particulados voláteis, VOC's, PCDD's e PCDF's, PCB's e TCB's.

Apresentaremos, posteriormente, os resultados de alguns outros ensaios reais disponíveis na literatura existente, mas importa chamar a atenção, neste momento, para alguns pontos essenciais:

a) Os produtos orgânicos presentes são destruídos e oxidados a formas de valência máxima e perigosidade mínima;

- b) Os gases residuais podem ser reutilizados para fins de valorização energética, economicamente interessantes, e/ou em qualquer caso submetidos a tratamentos de depuração de eficiência reconhecida;
- c) Os resíduos sólidos apresentam-se vitrificados, tendo sido verificada a sua muito reduzida lixiviabilidade;
- a) Não foram detectados vestígios de resíduos.

6

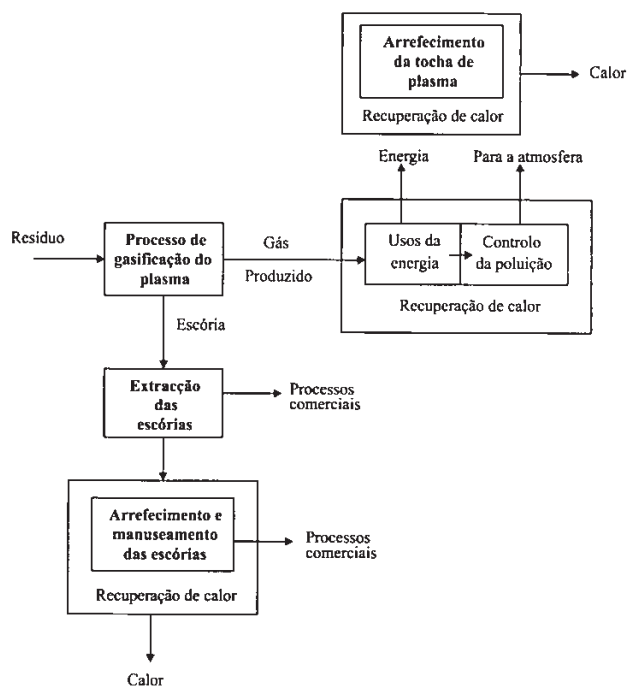
Alguns resultados experimentais

Sabendo embora do significado específico que os resultados a seguir referidos têm, considera-se, contudo, pertinente a sua apresentação, pela consistência das conclusões que eles indicam.

Os materiais, submetidos ao processo referido, que comercialmente é designado por PPV, são hoje em dia muito variados, o que se traduz na diversidade de resultados disponíveis.

O diagrama fabril do sistema de PPV, pode ser traduzido pelo esquema da Figura 4, de Carter e Tsangaris (1995), tendo sido utilizado na pirólise de RSU's, recorrendo a uma tocha instalada na empresa RCL, em Ontário, Canadá.

Figura 4
Diagrama fabril do sistema de PPV, instalado na RCT, Ontário, Canadá (Carter e Tsangaris, 1995)



Alguns dos valores de massas e energia que se verificam no processo, estão por sua vez esquematizado na Figura 5, com a mesma origem. As características operacionais do gasificador da empresa RCL são indicadas na mesma figura, sendo de destacar a eficiência global do processo, que foi de 72,2%.

A produção de gases representou uma recuperação calórica potencial da ordem de 10,51 MJ por metro cúbico, medido em condições normais de pressão e temperatura. O volume dos RSU's foi reduzido (184:1), tal como o seu peso em relação ao resíduo seco (5,73:1). O rendimento foi da ordem de 612 KWh por tonelada de RSU's tratada.

A composição média do gás produzido consta do Quadro 1, verificando-se a sua qualidade, que poderia ser ainda melhorada de acordo com a qualidade e eficiência dos sistemas de depuração instalados. Concretamente, os níveis de dioxinas e furanos estão abaixo dos limites fixados pela legislação da EPA ou da UE, como seria de esperar, face às temperaturas a que os RSU's foram sujeitos.

A composição química das escórias produzidas constam do Quadro 2. Trata-se de um material denso, aparentemente inerte e com riscos de lixiviação limitados, cujo depósito em aterro (ou reutilização em pavimentos ou misturado com cimento) parece viável.

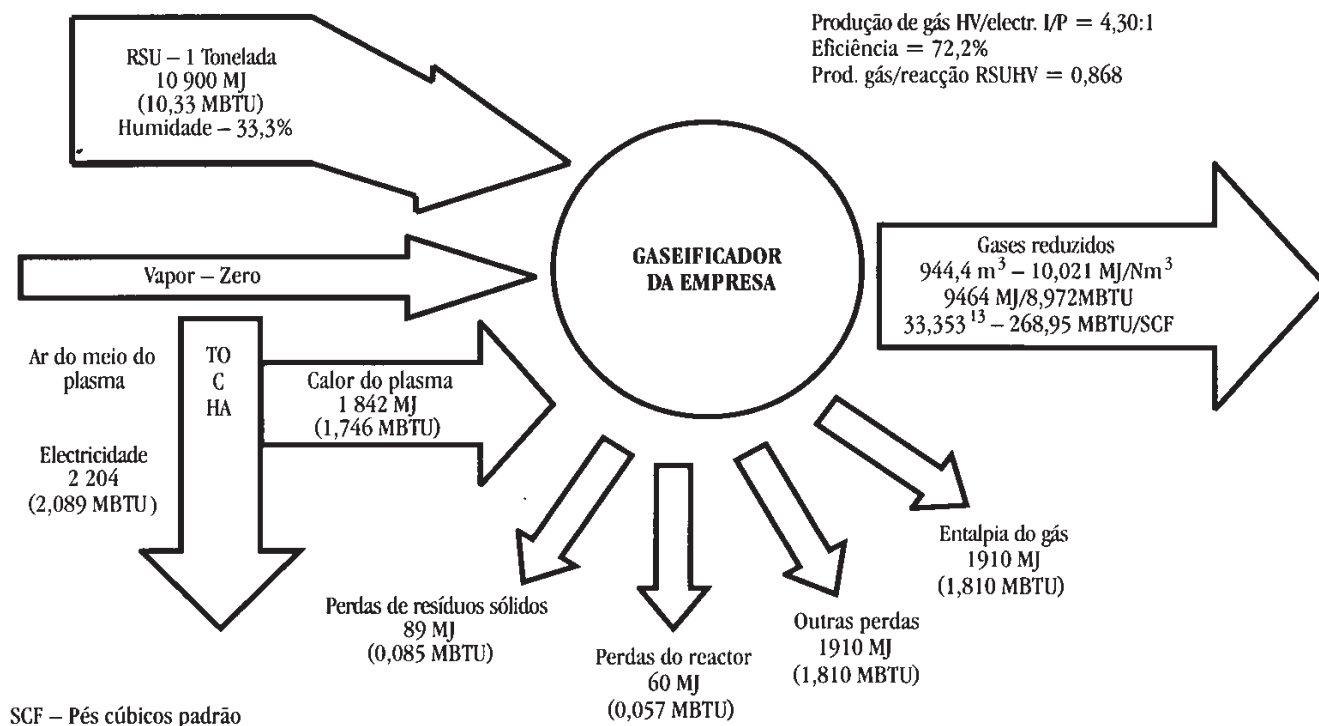
Foram efectuadas análises rigorosas, comparando as emissões gasosas libertadas nos ensaios efectuados naquela unidade com as de um incinerador tradicional próximo. Os valores obtidos constam do Quadro 3, no qual são apresentados, separadamente, dados respeitantes às concentrações e toxicidade de alguns poluentes gasosos, de alguns metais pesados e de alguns gases ácidos. As diferenças são tão evidentes que nos dispensamos de outros comentários, demonstrada que fica a superioridade aparente do processo PPV.

