

FORMAÇÃO E CONTROLE DA FULIGEM EM SISTEMAS DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL - UMA AVALIAÇÃO CRÍTICA

Alex Álisson Bandeira Santos

Leonardo Goldstein Jr.

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, 13083-970, Campinas, SP, Brasil.

E-mail: absantos@fem.unicamp.br

Resumo

O estudo da formação e controle da fuligem na combustão é uma área de interesse da atividade industrial, pois a fuligem tem influência na eficiência energética dos processos e sua emissão constitui um problema ambiental. Este trabalho faz uma análise crítica das informações disponíveis, avaliando e abrindo discussão sobre modelos e teorias vigentes, enfocando os mecanismos e as variáveis que atuam na formação de fuligem, bem como os mecanismos de controle, em especial, a utilização de aditivos químicos.

Palavras-chave: Fuligem, formação, controle, combustão, aditivos.

1. INTRODUÇÃO

A formação da fuligem em sistemas de combustão constitui tema de interesse da engenharia, pois a presença da fuligem pode causar uma perda na eficiência energética dos processos, e constituir um problema ambiental. Apesar dos estudos sobre os mecanismos de formação e controle da fuligem existentes, o assunto ainda continua aberto, e demandando novos trabalhos.

Glassman (1987) define a fuligem como o material particulado sólido proveniente da combustão de combustíveis gasosos; para combustíveis líquidos o material sólido produzido é denominado cenosferas.

Embora existam restrições para a emissão de fuligem em plantas industriais, as partículas de fuligem podem ter efeitos tanto benéficos como prejudiciais. Assim, se, por exemplo, a presença de particulado em turbinas a gás pode afetar severamente o tempo de vida das pás, e, em motores diesel, pela absorção de materiais cancerígenos, constituir um risco para a saúde humana, em contrapartida, em equipamentos térmicos industriais, a presença de fuligem aumenta a transferência de calor por radiação térmica da chama para as superfícies de troca.

Este trabalho organiza e faz uma avaliação crítica das informações disponíveis sobre a fuligem em sistemas de combustão industrial, enfocando as características das partículas de fuligem, os mecanismos de formação e suas peculiaridades, a influência de parâmetros físicos, como a temperatura e a pressão, e de parâmetros químicos, como os aditivos químicos.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Características da Fuligem

As palavras fuligem e carbono têm sido usadas para descrever os materiais particulados sólidos com estrutura carbônica produzidos na combustão, alguns dos quais possuem apreciável quantidade de hidrogênio, além de outros elementos e compostos que podem ter sido obtidos a partir da estrutura original do combustível. Segundo Haynes e Wagner (1981), as partículas de fuligem contêm em torno de 10% de hidrogênio em sua estrutura, e um percentual até maior quando são jovens.

Glassman (1987) comenta que as propriedades da fuligem são pouco afetadas pelo tipo de chama – chamas difusas ou pré-misturadas –, natureza do combustível queimado e condições nas quais foi produzida. A quantidade de fuligem, no entanto, varia apreciavelmente com o tipo de chama. Chamas difusas invariavelmente produzem mais fuligem do que chamas pré-misturadas. Os diâmetros das partículas de fuligem variariam de 10 a 200 $\times 10^{-3}$ μm , sendo mais encontrados na faixa de 10 a 50 $\times 10^{-3}$ μm .

2.2. Mecanismos de Formação da Fuligem

Os mecanismos de formação da fuligem em chamas consistem nos passos sequenciais, ou em paralelo, que regem a formação da fuligem. Há um grande volume da literatura sobre o assunto, que leva a crer que a formação se dá conforme o esquema mostrado na Fig. 1.

