

## EMISSÃO DE HIDROCARBONETOS TOTAIS NÃO QUEIMADOS EM UMA CÂMARA SECUNDÁRIA DE INCINERAÇÃO

**Waldir A. Bizzo** – bizzo@fem.unicamp.br

**Leonardo Goldstein Jr.** – leonardo@fem.unicamp.br

**André L. Cardoso**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

Caixa Postal 6122 – 13083-970 Campinas SP

**Paulo R. Tardin Jr.** – paulotardin@usf.com.br

Universidade São Francisco, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

13251-900 - Itatiba SP

**Resumo.** *A incineração térmica tem sido utilizada como método de tratamento e disposição de resíduos perigosos. Cabe à câmara secundária dos incineradores um papel importante na destruição eficiente dos resíduos e no controle da emissão de produtos de combustão incompleta, sendo a análise contínua das emissões de CO e hidrocarbonetos não queimados o procedimento utilizado para o monitoramento, em tempo real, do seu desempenho.*

*O presente trabalho estudou experimentalmente o efeito do número de rotação do escoamento no interior da câmara, nas emissões de CO e HC totais para três concentrações de uma mistura de tolueno no combustível e dois valores do excesso de ar. Para a consecução da pesquisa foi projetada e construída uma câmara de combustão cilíndrica horizontal, isolada termicamente, com um queimador com ajuste variável do número de rotação; sondas de amostragem de gases de combustão e um analisador contínuo de hidrocarbonetos totais.*

*O aumento do número de rotação teve influência na emissão de CO e HC totais, diminuindo as emissões na condição de maior excesso de ar (42%) e aumentando as emissões na condição de menor excesso de ar (19%). A proporção relativa das regiões de mistura e de escoamento pistonado resultante dentro da câmara influenciou a eficiência de combustão, com efeitos diferentes conforme as condições de excesso de ar e de concentração de tolueno no combustível. A relação CO/HC mostrou-se relativamente constante com o número de rotação nestas condições.*

**Palavras Chave:** *Combustão, Incineração, Poluição, Monóxido de Carbono, Hidrocarbonetos totais*

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as diversas formas de tratamento e disposição de resíduos perigosos, a incineração térmica têm-se mostrado uma das mais eficientes e adequadas. Ela tem por objetivo a destruição do fator ou componente perigoso dos resíduos, através da oxidação completa, transformando resíduos em gases menos tóxicos, tais como dióxido de carbono e vapor d'água, e em resíduos sólidos disponíveis em aterros, tais como cinzas inertes. Outros tipos de efluentes gasosos da incineração,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{NO}_x$ , por exemplo, podem ser controlados através de tecnologias adequadas.

O processo de incineração térmica emprega a oxidação química em alta temperatura para destruição dos compostos perigosos, transformando-os em substâncias de baixo potencial químico e físico, tais como  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , resultados da oxidação completa de hidrocarbonetos; e sendo assim, resíduos orgânicos são os grandes candidatos a incineração térmica.

A incineração é um complexo de fenômenos químicos e físicos, nem sempre completamente entendidos. Secagem, pirólise, redução e oxidação química são os principais fenômenos.

Incineradores de resíduos perigosos são compostos normalmente de duas câmaras de combustão: a câmara primária, onde ocorrem principalmente os processos de secagem e devolatilização dos resíduos e a câmara secundária, onde deve ocorrer o processo de oxidação. Sendo a câmara secundária responsável pela oxidação completa dos compostos orgânicos produzidos na câmara primária, tem grande importância no desempenho dos incineradores no que se refere à destruição dos resíduos e à emissão de produtos de combustão incompleta.

## 2. EMISSÕES E DESEMPENHO DE INCINERADORES

O desempenho de incineradores de resíduos perigosos é medido normalmente por dois parâmetros principais: a eficiência de destruição dos resíduos e as emissões gasosas do incinerador.

A Eficiência de Destruição e Remoção  $E_d$  é definida como:

$$E_d = \frac{PCOP_{entrada} - PCOP_{saída}}{PCOP_{entrada}} \quad (1)$$

onde:

$PCOP$ : principais compostos orgânicos perigosos e *Entrada* e *saída* correspondem às taxas de alimentação e emissão medidas na entrada do incinerador e na chaminé de saída para atmosfera (kg/s).

As normas nada especificam a respeito da emissão de Produtos de Combustão Incompleta (PCIs), mas determinam limites para emissões de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , metais e outros compostos.