Tal como em relação às emissões gasosas, resumem-se no Quadro 4 dados referentes às concentrações de diversos metais nos lixiviados obtidos das escórias produzidas, bem como noutros materiais provenientes de resíduos perigosos, provenientes de unidades fabris do Estado de Ontário e do aterro sanitário de Quebec. Tal como no caso anterior, as concentrações de poluentes detectadas são extremamente reduzidas.

Pode assim concluir-se que, os impactes ambientais decorrentes deste tipo de tratamento, são, tanto quanto é possível avaliar, muito reduzidos e inferiores aos decorrentes de uma incineração efectuada de acordo com as condições de operação usuais (Ver ponto 8).

Também nas instalações do Instituto de Investigação Tecnológica da Geórgia, em Atlanta, foram efectuados diversos ensaios de tratamento

Figura 5
Alguns valores de massas e energia envolvidos na pirólise de RSU's



0 paradigma/paradoxo...

de RSU's, recorrendo a uma tocha de plasma de 100 kW. A redução do peso dos resíduos, após pirólise pelo sistema PPV, variou entre 60 e 84%, em relação ao inicial. A redução de volume foi variável entre 89 e 96 %. Os resíduos vitrificados foram submetidos a ensaios de lixiviação, verificando-se, em todos os casos, que os teores dos metais pesados analisados apresentavam concentrações inferiores aos limites de detecção da metodologia analítica utilizada. Como única excepção, uma das amostras apresentou teores de Bário da ordem de 0,47 mg/l, ou seja, valores mais de 100 vezes inferiores aos limites fixados pela EPA. Logo, também neste caso, em condições de rigor analítico e técnico eventualmente mais rigorosas, as conclusões são semelhantes do ponto de vista dos riscos ecotoxicológicos existentes.

Como valores médios indicativos para este tipo de resíduos (apesar da sua variabilidade, espacial e temporal), podem apresentar-se os seguintes valores médios:

- 1) Por cada 1000 Kg de RSU's, com um valor energético variável entre 2200 e 2400 kWh, podem obter-se 170 m³ de metanol, com um valor energético de cerca de 2900 kWh, quando misturado, por exemplo, com gás natural; alternativamente, pode dispôr-se de uma mistura de gases combustíveis, constituída por 45% de Hidrogénio, 35% de CO, 7% de Azoto, 10% de CO₂ e ainda por 3% de outros produtos gasosos, utilizável para a produção de energia;
- 2) O resíduo sólido obtido corresponde a 188 Kg de material vitrificado, semelhante à obsidiana e cujos riscos ecotoxicológicos são inferiores aos limiares de risco actualmente considerados (Lapa *et al*, 2000)

Independentemente dos resultados obtidos, parece contudo evidente que, excepto quando se verifique uma situação limitante decorrente de economia de espaço (como poderá ser o caso do Japão ou outro semelhante), ou por uma situação de necessidade energética inadiável (atendendo à produção líquida de energia que se verifica no processo), não parece justificável, numa perspectiva sustentada e realista de Gestão do Ambiente, recorrer-se a um sistema mais dispendioso, em termos de instalação inicial e de exigências técnico-científicas de manutenção, como o processo PPV, para tratar resíduos valorizáveis por processos clássicos, bem dominados, como os que estão à nossa disposição no caso dos RSU's. Como é evidente, esta situação poderá vir a modificar-se, especialmente numa visão de valorização energética dos resíduos, que não considerámos na análise agora apresentada, em que se pretende demonstrar a sua viabilidade técnico-científica.

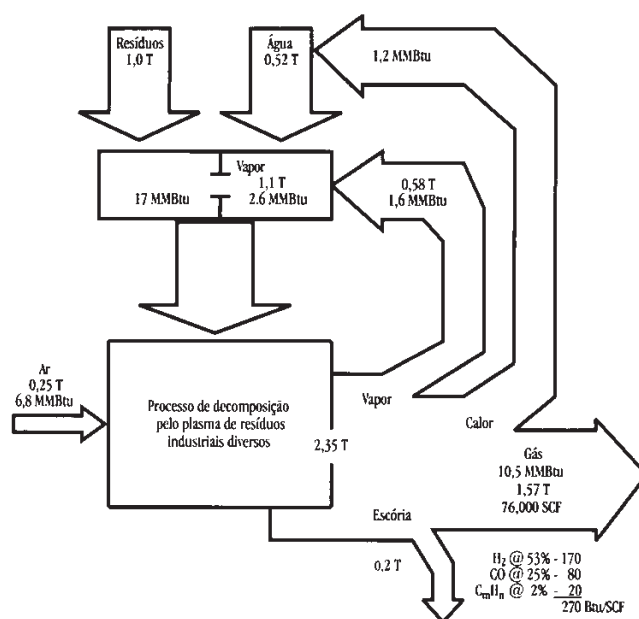
Uma das vantagens, potencialmente mais promissoras, em termos de um controlo ambiental tão completo quanto possível, da tecnologia PPV é, como justamente refere Camacho (1995), o reduzido volume de ar a que nele se recorre, quando comparado com os volumes envolvidos numa combustão normal (no caso do PPV usa-se apenas 5% do volume de ar consumido na incineração). Esta situação é especialmente

interessante quando se tomam na devida conta os custos e as dificuldades decorrentes do tratamento que é necessário efectuar ao ar, contaminado pelas emissões retidas no reactor, após plasmólise. Os benefícios ambientais, técnicos e económicos daí decorrentes, são evidentes.

No trabalho atrás citado, descreve-se o tratamento conjunto efectuado sobre uma mistura de resíduos, compreendendo RSU's de duas origens diferentes, pneus usados e duas amostras distintas de carvão. As características dos resíduos estão sumarizadas no Quadro 5, onde são igualmente referidos os respectivos poderes calóricos.

Os valores de massa e de energia determinados na unidade utilizada, são sumarizados na Figura 6, onde se indica também a composição média dos gases formados no reactor.