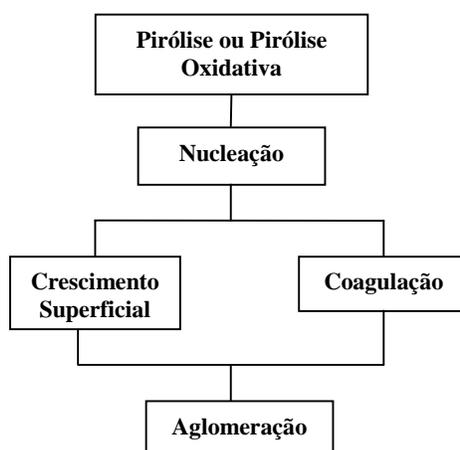


Fig. 1. Processo de Formação da Fuligem (Smith, 1981).

- **Pirólise**

A pirólise pode ser considerada como um processo que precede a formação da fuligem no qual ocorreriam reações de quebra das moléculas do combustível, com extensa decomposição e rearranjo atômico das moléculas.

Smith (1981) comenta que, as reações de pirólise são geralmente endotérmicas, e altamente dependentes da temperatura. Na presença de algum tipo de oxidante: O, O₂ ou OH, haveria um aumento significativo das taxas de reação – pirólise oxidativa.

Segundo Glassman (1987), a formação da fuligem dependeria das condições operacionais, do tipo de chama e se a pirólise é ou não oxidativa. Os produtos da pirólise gerariam, por sua vez, os elementos precursores da fuligem.

Numa ampla variedade de combustíveis alifáticos e aromáticos, a presença do acetileno (etino) é dominante em altas temperaturas, e em condições de pirólise oxidativa. Uma quantidade considerável de evidência experimental indica que o acetileno seria a última

espécie estável a ser produzida antes de que partículas de fuligem sejam detectadas, sinalizando o acetileno como um importante intermediário no processo de formação de fuligem. Todavia, a tendência de algumas moléculas de combustível, notadamente as aromáticas, de produzir outros produtos além do acetileno, em condições de baixa temperatura e de ausência de oxigênio, levam à implicação de que o tipo de combustível teria um efeito na formação do precursor.

- **Nucleação**

A nucleação envolve a formação de espécies embrionárias da fuligem, conhecidas como núcleos da fuligem. Os hidrocarbonetos precursores destes núcleos seriam estáveis o suficiente para resistir às altas temperaturas encontradas nos sistemas de combustão, não sendo consumidos na combustão e garantindo, portanto, a formação dos núcleos.

Alguns estudos colocam o acetileno e poliacetilenos como compostos importantes na nucleação da fuligem. XU *et al.* (1998) afirmam que nas chamas pré-misturadas, a fuligem seria formada principalmente a partir do acetileno, por ser ele uma das espécies de hidrocarboneto gasoso mais abundante nas regiões de formação da fuligem. Todavia existem controvérsias sobre o assunto.

Haynes e Wagner (1981) encontraram grandes quantidades de acetileno em todos os testes com chamas de metano e etileno (eteno) com oxigênio, constatado como proveniente do combustível. Este aumento do acetileno na chama não aumentou sua luminosidade, parâmetro este identificador da formação de fuligem, o que levou esses autores a concluir que o acetileno não seria um precursor da fuligem.

Bartok (1991) comentou as diferenças na nucleação de chamas de combustíveis aromáticos e alifáticos. Em chamas de acetileno, que é um combustível alifático, o início da formação de fuligem ocorreria como resultado de grande concentração de radicais poliacetilenos presentes no fim da zona de reação primária, onde sua concentração tem um máximo. Em chamas de benzeno, que é um combustível aromático, acredita-se que o primeiro núcleo seria decorrente da alta concentração de compostos aromáticos além de acetilenos.

Segundo Kennedy (1997), as espécies aromáticas cresceriam pela adição de outros aromáticos e espécies menores para formar poli-aromáticos (PAH). O crescimento continuado dos PAH produziria, eventualmente, as menores partículas identificáveis de fuligem.

Qual ou quais seriam, portanto, os precursores da fuligem? Variariam eles com o tipo do combustível? Seria o acetileno o principal precursor, dada sua estabilidade em altas temperaturas? Estas perguntas ainda precisam ser respondidas para um melhor entendimento do processo de nucleação da fuligem.