A termodinâmica dos processos químicos mostra que em uma reação de oxidação, tal como acontece com a combustão de compostos orgânicos, a composição dos produtos da reação é função da temperatura e do tempo de residência nesta condição, assumindo perfeita mistura entre reagentes. A situação real dos processos que ocorrem em sistemas de incineração não reproduz as condições de equilíbrio químico, de modo que PCOPs presentes no resíduo incinerado, e Produtos de Combustão Incompleta (PCIs) são emitidos por incineradores. PCIs são compostos orgânicos parcialmente oxidados, e intermediários da combustão, altamente estáveis, como por exemplo, hidrocarbonetos aromáticos polinucleares.

Um requisito básico para o bom desempenho dos processos de incineração é controlar tais emissões, e mantê-las dentro de valores e parâmetros aceitáveis para a saúde humana e meio ambiente.

Alguns modelos utilizados para obtenção de dados cinéticos da incineração de compostos são ideais, geralmente baseados na teoria do Reator de Fluxo Pistonado (Theodore e Reynolds, 1987), com base em teoria e correlações de cinética e equilíbrio químico (Cooper, Alley e Overcamp, 1982). O melhoramento do desempenho operacional de incineradores não parece estar limitado ou controlado apenas pelo equilíbrio químico, já que as reações de oxidação de compostos orgânicos são extremamente rápidas.

A causa mais provável de insucessos na operação de incineradores parece ser a existência de condições inadequadas de mistura entre os reagentes, ou seja, resíduo e ar de combustão. Os padrões de escoamento e recirculação dos gases e o método de alimentação dos resíduos podem determinar a maior ou menor eficiência de destruição em determinadas condições de operação. Radicais livres, altamente reativos, e intermediários de combustão, podem escapar da zona de chama, ou serem resfriados em contacto com paredes mais frias interrompendo a reação química, tornando-se presentes nos gases de exaustão. A estratificação da concentração de oxigênio, ou mesmo dos compostos incinerados, pode retardar a velocidade de reação, principalmente em regiões de baixa concentração, tais como na saída das câmaras de combustão. Lester *et al.*, 1991, constataram grandes diferenças de concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura de gases em posições diferentes na saída do forno rotativo de um incinerador.

Cundy *et al.* (1991), em medições efetuadas também em incinerador de forno rotativo, detectaram forte estratificação de compostos na saída do forno. De maneira geral, a câmara secundária de incineradores de forno rotativo não recebe, na entrada, uma mistura homogênea de gases, e os padrões de escoamento produzidos pelo queimador secundário têm importância significativa na eficiência da combustão.

O controle de emissões gasosas pode ser feito continuamente através da análise dos gases de combustão. A tecnologia disponível permite o monitoramento contínuo de alguns gases, tais como CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e hidrocarbonetos totais.

Diversas pesquisas têm sido feitas com o intuito de tentar relacionar emissões de gases possíveis de monitoramento contínuo com a eficiência de destruição obtida (La Fond *et al.*, 1985, Dellinger e Hall, 1986). La Fond *et al.*, 1985, testaram em uma câmara de combustão turbulenta a emissão de CO, HC totais e CH<sub>4</sub> e compararam a eficiência de destruição obtida com uma mistura de compostos, incluindo compostos halogenados. Observaram que o aumento da emissão de CO e HC totais precede a diminuição da eficiência de destruição de resíduos, o que não ocorre com o aumento de emissão de CH<sub>4</sub>.

A emissão de CO tem sido utilizada para monitoramento contínuo do processo de combustão. Mantendo-se sua concentração dentro de certos limites espera-se que a eficiência de destruição obtida esteja também dentro do previsto e necessário. Estudos em escala industrial mostraram a eficácia desse pressuposto (Wood *et al.*, 1989), porém, o resultado é que o monitoramento através da concentração de CO é uma medida muito ainda conservativa (Dempsey e Oppelt, 1993). A taxa de emissão de CO pode aumentar sem que necessariamente a eficiência de destruição dos resíduos seja diminuída. Um parâmetro de monitoramento por demais conservativo limita a operação de sistemas de incineração e impede uma maior adoção da incineração térmica como solução para a destinação de resíduos perigosos. Por outro lado, a inexistência de um monitoramento em tempo real da eficiência de destruição de resíduo impede uma maior confiabilidade da incineração térmica, principalmente aos olhos da comunidade não acadêmica. O monitoramento de hidrocarbonetos totais, em algumas situações, parece ser eficaz para o correlacionamento com a taxa de destruição de compostos orgânicos. Hidrocarbonetos totais incluem os PCIs e os

PCOPs presentes no resíduo incinerado, e a emissão de tais compostos mostra alguma correlação com a taxa de destruição requerida.