Figura 6
Valores de massa e energia determinados no tratamento conjunto de diversos resíduos pelo processo PPV



Outro dos tipos de materiais, a cuja eliminação tem sido aplicado o sistema de tochas de plasma, são os resíduos bio-médicos, aos quais se aplicou o mesmo sistema apresentado na Figura 4. A mistura de produtos e resíduos, com a qual os ensaios a seguir indicados foram efectuados, consta do Quadro 6. A relação energética estabelecida foi de 3:1, com uma eficiência global de 73%. Os gases formados tinham um poder calórico de 10,06 MJ por m³, verificando-se uma redução de volume de 400:1 e de peso de 8,5:1, entre os resíduos originais e os

resíduos tratados. O consumo energético foi de 1980 kWh por tonelada e a composição dos gases formados consta do Quadro 7. A constituição química das escórias consta do Quadro 8.

As emissões gasosas foram analisadas, de modo a identificar constituintes com características tóxicas. Como se pode ver no Quadro 9, os teores dos poluentes gerados nas tochas de plasma são várias ordens de grandeza inferiores aos valores correspondentes de incineradoras clássicas, respeitando largamente os padrões fixados pelo Canadá, usados aqui como referência. O caso das partículas, onde os valores são mais próximos daqueles limites, poderia ser facilmente resolvido, pela aplicação de tecnologias hoje usuais, de tratamento de gases.

As escórias obtidas foram submetidas a um processo de lixiviação, obtendo-se os resultados que se apresentam no Quadro 10. A comparação com os valores limite, fixados pela EPA, demonstram bem a eficiência do processo de vitrificação, na limitação de arrastes por via hídrica.

A descontaminação destes resíduos verifica-se, aliás, não só a nível químico mas também biológico, como se pode verificar pelo exame dos dados que constam do Quadro 11. O material vitrificado foi pulverizado com uma suspensão de esporos da bactéria *Bacillus stearothermophilus*, recolhendo-se amostras imediatamente a seguir. A análise do número de bactérias que se detectaram nestas amostras constam, do Quadro 11, sendo evidente o reduzido número dos organismos sobreviventes. Como é óbvio tratou-se de um ensaio não obedecendo a condições de normalização prévia, pelo que o seu significado será apenas indicativo, não substituindo ensaios ecotoxicológicos que conviria efectivar, de acordo com as metodologias aprovadas.

Outro dos resíduos, a cujo tratamento tem vindo a ser aplicado o sistema da tocha de plasma, são as cinzas provenientes de diversos tipos de processos térmicos, situação essa já referida num dos casos experimentais atrás citados.

O quantitativo de cinzas produzidas anualmente, representa alguns milhões de toneladas e, com excepção de uma fracção (considerável) valorizada como aditivo de cimentos e de asfaltos, a maior parte era depositada em aterro. Esta solução foi prejudicada pelo facto da Directiva dos Aterros, publicada em 1999, ter inviabilizado essa prática. Actualmente, com excepção da inertização, resta a possibilidade da vitrificação, que permite obter um subproduto de valor não discipiendo.

Na Área Metropolitana de Bordéus foi instalada uma tocha destinada a vitrificar conjuntamente cinzas de fundo de incineradoras de RSUs e cinzas volantes da mesma origem. Esses vitrificados foram submetidos a processos de lixiviação, de acordo com a norma AFNOR, verificando-se, pela análise dos valores do Quadro 12, que os valores obtidos respeitam quer as normas norte-americanas quer as normas francesas. Amostras desse tipo foram igualmente incluídas em ensaios ecotoxicológicos efectuados na FCT/UNL, concluindo-se pela situação de toxicidade inferior aos níveis mais reduzidos usualmente considerados (Quadros 13, 14 e 15).

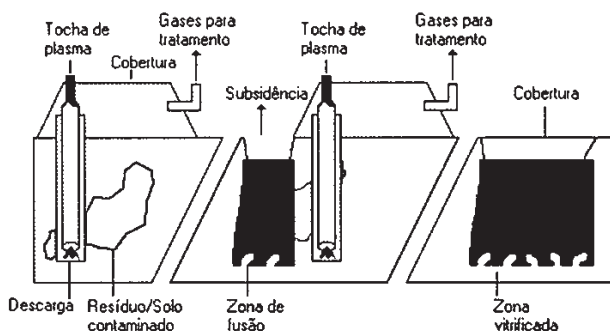
7

Uso do sistema PPV no tratamento e consolidação de solos

Nos últimos anos, tem vindo a desenvolver-se o uso de tochas de plasma no tratamento de solos poluídos e também na modificação de características geológicas de solos que de tal necessitam, utilizando para tal as possibilidades da vitrificação. O processo tem vindo a ser aplicado a solos contaminados com produtos químicos industriais tóxicos, ou com resíduos apresentando níveis reduzidos de radioactividade. O processo reduz o volume desses resíduos e a sua perigosidade, por força das reacções verificadas com outros materiais presentes. Esta possibilidade do uso das tochas de plasma, tem sido aplicada quando estão presentes nos solos misturas de resíduos tóxicos diversos, cinzas de origens várias, ou quando nos encontramos perante o caso de aterros sanitários que importa recuperar.

A situação a que nos referimos pode ser representada pelo esquema da Figura 7, reproduzida de um documento da PTC, Plasma Technology Corporation. A importância do tipo de solo nos resultados obtidos por esta tecnologia pode ser sumariado pela Figura 8 (Circeo, 1994).

Figura 7
Esquema de tratamento, pelo sistema PPV, de solos contaminados (PTC)



Um dos métodos que tem sido aplicado, no caso dos solos contaminados, foi denominado comercialmente de PRISM (Plasma Remediation of In-situ Materials). Baseia-se na estabilização dos resíduos no local onde estão depositados, através da sua fusão e subsequente solidificação. Este processo recorre a uma tocha de plasma instalada numa abertura ou num túnel, situados a uma distância reduzida do local a tratar e a uma profundidade conveniente, em relação a esses resíduos. Com o aumento da temperatura da tocha, vai-se verificando uma fusão dos materiais próximos, sob a forma de uma zona cilíndrica de diâmetro constante, formada a partir do foco térmico inicial.

O volume de solo fundido é da ordem de 10 a 20 toneladas por hora. Quando a zona contaminada é extensa, podem efectuar-se

processos de fusão contíguos. Uma vez aberta uma cavidade no solo, instala-se nela uma tocha do tipo não transferível. A chama de plasma, desenvolvendo uma temperatura de cerca de 4000°C, vai alargando o diâmetro da zona tratada. Ao solidificar, a zona vitrifica, constituindo-se como que uma fornalha onde os resíduos são aquecidos, pirolizados e vitrificados. Uma vez terminado o processo, o solo não contaminado pode ser deslocado, no sentido de cobrir a área tratada.