Bowman, 1975, revisou a cinética de formação de poluentes em processos de combustão e destacou que muitos compostos encontrados em produtos de combustão não fazem parte da composição inicial do combustível, sugerindo que um complicado processo de pirólise, síntese e oxidação compõe os mecanismos do processo de combustão. Pratt, 1976, revisando os processos de mistura e reação química em combustão contínua, relacionou a formação de poluentes às flutuações turbulentas e à intermitência espacial da temperatura e concentração de espécies químicas. Destacou o problema da flutuação e sua complicada representação matemática. Com o objetivo de obter um modelo matemático alternativo aos dois modelos clássicos de reatores, o "Reator Bem Misturado", e o "Reator de Fluxo Pistonado", propôs um modelo para a descrição dos padrões de mistura de fluidos e partículas dentro do reator, que considera basicamente a Distribuição do Tempo de Residência (DTR), na tentativa de representar o efeito verdadeiro da turbulência e dos padrões de escoamento na mistura dos reagentes.

Field *et al.*, 1967, já descreviam a preocupação com a DTR em caldeiras de carvão pulverizado com fins de se obter combustão completa. A passagem mais rápida de partículas de carvão, não queimando completamente, diminui o rendimento de caldeiras e aumenta a emissão de particulados. Apesar da dificuldade tecnológica de medições da época, tais conceitos foram úteis na otimização de caldeiras. Beér e Chigier, 1972, descrevem alguns poucos resultados de testes de DTR utilizando hélio como traçador, realizado por outros pesquisadores, e aplicados a fornalhas de caldeiras. Concluíram que o número de rotação pode controlar a distribuição do tempo de residência e, conseqüentemente, a emissão de fuligem.

Chang *et al.* (1989), experimentaram em escala piloto a incineração de alguns líquidos organoclorados e hidrocarbonetos com o objetivo de estudar a emissão de PCIs. Apesar de sua preocupação principal ter sido o processo de pulverização por gotas e falhas na pulverização, Chang assumiu que o reator utilizado no experimento comportava-se como um Reator Bem Misturado, não isolando o efeito da DTR dentro da câmara de combustão. Chang, Mournighan e Huffman (1991) propuseram um método analítico de equilíbrio químico para previsão da emissão de PCIs na incineração de orgânicos clorados e concluíram que os resultados apresentavam alguma consistência com os dados experimentais.

Liu *et al.* (1992), efetuando testes com combustão de carvão pulverizado em fornalha piloto, observaram que o aumento da recirculação interna diminuía a eficiência de conversão de carbono, porém não ofereceu explicações baseadas na DTR; eles propuseram que um provável aumento do tempo de residência das partículas ocorria em regiões de baixa concentração de O<sub>2</sub> e menor temperatura.

Nasserzadeh *et al.*, 1995, utilizaram a técnica de um sinal traçador pseudo-aleatório, com injeção de metano e resposta em CO<sub>2</sub>, aplicada a modelos em escala e a um incinerador de resíduos urbanos. Concluíram que o tempo de residência médio não representa adequadamente as condições de combustão e pode levar a resultados errados em relação à emissão de PCIs.

É consenso que um fator importante para o desempenho de incineradores, seja quanto à eficiência de destruição de resíduo ou à emissão de PCIs, é o projeto da câmara secundária de combustão. Fabricantes e operadores de incineradores na Europa têm reprojeto suas câmaras secundárias, gerando um processo de combustão multiestágio, a fim de prevenir bolsões dentro da câmara (Gilges, 1991).

A DTR pode ser caracterizada pelos padrões de escoamento na câmara de combustão. Diversos trabalhos estudaram os perfis de velocidades e respectivos padrões de escoamento (Beltagui e Maccallum, 1976-a, 1976-b, Claypole e Syred, 1982) em câmaras de combustão e

os relacionaram com o número de rotação  $S'$ , proposto por Beér e Chigier (1972) definido pela Eq. (2), que relaciona as componentes tangencial ( $G\phi$ ) e axial ( $Gx$ ) da velocidade no interior da câmara de combustão com o raio do queimador ( $R$ ):

$$S' = \frac{G\phi}{Gx \cdot R} \quad (2)$$

Estes trabalhos constataram que a fluidodinâmica da câmara de combustão, a qual pode ser controlada pelo número de rotação determina o tamanho e a intensidade da Zona Central de Recirculação, afetando a DTR dos gases dentro da câmara. Bizzo, Goldstein e Tardin, 1999, verificaram que o aumento do número de rotação provoca um crescimento da região de mistura dentro da câmara e uma diminuição da região onde o escoamento se assemelha a um escoamento pistonado.

### 3. OBJETIVOS

Este trabalho teve o objetivo de estudar a emissão de hidrocarbonetos não queimados em uma câmara de combustão cilíndrica e sua relação com a fluidodinâmica da câmara, controlada pela variação do número de rotação do escoamento dentro da câmara. Foram estudados também a influencia de alguns parâmetros principais da combustão, ou seja a relação ar/combustível e a composição do combustível. Foram mantidos constantes a temperatura de saída dos gases, o tempo médio de residência e a potência específica da câmara.

### 4. METODOLOGIA E BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental é composta por uma câmara de combustão cilíndrica horizontal, com um queimador equipado com dispositivo de regulação do número de Rotação. O queimador pode ser alimentado com gás liquefeito de petróleo (GLP) e com vapor de combustível líquido, produzido num vaporizador de combustível. Os produtos de combustão saem da fornalha pelo duto de saída, são resfriados rapidamente por um lavador-resfriador de gases e succionados por um exaustor para a chaminé de descarga. A Fig.1 apresenta um esquema do fluxograma de processo e instrumentação da bancada experimental.

A câmara de combustão tem diâmetro interno de 470 mm e comprimento de 1800 mm. As dimensões foram adotadas de maneira que as sondas de medição de temperatura, velocidade e concentração de gases produzissem pouca interferência no escoamento. O corpo da fornalha é construído em chapa de aço carbono com revestimento interno de manta refratária de espessura 150 mm. Na lateral da fornalha, aberturas retangulares permitiam a inserção de sondas para a medição de temperatura, velocidade e composição dos gases de combustão ao longo de 90% do comprimento da fornalha.

O queimador utilizado foi do tipo de blocos direcionais, conforme proposto por Beér e Chigier, 1972. Este tipo de queimador apresenta uma boa correlação entre a posição angular do bloco móvel e o número de rotação do ar de combustão. A vazão do ar de combustão foi medida com placa de orifício, e as vazões de GLP e combustível líquido foram medidas com rotâmetro.

Com a finalidade de controlar a temperatura de saída da câmara de combustão e, simultaneamente, o excesso de ar, foi instalado uma lança de nebulização de água posicionada à frente do centro do queimador, inserida através de um orifício na lateral do cone refratário. Sendo a câmara adiabática, a pulverização da água correspondeu à introdução de uma carga térmica de resfriamento possível de ser controlada. A água adicionada na câmara de

combustão aproxima a composição dos gases no interior da câmara a uma composição típica de incinerador que recebe resíduos com alto teor de umidade. A presença de água é uma característica comum em diversos resíduos industriais.

A análise dos gases de exaustão foi obtida através de uma sonda de amostragem de gases refrigerada, instalada no duto de exaustão de gases. A sonda foi projetada e construída de acordo com recomendações de Chedaille e Braud, 1972. A concentração de CO e O<sub>2</sub> foi medida com analisador de célula eletroquímica e a concentração de hidrocarbonetos totais não queimados foi medido com um cromatógrafo com detetor de ionização de chama adaptado para amostragem contínua.