A conversão dos contaminantes e do material geológico contíguo em material vitrificado, com comportamento semelhante ao de uma rocha, é muito conveniente, do ponto de vista da sua estabilidade e consciência. A possibilidade de uma qualquer tecnologia, desencadear reacções contrárias, por parte das populações vizinhas, pode conduzir a tratamentos deste tipo *ex-situ*.

A vitrificação de resíduos, recorrendo a este tipo de procedimento, tem sido utilizado pelo Prof. Circeo na recuperação de aterros sanitários, reduzindo o volume do material aí depositado (com eventual prolongamento da sua vida útil) e minimizando riscos de contaminação de toa-lhas freáticas, pelo controlo da infiltração.

Uma outra hipótese ensaiada tem sido o recurso à vitrificação de solos para estabilizar fundações em terrenos cuja estabilidade seja infe-

rior ao necessário, ou de modo a evitar eventuais situações de colapso em zonas declivosas, em arribas litorais ou noutras situações seme-lhantes. O recurso a tochas transportáveis tem sido uma das opções a que na prática se tem recorrido, para aumentar as possibilidades de actuação e para flexibilizar este tipo de actuações.

8

Comparação entre sistema de fusão pelo plasma e incineração

A comparação entre o Sistema que se designa comercialmente por PPV (Pirólise por formação de Plasma, com vitrificação) e os sistemas correntes de Incineração, esteve de certo modo presente ao longo de todo o texto e foi mesmo especificamente referido nalguns pontos. Dada a controvérsia estabelecida, em muitas circunstâncias e locais, a quan-do de uma eventual escolha entre estes dois tipos de tratamento térmi-co e dos respectivos custos ambientais, considerou-se útil incluir um ponto, dedicado à sua análise específica.

A comparação entre estes dois processos poderá ser efectuada com base nos seguintes pontos concretos:

Figura 8

Tratabilidade de locais contaminados, em função do tipo de solo e dos poluentes presentes (Circeo, 1994). Nível (E) elevado/nível (R) reduzido de volatilidade, reactividade ou solubilidade; Classes de Contaminantes: A (EER) (exemplos: hidrocarbonetos, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno); B (ERR) (exemplos: tricloroetano, tricloroetileno e tetracloroetileno); C (EEE) (exemplo: acetona); D (REE) (exemplos: fenóis e glicóis); E (ERE) (exemplos: éteres metilbutilados, álcool butílico e cloreto de metileno); F (RER) (exemplos: naftaleno, PAHs e ftalatos); G (RRE) (exemplos: misturas inorgânicas e metais de diferentes origens); H (RRR) (exemplos: PCBs, pesticidas e PAHs de elevado peso molecular)

		Facilidade de tratamento							
Propriedades dos contaminantes	Textura do solo	A	B	C	D	E	F	G	H
		E volatilidade E reactividade R solubilidade	E volatilidade R reactividade R solubilidade	E volatilidade E reactividade E solubilidade	R volatilidade E reactividade E solubilidade	E volatilidade R reactividade E solubilidade	R volatilidade E reactividade R solubilidade	R volatilidade R reactividade E solubilidade	R volatilidade R reactividade R solubilidade
	Solos escavados								
	Grosseiros/médios não saturados								
	Finos não saturados								
	Grosseiros/médios saturados								
	Finos saturados								
	Heterogêneos não saturados								
	Heterogêneos saturados								
	Argilosos/complexos								

Facilidade de tratamento

Categoria I Facilmente tratados Controlo mínimo

Categoria II Tratamento de dificuldade moderada Controlo moderado

Categoria III Difíceis de tratar Controlo rigoroso

Categoria IV Muito difíceis de tratar Controlo essencial

- 1) Tratando-se embora de dois processos distintos de tratamento térmico, a incineração tem por base a combustão dos materiais, enquanto que o Sistema PPV se baseia na Pirólise (combustão em ausência de ar, em reactor fechado), completada com a vitrificação dos resíduos finais a temperaturas muito elevadas, ou seja, entre 4000 e 7000°C;
- 2) O Sistema PPV pode ser aplicado a qualquer tipo de resíduos, o que não é rigosamente verdade no que respeita aos sistemas de incineração, cuja aplicabilidade é condicionada pela natureza e importância das emissões gasosas produzidas, algumas das quais podendo gerar situações de desrespeito das normas ambientais em vigor;
- 3) O volume de ar envolvido na Incineração representa, quando comparado com o volume envolvido no Sistema PPV, um valor entre 20 a 50 vezes superior, o que reduz, de forma muito substancial, os volumes a tratar;
- 4) A incineração liberta inevitavelmente emissões gasosas importantes, que são libertadas para a atmosfera, mesmo quando sujeitas a tratamentos mais ou menos eficientes. O sistema PPV não produz, durante o seu período de funcionamento, quaisquer emissões, conservando-se os gases provenientes da pirólise encerrados no reactor, o que possibilita o seu tratamento adequado, de forma mais fácil e eficiente;
- 5) Ambos os sistemas conduzem à formação de cinzas, cuja descarga e tratamento se impõe. Contudo, no sistema PPV ocorre a vitrificação das cinzas, o que facilita o seu posterior manuseamento, dispensa tratamentos de outro tipo e limita os riscos de dispersão de poluentes, por lixiviação ou arrastamento;
- 6) A redução de peso e de volume do material tratado, em relação ao material inicial, é mais acentuada no caso do sistema PPV, cifrando-se numa diminuição do volume da ordem de 100 para 1 e uma redução de peso de 5 para 1;
- 7) A destruição dos compostos orgânicos é muito elevada no sistema PPV, conduzindo à formação de H_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2O e hidrocarbonetos presentes em teores vestigiais. Pelo contrário, a Incineração conduz à formação de produtos diversos, alguns de elevada perigosidade, tais como dioxinas e furanos. As concentrações de tais poluentes, nos gases finais da pirólise, podem ser praticamente negligenciáveis, desde que o processo de tratamento seja correctamente conduzido;
- 8) Os gases retidos no reactor podem ser directamente valorizáveis na produção de energia, recorrendo a uma turbina adequada, ou serem utilizados na produção de vapor, convertível em energia eléctrica. A produção de energia, função das características do material tratado, pode representar de 20 a 80% mais do que o consumo energético do sistema PPV; trata-se portanto de um sistema de tratamento que funciona como um sistema produtor líquido de energia;
- 9) O espaço necessário à instalação de um sistema PPV é apenas cerca de um terço do espaço ocupado por um incinerador de capacidade

equivalente. Além de uma economia significativa de espaço (constituindo um sistema mais compacto), o período de construção é, por isso, mais reduzido.

Os custos globais atribuíveis aos dois sistemas apresentados, apenas a título indicativo, serão, no que respeita ao investimento inicial, da mesma ordem de grandeza. Contudo, o sistema PPV terá em princípio, para além das vantagens já indicadas do ponto de vista ambiental, a mais valia representada pela produção excedentária de energia. (Quadro 16). A preços de 1998, de acordo com uma empresa fabricante deste tipo de sistema, uma unidade típica, com recuperação de energia, representaria um investimento de 10 milhões de dólares e os custos de exploração seriam da ordem dos 48.51 dólares por tonelada.