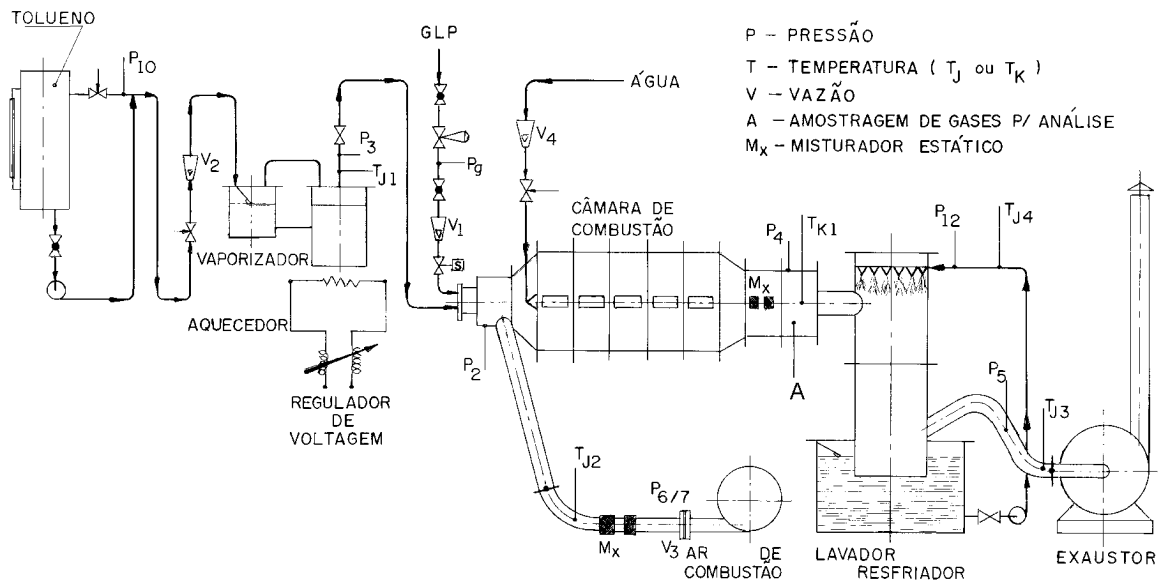


Figura 1 – Fluxograma da bancada experimental.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as emissões de CO e HC totais, respectivamente, em função da composição do combustível, para 42% de excesso de ar. Para baixos números de rotação, a emissão de CO é sensivelmente maior para o combustível com maior concentração de tolueno, um composto orgânico aromático de destruição mais difícil que o GLP, sendo que para a emissão de HC totais as diferenças não são significativas para as composições de combustível testadas, mesmo para baixos números de rotação, exceto quando não havia nenhum tolueno na composição, caso em que as emissões foram praticamente nulas. A emissão de HC totais aparenta ser ligeiramente maior para 30% do que para 39% de tolueno, para altos valores de número de rotação, porém, os valores obtidos situam-se na mesma ordem de grandeza da incerteza das medidas, nesta faixa de concentração.

A Figura 3 traz os resultados das emissões de CO e HC totais para a condição de testes com 19% de excesso de ar. Tanto as emissões de monóxido de carbono quanto as de hidrocarbonetos ficaram substancialmente maiores que na condição anterior. Além das emissões gasosas, foi observada significativa emissão de fuligem que se depositou no duto central da sonda de amostragem, provocando alguns entupimentos, como também na garrafa de coleta de água condensada da sonda.

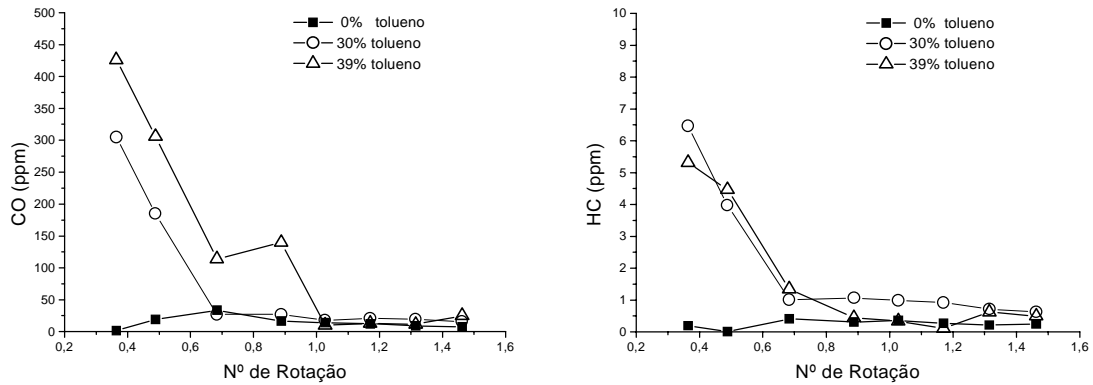


Figura 2 – Emissão de CO e HC totais em função do número de rotação para 42% de excesso de ar.

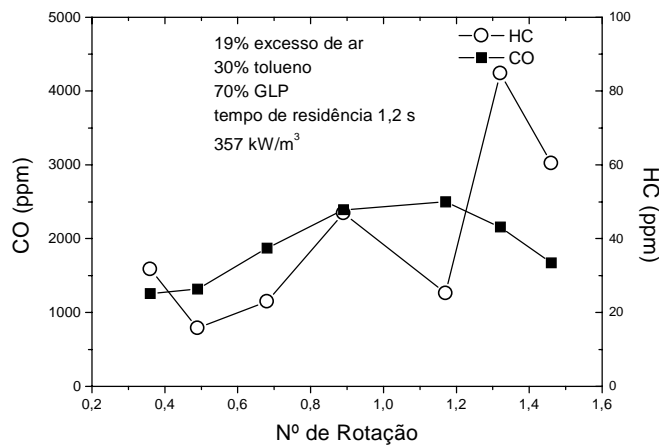


Figura 3 – Emissão de CO e HC totais em função do número de rotação para 19% de excesso de ar.

A Figura 4 compara as emissões de CO e HC totais para os testes realizados nas condições de 19% e 42% de excesso de ar. Observa-se que, para o caso de menor excesso de ar, a tendência das emissões é aumentar com o aumento do número de rotação da câmara, um comportamento inverso do observado com o maior excesso de ar. O contato entre combustível e oxidante aparenta ser, portanto, mais importante na condição de maior excesso de ar, onde, a maior região de mistura, causada pelo aumento do número de rotação, diminuiu a emissão de CO e HC.

A Figura 5 apresenta a relação entre emissões HC/CO na saída da câmara, em função do número de rotação para excesso de ar de 19% e 42% , para o combustível com 30% de tolueno, e a mesma relação para os combustíveis com 30% e 39% de tolueno, mantido o excesso de ar de 42%. Observa-se que a relação HC/CO mantém uma tendência praticamente constante em relação ao número de rotação, independente, neste caso, das condições de excesso de ar e composição do combustível.

O tamanho da região de fluxo pistonado mostrou-se mais importante no que diz respeito à diminuição da emissão de poluentes na condição de menor concentração de oxigênio (baixo excesso de ar), pois o aumento do número de rotação aumenta a região de mistura dentro da

câmara e diminui a região onde o escoamento é mais próximo a um escoamento pistonado (Bizzo, Goldstein e Tardin, 1999).

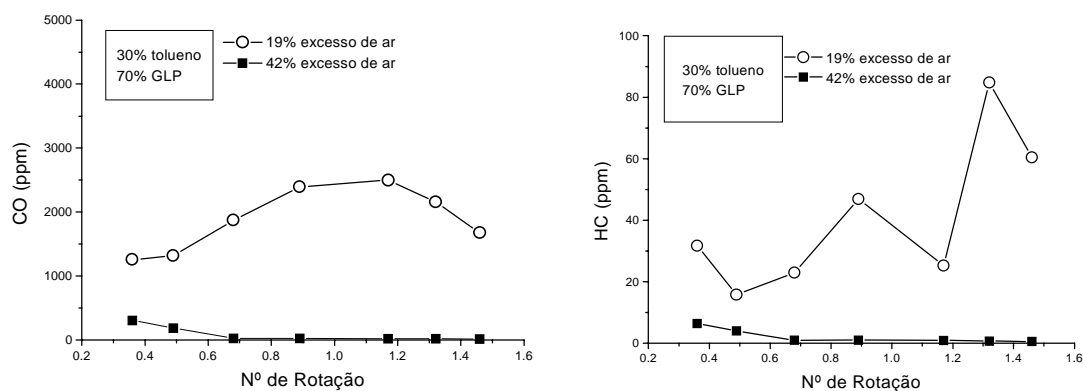


Figura 4 – Emissão de CO e HC totais em função do número de rotação e do excesso de ar.

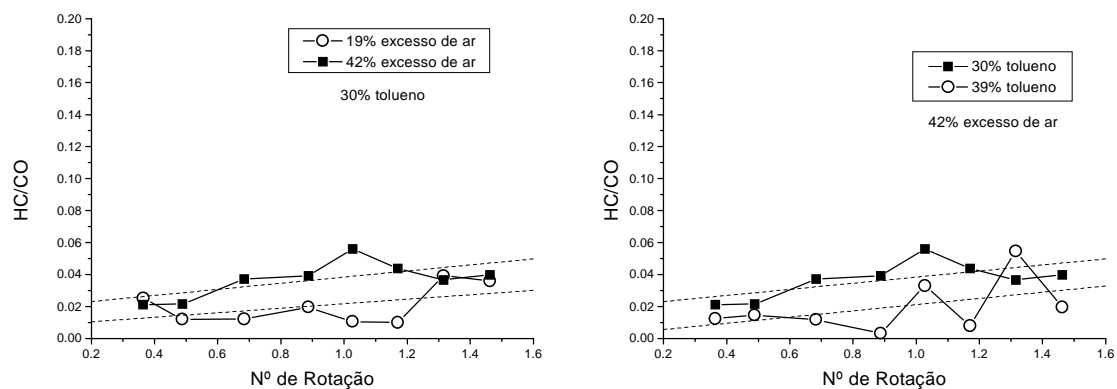


Figura 5 – Relação de emissão HC/CO em função do número de rotação, do excesso de ar e da composição do combustível.

A emissão de CO mostra-se, portanto, um bom indicativo das condições de incineração quando aplicada ao caso de hidrocarbonetos. La Fond *et al.* (1985) constataram que as emissões de CO e HC aumentaram quando a eficiência de destruição do resíduo diminuiu. Eles utilizaram uma mistura de compostos que incluía orgânicos clorados e testaram várias condições de incineração: com excesso e falta de ar, vazões diferentes de combustível e deficiência de atomização, sendo as condições fluidodinâmicas da câmara mantidas constantes, com número de rotação fixado em 1.