Importa, além do que já se referiu, identificar os riscos ambientais associados aos dois sistemas.

Os incineradores, libertam gases e partículas (por cujas emissões serão responsáveis) e cujo controlo é, evidentemente, muito mais complexo do que no sistema PPV, em igualdade de poluentes a reter, pela dispersão que, nesse caso, se verifica. Esta situação obriga a cuidados maiores a aplicar na fonte, além de aumentar a área potencial de impacte. Por outro lado, as cinzas produzidas são, no caso da incineração, de gestão e manuseamento mais complexos, criando riscos ambientais não negligenciáveis.

No que respeita às unidades funcionando em condições de Pirólise com formação de Plasma e com Vitrificação, os riscos ambientais aos quais urge atender (para além de eventuais acidentes, por natureza imprevisíveis) são de duas ordens, como já se referiu:

- a) Produção de resíduos sólidos vitrificados, cuja lixiviabilidade se verificou ser extremamente reduzida;
- b) Produção de gases e material particulado que permanecem no reactor. O seu tratamento é, porém, possível, conforme pode ser verificado em diversas publicações técnico-científicas (Sanders, 1995; Holloway, 2000) e como o foi em unidades visitadas. Importa salientar a necessidade de neutralizar os vapores ácidos eventualmente formados (HCl, nomeadamente) e referir as técnicas, recentemente desenvolvidas nos EUA, que permitem a recuperação de metais presentes nas fases gasosa e particulada, incluindo, por exemplo, o caso do Mercúrio (Montgomery et al., 2000).

Conclusões

Nenhuma tecnologia é limpa, como sempre se tem tido o cuidado de salientar. Contudo, os níveis de poluição atribuíveis às várias tecnologias não são idênticos, nem comparáveis as perigosidades e os riscos ambientais que lhes podem ser assacados. Os sistemas tipo PPV que foram referidos, não serão totalmente inócuos, porque nada o é

(nem poderá ser). Trata-se, sem dúvida, de uma tecnologia que poderá ser menos poluente que as actualmente disponíveis, desde que correctamente planeada e implementada e aproveitadas as virtualidades que lhe são inerentes.

E trata-se de uma tecnologia que viabiliza o sonho da valorização energética *integral* de todo e qualquer material, incluindo os resíduos que não soubermos, não quisermos ou que, num determinado momento e local, não nos convier valorizar. Ou seja, podemos terminar esta lição, conseguindo, assim o cremos, ultrapassando o Paradigma/paradoxo com que a iniciámos: passar da Matéria à Energia, do Inútil ao Essencial.

Bibliografia

- AFNOR X31-201 -1998- Qualité des sols – Essai d'inhibition de germination de semences par une substance. Essais écotoxicologiques, 2^{ème} édition, AFNOR, 672 pp.
- APHA/AWWA/WPCF, -1996- ed. Standard Methods for the examination of water and wastewater 18th Edition. Washington.
- Beudin, V. *et al.* – 1995- Plasma vitrification of Fly Ash. Atlanta. Proc. Int. Symp. on Env. Techn.: Plasma Systems and Applications.
- Bogatov, S. A. *et al.* – 1995- PRIM-Plasm Remediation of in-situ Materials and its potential for the remediation of Chernobyl consequences. Atlanta. Proc. Int. Symp. on Env. Techn.: Plasma Systems and Applications.
- Camacho, S. L. – 1988- Industrial-worthy plasma torches: State-of-the-art. "Pure and Appl.Chem", vol. 60, nº5, 619-632 pp.
- Camacho, S. L. – 1990- Plasma pyrolysis of medical waste. Palo Alto, PLASMA Symposium, 7-9 March 1990, 8 pp.
- Camacho, S. L. – 1994- The Reverse-Polarity Plasma Arc heater. Indianapolis Amer. Soc. 1994 Annual Meeting.
- Camacho, S. L. – 1995a- Mixed Waste disposal and Energy recycling by Plasma Pyrolysis/Vitrification. Seoul, Seoul National University.
- Camacho, S. L. – 1995b- The Plasma ARC Torch-Its electrical and Thermal Characteristics. Atlanta, Proc. Int. Symp. on Env. Techn.: Plasma Systems and its Appl., Vol I, 45-66 pp.
- Carter, G. W.; Tsangaris, A. V. – 1995a- Plasma Gasification of Biomedical Waste. Atlanta. Proc. Int. Symp. on Env. Techn.: Plasma Systems and Applications.
- Carter, G. W.; Tsangaris, A. V. – 1995b- Plasma Gasification of Municipal Solid Waste. Atlanta, Proc. Int. Symp. Env Techn: Plasma Systems and Applications, Vol II: pp 321-330.
- Circeo, L.J. *et al.* – 1994- Plasma Remediation of in-situ materials-The Prism concept. Wash., Hanford Symp. On Heath and on the Environment., Battelle Press.
- European Committee for Standardization, 1998 ed. Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges: one stage batch test at a L/S ratio 10. Draft prEN 12457-2, CEN/TC292/WG2, Doc. 109-2, Brussels.
- French Ministry of Environment/Directorate for Prevention Pollution and Risk Control. – 1998- Criteria and Evaluation Methods of the Ecotoxicity of Waste: proposal. January, Paris.
- Georgia Inst. Of Techn. – 1997- Evaluation of Plasma Arc Technology for treatment of Municipal Solid Waste in Georgia. Atlanta, GIT, 49 pp e anexos.
- Gibbs, W. W. – 1993- Garbage in, Garbage out. "Scientific American", 130 pp, May 1993.
- Gollands, M. *et al.* – 1987- Stack Testing of the mobile Plasma Arc unit. Cincinnati, EPA/600/S2-87/013 May 1987, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory.
- Green, D. S. – 1995- Characterization of Plasma Processes in the destruction of volatile organic compounds. Atlanta, Proc. Int. Symp. on Env. Techn.: Plasma Systems and Applications, Vol I, pp 87-100.
- Holloway, T. L. – 2000- Design considerations for air pollution control equipment on plasma torch and vitrification type hazardous and radioactive waste processors. Atlanta, Anderson 2000, 9 pp.
- Interstate Techn. and Regulatory Coop. Work Group -1996- Plasma Technologies-A Regulatory Overview of Plasma Technologies. Report of the Plasma Technology Subgroup. USA, ITRC, 19 pp.
- Iserberg D., The Microtox[®] toxicity test: a developer's commentary. *Ecotoxicology Monitoring*, M. Richardson, UHC, Weinheim; 3-15 pp.
- ISO 5667-3. – 1994- Water quality – sampling – part 3: guidance on the preservation and handling of samples. ISO Standards Compendium, vol. 1, Genève, Switzerland, 300 pp.
- ISO 6439 -1994- Water quality – determination of phenol index: 4-aminoantipyrine spectrometric methods after distillation. ISO Standards Compendium, vol. 2, Genève, Switzerland, 343 pp.
- ISO 6777 -1994- Water quality – determination of nitrite: molecular absorption spectrometric method. ISO Standards Compendium, vol. 2, Genève, Switzerland, 343 pp.
- ISO 7888. – 1994- Water quality – determination of electrical conductivity. ISO Standards Compendium, vol. 3, Genève, Switzerland, 267 pp.
- ISO 8692. 1994 Water quality – fresh water algal growth inhibition test with *S. subspicatus* and *S. capricornutum*. ISO Standards Compendium, vol. 3, Genève, Switzerland, 267 pp.
- ISO 9297. – 1994- Water quality – determination of chloride: Mohr's method. ISO Standards Compendium, vol. 2, Genève, Switzerland, 343 pp.
- Lapa, N. *et al.* – 1999- Chemical and Toxicological Characterisation of Leachates from MSWI bottom ashes. *REWAS'99 Conference*, San Sebastian, Spain, 10 pp.
- Lapa, N., Oliveira, J. F., Camacho, S. L. and Circeo, L. J. – 2000- Contribution to the ecocompatibility assessment of PPV solid wastes. *Waste Management*, 20 pp (submitted)
- Montgomery, J. *et al.* – 2000- Technology evaluation for removing mercury vapor from incineration offgas abatement systems. Butte, MSE, 7 pp.
- NF T90-043 -1988- Essais des eaux – Dosage du chrome (VI): méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire. AFNOR, 1^{er} tirage 88-10, 6 pp.
- Oliveira, J. F. – 2000- Tratamento e Valorização de Resíduos Perigosos. UbiA, FCT/UNL, Monte de Caparica, 38 pp.
- Persoone, J. – 1999- Pollution classification system. October, not published, 6 pp.
- Sanders, D. L. – 1995- Operating Results of Wet Scrubbers demonstrating dramatic reduction of Particulate, acid gas, heavy metal and dioxin/furan emissions from incinerators. Seattle, The 1995 Int. Incineration Conference, 12 pp.
- Seeker, W. R. *et al.* – 1999- Compliance Assurance strategies for mixed waste incinerators, 5 pp.
- Smith, E. D. *et al.* – 1997- All fired up. "Civil Engineering", Nov., pp 34-37.
- van der Sloot, H. A., Heasman L. and Ph. Quevauviller – 1997 – Harmonization of leaching/extraction tests. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 281 pp.
- Wald, M. L. – 1999 – EPA is ordering 392 plants to cut pollution in half. New York, The New York Times on the web, 4 pp.