Em algumas situações, a emissão de CO aumentou antes que a eficiência de destruição aumentasse significativamente. No estudo de La Fond, a comparação foi feita entre as emissões de CO e HC em relação à fração remanescente dos resíduos, identificados por amostragem acumulativa e análise química na saída do reator. A fração remanescente inclui apenas os compostos identificados como PCOPs e não inclui PCIs que não sejam PCOPs. Na observação dos gráficos de La Fond constata-se que o aumento da emissão de HCs



acompanha o aumento da emissão de CO, embora esta análise não tenha sido feita pelos pesquisadores. As diferenças principais entre o estudo de La Fond *et al.* e este trabalho são:

- i. o estudo de La Fond *et al.* manteve constante o número de rotação enquanto neste trabalho o número de rotação foi variado;
- ii. as condições de incineração estudadas por La Fond *et al.* foram variadas no excesso de ar, na potência do reator e nas condições de atomização de líquido, enquanto que neste trabalho foi mantida constante a potência específica, o combustível foi introduzido vaporizado na câmara, e foram utilizadas duas condições de excesso de ar.

As observações de Wood *et al.* (1989) e Dempsey e Oppelt(1993) de que a taxa de emissão de CO pode aumentar sem uma diminuição significativa da  $E_d$  foram baseadas em situações operacionais anômalas, de duração limitada, tais como uma eventual alimentação excessiva de resíduo em um forno rotativo ou um defeito no sistema de nebulização. A medida da  $E_d$  ocorreu durante um intervalo de tempo longo o suficiente para, na prática, constituir um valor médio. As correlações da  $E_d$ , a partir da fração de compostos remanescentes, comparadas às emissões de CO e/ou HC são efetivamente comparações de um valor médio obtido durante um período de tempo, contra valores provenientes de um monitoramento contínuo de CO e/ou HC.

Neste trabalho, o tolueno representa o resíduo incinerado e a fração remanescente do tolueno está contida nas emissões totais de HC não queimados. A correlação entre as emissões de HC e CO sugere que ambos podem ser utilizados como indicativos em tempo real da eficiência da incineração. Nas condições testadas, a emissão de CO foi cerca de até 70 vezes maior do que a emissão de HC não queimado, enquanto Strehlow (1985) afirma que a relação entre as emissões de CO e HC é da ordem de 10:1, independente de quão completo seja o processo de combustão.

## 6. CONCLUSÕES

Os padrões de escoamento em câmaras secundárias de incineração, controlados pelo número de rotação do queimador, tem influência na emissão de poluentes gasosos e na eficiência de destruição de resíduos, como se verificou experimentalmente em testes sob diferentes condições de excesso de ar e composição do resíduo incinerado.

O aumento do número de rotação diminuiu as emissões de CO e HC na condição de maior excesso de ar (42%), e aumentou as emissões quando se utilizou a condição de menor excesso de ar (19%). O contato entre combustível e oxidante mostrou-se mais importante na condição de maior excesso de ar, onde, a maior região de mistura, causada pelo aumento do número de rotação, diminuiu a emissão de CO e HC.

A relação entre as emissões, CO/HC, mostrou-se relativamente constante, da ordem de 70:1, em diversas condições de excesso de ar e composição do combustível. Com o aumento do número de rotação, aumentou a emissão de HC em relação à CO, indicando que uma menor região de escoamento pistonado trouxe como consequência o aumento da emissão de combustível não queimado em relação à emissão de CO.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem à Fapesp – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro a este trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

Beér, J.M., e Chigier, N.A., 1972, “Combustion Aerodynamics”, Applied Sc. Publ., London, 264 pg.

- Beltagui, S.A., Maccallum, N.R.L., 1976, "The Modelling of Vane-Swirled Flames in Furnaces", *J.Inst. Fuel*, vol.69, pp.193-200.
- Beltagui, S.A., Maccallum, N.R.L., 1976, "Aerodynamics of Vane-Swirled Flames in Furnaces", *J.Inst.Fuel*, vol. 69, pp.183-193.
- Bizzo, W.A., Goldstein Jr., L. e Tardin Jr. P.R., 1999, Temperature and Gas Concentration Distributions in an Experimental Incinerator Combustion Chamber, *Proceedings of The Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment*, vol. 2, pgs 329-335, 12-15 de julho, Lisboa.
- Bowman, C.T., 1975, "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol.1,n.1,pp.33-45.
- Chang, D.P.Y. et alli, 1989, "Relationships Between Laboratory and Pilot-Scale Combustion of Some Chlorinated Hydrocarbons", *Environ. Prog.*, Vol.8,n°3,pp.152-162.
- Chang, D.P.Y., Mournighan, R.E. e Huffman, G.L., 1991, "An Equilibrium Analysis of Some Chlorinated Hydrocarbons in Stoichiometric to Fuel-rich Post-flame Combustion Environments", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 41, no.7, p.947-955.
- Chedaille, J., e Braud, Y., 1972, "Measurements in Flames", Edward Arnold(Publ.), London, 228 pg.
- Claypole, T.C., Syred, N., 1982, "The Stabilization of Flames in Swirl Combustors", *J. Inst. Energy*, march, pp.14-19.
- Cooper, C.D., Alley, F.C. e Overcamp, T.J., 1982, "Hydrocarbon Vapor Incineration Kinetics", *Environmental Progress*, vol.1, n.2, p.129-133.
- Cundy, V.A. et alli, 1991, Rotary Kiln Incineration of Dichloromethane and Xylene: A Comparison of Incinerability Characteristics Under Various Operating Conditions, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 41, p. 1084-94.
- Dellinger, B. e Hall, D.L., 1986, "Surrogate Compounds for Monitoring the Effectiveness of Incineration Systems", *J. of the Air Poll. Control Assoc.*, vol.36, no. 2, p.179-183.
- Dempsey, C.R. e Oppelt, E.T., 1993, Incineration of Hazardous Waste: A Critical Review Update; *Air&Waste*, vol. 43, p.25-73.
- Field, M.A. et alii, 1967, "Combustion of Pulverised Coal", *The British Coal Utilisation Research Assoc.*, Surrey, England, 413 p.
- Gilges, K., 1991, "Europe's Hazardous Waste Dilemma", *Chemical Engineering*, agosto, p.30-39.
- La Fond, R. et alii; 1985, "Evaluation of Continuous Performance Monitoring Techniques for Hazardous Waste Incinerators", *JAPCA*, vol. 35, n. 6.
- Lester, T.W. et alii; 1991, "Rotary Kiln Incineration. Comparison and Scaling of Field-Scale and Pilot-Scale Contaminant Evolution Rates from Sorbent Beds", *Env. Sci. Technology*, vol. 25, n. 6.
- Liu, F., Garbett, E.S., Swithenbank, J., 1992, "The Effects of a Single High-Velocity Jet on The Combustion of Pulverised Coal in a Small-Scale Furnace", *J.Inst.Energy*, vol.65, pp.24-30.
- Nasserzadeh, V. et alii; 1995, Measuring gas-residence times in large municipal incinerators, by means of a pseudo-random binary signal tracer technique; *J. of Inst. of Energy*; vol. 68, pp 106-120.
- Pratt, D.T., 1976, "Mixing and Chemical Reaction in Continuous Combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol.1, pp.73-86.
- Strehlow, R.A., 1985, "Combustion Fundamentals", pg.470, McGraw Hill, N. York, 555 p.
- Theodore, L., Reynolds, J., 1987, "Introduction to Hazardous Waste Incineration", John Wiley & Sons, N.York, 463 p.
- Wood, R.W. et alii, 1989, "Rotary Kiln Incinerators: The Right Regime", *Mechanical Engineering*, setembro, p. 78-81.

## TOTAL UNBURNED HYDROCARBON EMISSION IN A SECONDARY INCINERATION CHAMBER

**Waldir A. Bizzo** – bizzo@fem.unicamp.br

**Leonardo Goldstein Jr.** – leonardo@fem.unicamp.br

**André L. Cardoso**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

Caixa Postal 6122 – 13083-970 Campinas SP

**Paulo R. Tardin Jr.** – paulotardin@usf.com.br

Universidade São Francisco, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

13251-900 - Itatiba SP

***Abstract.** Thermal incineration has been in use for the treatment and disposal of hazardous wastes. The secondary combustion chamber plays an important role on controlling the efficiency of waste destruction and the emissions of products of incomplete combustion. For monitoring the process in real time, a continuous analysis of total hydrocarbons (THC) and CO is used.*

*This work studied the effect of the swirl number in the CO and THC emissions, using three toluene concentration in the incinerated waste and two excess air values. Tests were performed experimentally in a cylindrical horizontal combustion chamber, with thermal insulation, a variable swirl burner, a sample gas probe and a continuous THC analyzer.*

*Increasing the swirl number reduced the THC and CO emissions for an air excess of 42%, but increased the emissions for the air excess of 19%.*

*The size of the plug flow region influenced the combustion efficiency, and the effects were different according to the air excess and the toluene concentration in the waste. The relation CO/THC remained nearly unchanged during the tested conditions.*

***Keywords:** combustion; incineration; pollution; carbon monoxide; total hydrocarbons.*