Quadro 1
Composição química de gases produzidos
no gaseificador da RCL

Hidrogénio	41,2 %
Monóxido de Carbono	29,7 %
Azoto	17,0 %
Dióxido de carbono	8,3 %
Metano	3,2 %
Oxigénio	0,3 %
Acetileno	0,2 %
Etileno	0,1 %

Quadro 2
Composição química das escórias produzidas na RCL

Elemento	Percentagem do elemento	Percentagem do óxido
Alumínio	9,5	18,0
Cálcio	10,4	14,6
Ferro	2,3	3,3
Magnésio	0,1	0,2
Fósforo	0,4	0,8
Potássio	1,6	1,9
Sílica	23,2	49,7
Sódio	3,8	5,1
Titânio	0,6	1,1
TOTAL	51,9	94,7

Quadro 3
Emissões gasosas verificadas durante a gaseificação de RSU's

Emissões Elementares	Resultados de dois ensaios*	Incinerador Clássico
ORGÂNICOS (SVOC)		
Equivalentes Tóxicos (TEQ)		
PCDD TEQ (ng/dscm)	0	
PCDF TEQ (ng/dscm)	0 – 0,5	
Total TEQ (ng/dscm)	0 – 0,5	
Valores Reais		
PCDD (ng/dscm)	N.D.	19 – 298
PCDF (ng/dscm)	3 – 10	44 – 306
CP (µg/dscm)	N. D.	5 – 24
CB (µg/dscm)	0,6 – 3	3 – 10
PCB (µg/dscm)	N. D.	2 – 7
METAIS		
Antimónio (mg/dscm)		0,02 – 0,05
0,5 – 2,6		
Cádmio (mg/dscm)	0,004 – 0,03	0,6 – 0,9
Crómio (mg/dscm)	0,02 – 0,08	0,03 – 0,1
Chumbo (mg/dscm)	0,2 – 0,6	8,4 – 15
Mercúrio (mg/dscm)	N. D.	0,5 – 0,9
Níquel (mg/dscm)	0,02 – 0,08	0,2 – 0,5

(Cont.)

Emissões Elementares	Resultados de dois ensaios*	Incinerador Clássico
GASES ÁCIDOS		
HCl (mg/dscm)	0,1 – 0,6	
HF (µg/dscm)	0,07 – 0,7	
HBr (µg/dscm)	N.D.	
NOx (ppm)	158 – 305	169 – 246
SO ₂ (ppm)	66 – 69	128 – 225
PARTICULADOS		
mg/dscm	2,4 – 9,9	167 – 247

* normalizados a 11% de Oxigénio N.D. – Não Detectado

Quadro 4
Concentrações de diversos metais nos lixiviados das escórias
vitrificadas (ng/L, em amostras completamente moídas)

Elemento	Resultados da RCL (média de dois ensaios)	Resultados referentes ao Estado de Ontário	Quebec (Aterro sanitário)
Alumínio	0,03 – 0,18		
Antimónio	ND – 0,006		
Arsénio	ND	5,0	
Bário	0,03 – 0,1	100,0	
Berílio	ND		
Bismuto	ND		
Boro	ND	500,0	
Cádmio	ND	0,5	0,1
Cálcio	1,15 – 3,3		
Crómio	ND	5,0	0,5
Cobalto	ND		
Cobre	0,07 – 0,09		1,0
Ferro	0,57 – 1,79		17,0
Chumbo	0,01 – 0,02	5,0	0,1
Lítio	ND		
Magnésio	0,15 – 0,2		
Manganésio	0,01 – 0,02		
Mercúrio	ND	0,1	0,001
Molibdénio	ND		
Níquel	0,005 – 0,1		1,0
Fósforo	ND		
Potássio	0,05 – 0,1		
Selénio	N D	1,0	
Sílica	0,68 – 1,16		
Prata	N D	5,0	
Sódio	0,1 – 1,3		
Estrôncio	ND		
Telúrio	ND		
Estanho	ND		
Titânio	ND		
Vanádio	ND – 0,015		
Zinco	0,02 – 0,005		1,0

Quadro 5
Características dos resíduos

Resíduo	H ₂	CO	CH ₄	CxHy	CO ₂	Valor calórico BTU/SCF MM BTU/TON
RSU 1	41	30	3	-	8	282 - 9,0
RSU 2	40	30	0	<1	8	300 - 8,1
Pneus	52	27	<2	-	16	276 - 19,3
Carvão 1	53	39	1	-	1	331 - 23,2
Carvão 2	50	27	2	-	11	247 - 19,7

Quadro 6
Constituição da mistura tratada de resíduos biomédicos

CONSTITUINTES DA MISTURA	%	NATUREZA DO PRODUTO
Peças anatômicas	2	Carne e ossos de animais
Plásticos com cloro	5	PVC
Plásticos sem cloro	40	Lengóis e invólucros
Celulósicos	27	Caixas, folhas, batas
Líquidos orgânicos	3	Metanol
Líquidos inorgânicos	6	Água
Sangue	4	Sangue animal
Vidro	9	Vidro normal
Agulhas	3	Agulhas de aço inox
Culturas microbianas	1	Culturas de bactérias com uma conc. de 10 ¹² organismos/ml

Quadro 7
Composição dos gases libertados

Hidrogénio	35,5 %
Azoto	25,9 %
Oxigénio	2,5 %
Monóxido de carbono	23,4 %
Metano	3,9 %
Dióxido de carbono	5,9 %
Acetileno	1,4 %
Etileno	1,5 %

Quadro 8
Composição Química das Escórias

Elemento	Resultados (RCL)
Alumínio	9,4 %
Cálcio	16,7 %
Ferro	7,5 %
Magnésio	1,9 %
Manganésio	0,3 %
Fósforo	1,1 %
Potássio	0,8 %
Silica	53,0 %
Sódio	7,7 %
Titânio	1,1 %
Total	99,6 %

Quadro 9
Composição das emissões gasosas produzidas
na gaseificação de resíduos biomédicos

Constituintes	Média de três ensaios*	Incineradores		CCME
		Dados de MOEE	Dados da EPA	
ORGÂNICOS (SVOC) Equivalência Tóxica (TEQ)				
PCDD TEQ (ng/dscm)	0,012 – 0,017	0,9 – 52,4	4,1 – 57,3	
PCDF TEQ (ng/dscm)	0,036 – 0,074	7,5 – 37,4		
Total TEQ (ng/dscm)	0,048 – 0,091		11,6 – 94,7	0,50
Valores Reais				
PCDD (ng/dscm)	0,13 – 0,55	34 – 1,346	51,8 – 450	
PCDF (ng/dscm)	1,1 – 2,2		117,3 – 785	
CP (µg/dscm)	0,063 – 0,15	0,5 – 87,5		
CB (µg/dscm)	ND – 0,09	0,4 – 22,6		
PCB (µg/dscm)	ND – 0,075	ND – 1,2		
PAH (µg/dscm)	6,4 – 47	ND – 37		
METAIS				
Antimónio (µg/dscm)	2,2			
Arsénico (µg/dscm)	0,063 – 0,092	2,3 – 9,2		
Cádmio (µg/dscm)	0,15 – 0,30	100 – 800	57 – 153	
Crómio (µg/dscm)	3,0 – 3,4	11 – 54		
Cobre (µg/dscm)	49 – 134			
Ferro (µg/dscm)	40 – 58	156 – 668		
Chumbo (µg/dscm)	110 – 150	2,200 – 12, 200	1,217 – 2,096	
Mercúrio (µg/dscm)	0,13 – 0,39	200		
Níquel (µg/dscm)	1,3 – 2,1	300 – 1,800	7 – 18	
GASES ÁCIDOS				
HCl (mg/dscm)	0,60 – 6,7	600 – 2,250	282 – 2,038	75
HF (µg/dscm)	1,2 – 3,9			
HBr (µg/dscm)	ND			
NOx (ppm)	ND – 119	49 – 89	155 – 217	
SO ₂ (ppm)	5,2 – 14	24 – 37	19 – 37	
PARTÍCULAS				
mg/dscm	6,8 – 14,0	77 – 1, 210	2 291	20/50**

* normalizados para 11% oxigénio

ND - não detectado

** 20 mg/dscm para novos incineradores com capacidade > 200 Kg/hr

50 mg/dscm para os incineradores existentes com capacidade < 200 Kg/hr

SVO - Compostos orgânicos semivoláteis

TEQ - Equivalência tóxica

PCDD - dibenzo-b-dioxinas policlorinadas (dioxinas)

PCDF - dibenzofuranos policlorinados (furanos)

CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment

MOEE - Ministry of Environment and Energy (Ontário)

EPA - Environmental Protection Agency

Quadro 10
Concentrações de metais no lixiviado
de escórias e outros (mg/Litro)

Elemento lixiviado	Resultados média (de três ensaios)	Ontário Resíduos (Perigosos)	Quebec (Aterro Sanitário)	Limites da EPA
Arsênio	ND – 0,0036	5,0		0,5
Bário	0,001 – 0,007	100,0		100,0
Boro	ND – 0,023	500,0		
Cádmio	ND	0,5	0,1	1,0
Crômio	ND	5,0	0,5	5,0
Cobre	ND – 0,043		0,1	
Ferro	0,023 – 0,23		17,0	
Chumbo	ND	5,0	0,1	5,0
Mercúrio	ND – 0,00012	0,1	0,001	0,2
Níquel	ND		1,0	
Selênio	0,002 – 0,004	1,0	1,0	
Prata	ND	5,0		5,0
Zinco	ND – 0,11		1,0	

Quadro 11
Ensaio de sobrevivência de bactérias

Média de três ensaios	
ESPOROS NA AMOSTRA	
Recuperados	0 – 3
ESPOROS NO AR AMBIENTE	
Recuperação na área de amostragem	0 – 165
Bactérias	0 – 142
Fungos	
Recuperação na área próxima	
Bactérias	2 – 59
Fungos	28 – 50

Quadro 12
Resultados analíticos de lixiviados de cinzas vitrificadas

Análises	Lixiviado 1 (µg/g)	Lixiviado 2 (µg/g)	Lixiviado 3 (µg/g)	Limites definidos na norma USTCLP (µg/g)	Limites definidos pela AFNOR (µg/g)
Chumbo	<0,1	<0,1	<0,1	<5,0	<1
Cádmio	0,03	0,01	<0,01	<0,1	<0,2
Zinco	0,371	0,210	<0,002	NS	NS
Arsênio	<0,05	<0,05	<0,05	<5,0	<0,5
Crômio	<0,01	0,01	<0,01	<5,0	<0,1
Mercúrio	3,9	<0,2	<0,2	<0,2	<0,05
Cloretos	596	13,8	1,6	NS	<5,000
Fluoretos	78,7	0,6	0,3	NS	<15
Nitratos	NA	NA	NA	NS	NS
Sulfatos	1949,5	637,7	187,0	NS	NS

NA – Não analisado; NS – Limite não especificado

Quadro 13
Caracterização química dos lixiviados obtidos pela aplicação
da proposta de norma europeia prEN 12457-2,
CEN/TC 292/WG2 a quatro amostras vitrificadas
produzidas recorrendo à tecnologia PPV

Parametros	Unidades	VMSW	VBA	VS1	VS2
Humidade	%	0.0015	0.0006	0.0021	0.0012
pH	Sorensen	5.6	8.7	6.2	6.9
Conductividade	mS/cm	13.1	13.1	4.0	6.0
Fluoretos	mg/Kg dm	4.50	5.50	10.50	11.00
Cloretos	mg/Kg dm	8.40	8.40	5.60	14.00
Índice de Fenóis	mg/Kg dm	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Nitritos	mg N/Kg dm	0.040	0.040	0.030	<0.010
Nitritos	mg NO ₂ /Kg dm	0.130	0.130	0.100	<0.030
Nitratos	mg N/Kg dm	0.40	0.50	0.20	0.30
Nitratos	mg NO ₃ /Kg dm	1.80	2.20	0.90	1.30
Sulfatos	mg SO ₄ /Kg dm	<10	140	90	140
Arsénio	mg/Kg dm	<0.0032	<0.0032	<0.0032	<0.0032
Chumbo	mg/Kg dm	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Cadmio	mg/Kg dm	<0.32	<0.32	<0.32	<0.32
Crômio	mg/Kg dm	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Crômio VI	mg/Kg dm	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Níquel	mg/Kg dm	<0.63	<0.63	<0.63	<0.63
Mercurio	mg/Kg dm	<0.012	<0.012	<0.012	<0.012
Zinco	mg/Kg dm	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13
Cobre	mg/Kg dm	<0.41	<0.41	<0.41	<0.41
Ferro	mg/Kg dm	<0.6	<0.6	<0.6	<0.6
Estanho	mg/Kg dm	<4.3	<4.3	<4.3	<4.3
Alumínio	mg/Kg dm	<3.4	<3.4	<3.4	<3.4

VMSW: Resíduos domésticos urbanos vitrificados; VBA: Cinzas de fundo vitrificadas resultantes da incineração de resíduos domésticos urbanos; VS1 e VS2: Solos contaminados vitrificados; ms: matéria seca.

Quadro 14

Resultados obtidos nos ensaios ecotoxicológicos realizados nos lixiviados obtidos pela aplicação da proposta de norma europeia prEN 12457-2, CEN/TC 292/WG2, sobre quatro amostras vitrificadas, resultantes da aplicação da tecnologia PPV.

Ensaio Ecotoxicológico	Unidade	VMSW	VBA	VS1	VS2
Inibição da fotoluminescência de <i>Photobacterium phosphoreum</i>					
EC ₅₀ , 5 min de exposição com correcção do pH	%	> 100	> 100	> 100	> 100
EC ₅₀ , 15 min de exposição com correcção do pH	%	> 100	> 100	> 100	> 100
EC ₅₀ , 30 min de exposição com correcção do pH	%	> 100	> 100	> 100	> 100
Inibição do crescimento de <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> (anteriormente <i>Selenastrum capricornutum</i>)					
EC ₂₀ , 3 dias de exposição, com correcção de pH	%	> 100	> 100	> 100	> 100
EC ₅₀ , 3 dias de exposição, com correcção de pH	%	> 100	> 100	> 100	> 100
Inibição de germinação de sementes de <i>Lactuca sativa</i>					
IC ₅₀ , 7 dias de exposição, com correcção do pH	%	> 100	> 100	> 100	> 100

VMSW: Resíduos domésticos urbanos vitrificados; VBA: Cinzas de fundo vitrificadas resultantes da incineração de resíduos domésticos urbanos; VS1 e VS2: Solos contaminados vitrificados; ms: matéria seca.

Quadro 15

Resultados obtidos pela aplicação do TCS (Sistema proposto por Persone), aos dados ecotoxicológicos obtidos sobre lixiviados de quatro amostras vitrificadas produzidas pelo sistema PPV

valores TCS	VMSW	VBA	VS1	VS2
Inibição de luminiscência de <i>P. phosphoreum</i>				
TU	<1	<1	<1	<1
TC	1	1	1	1
TS	1	1	1	1
Inibição de crescimento de <i>P. subcapitata</i>				
TU	<1	<1	<1	<1
TC	1	1	1	1
TS	1	1	1	1
Inibição de germinação de <i>Lactuca sativa</i>				
TU	<1	<1	<1	<1
TC	1	1	1	1
TS	1	1	1	1
Toxicidade Global				
CWS	1	1	1	1
CWS (%)	100	100	100	100

TU: Unidades de Toxicidade; TC: Classes de Toxicidade; TS: Nível de Classificação; CWS: Nível de classificação ponderado.

Quadro 16

Comparação dos custos de instalações de unidades de tratamento de RSU's

Localização	Data de início	Custo de Instalação	ton/dia	Custo por t/dia (milhares)
Instalação apenas de incineração				
Windham, CT	1981	4.4	130	33.8
Hartford, CT	1988	168.0	2000	84.0
Wallingford, CT	1988	31.7	420	73.8
Bristol, CT	1988	58.8	650	90.5
Bridgeport, NY	1988	211.0	2250	93.8
Westchester, NY	1984	186.0	2250	82.7
Islip, Long Island, NY	1989	38.7	400	96.7
Ballston, NY	1989	85.5	750	114.0
Oyster Bay, NY	1991	125.0	1080	115.7
N. Hempstead, NY	1991	150.0	990	151.5
Westbury, NY	1989	252.0	2319	108.7
Navy Yard (Brooklyn), NY	1993	300.0	3000	100.0
Ridgefield, NJ	1991	291.0	3000	97.0
Hudson, NJ	1992	125.8	1500	83.9
Essex, NJ	1990	246.0	2250	109.3
Union, NJ	1991	107.0	1440	74.3
Middlesex, NJ	1992	250.0	2250	111.1
South Camden, NJ	1990	96.0	1050	91.4
Ocean, NJ	1992	105.0	1050	100.0
Cape May, NJ	1992	55.0	500	110.0
Sistema de tratamento pelo PPV		22.0	250	88.0
Instalação de incineração com recuperação de energia				
Preston, CT	1991	75.0	600	125.0
Hudson Falls, NY	1990	60.0	400	150.0
Poughkeepsie, NY	1989	53.4	400	133.5
Glen Cove, NY	1983	34.0	250	136.0
Huntington, NY	1990	118.0	750	157.3
Passaic, NJ	1991	150.0	1300	115.4
Mercer, NJ	1992	150.0	975	153.7
Atlantic, NJ	1992	100.0	850	117.7
Sistema de tratamento pelo PPV com recuperação de energia		45.0	480	93.75