- **Crescimento Superficial e Coagulação**

Após o processo de nucleação, dois processos de crescimento da fuligem ocorrem em paralelo: o crescimento superficial e a coagulação.

Uma vez que os núcleos são formados, a produção da fuligem aumenta pelo crescimento superficial, que envolve o ataque de espécies na fase gasosa à superfície da partícula da fuligem, com incorporação destas espécies no seu interior, evidenciando a natureza química do processo. As reações de crescimento superficial produzem um aumento na massa de fuligem, mas o número de partículas permanece inalterado no processo. O oposto ocorre no crescimento por coagulação, no qual as partículas colidem inelasticamente, decrescendo em número, enquanto a massa de fuligem permanece constante.

O crescimento da partícula – aumento do diâmetro – é resultado das reações simultâneas de crescimento superficial e da coagulação.

Para chamas de acetileno/oxigênio em pressões baixas, Homann e Wagner (1967) sugeriram que as espécies que começam o ataque à superfície da partícula seriam o acetileno e os poliacetilenos. Smith (1981) comentou que a coagulação seria um processo essencialmente físico, e sua taxa poderia ser calculada a partir das hipóteses:

- .Partículas de fuligem estão em regime molecular livre;
- .Cada colisão entre duas partículas resulta em coagulação, e
- .Todas as partículas são esféricas.

Como validação das hipóteses acima, Smith (1981) aponta o estudo de Graham (1976), no qual a taxa de coagulação, expressa em termos da taxa de diminuição da densidade de partículas, n [cm^{-3}], é dada por:

$$\frac{-dn}{dt} = \frac{5}{6} \times k_{tn} \times \phi \times n^{11/6} \quad (1)$$

onde

$$k_{tn} = \frac{5}{12} \times \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/6} \times \left(\frac{6kT}{\rho}\right)^{1/2} \times G' \times \alpha \quad (2)$$

sendo ϕ = concentração da fuligem [cm^3/cm^3]; k = constante de Boltzmann [$(\text{cm/s})^2\text{g}/\text{K}$]; ρ = densidade da partícula [g/cm^3]; G' = fator que quantifica as forças de dispersão interplanares, α é uma função da distribuição dos tamanhos das partículas, e T é a temperatura [K].

• Aglomeração

Depois que o crescimento das partículas cessa, ocorreriam colisões inelásticas das partículas esféricas de fuligem, causando a formação de estruturas em forma de correntes, constituindo o que se chamou de aglomeração. Segundo Kennedy (1997), a fuligem emitida nos combustores estaria usualmente na forma de aglomerados.

Wersborg *et al.* (1973) observaram que, não havendo crescimento ou nucleação durante a aglomeração, a taxa de aglomeração deveria ser proporcional ao quadrado da densidade do número de partículas (n^2):

$$\frac{-dn}{dt} = \frac{1}{2} \times K \times n^2 \quad (3)$$

onde

$$K = 16 \times a^2 \times y \times \left(\frac{\pi kT}{m}\right)^{1/2} \quad (4)$$

sendo a = raio da partícula [μm]; y = fator que quantifica as forças de dispersão interplanares e K = constante de coagulação do sistema [cm^3/s].

2.3. Influência de Parâmetros Físicos na Formação da Fuligem

Temperatura

A temperatura é o parâmetro físico que mais influencia a formação da fuligem.

Millikan (1962) verificou que, embora a taxa de pirólise aumente com a temperatura, a taxa de ataque do radical hidroxila (OH) aos acetilenos precursores aumenta ainda mais rapidamente, havendo uma competição entre a formação e a oxidação da fuligem. Em chamas pré-misturadas, observa-se a existência de grande quantidade desse radicais na região de pirólise e, em consequência, com o aumento da temperatura, há uma menor formação de fuligem. Por outro lado, nas chamas difusas não há a presença de oxidantes na região de

pirólise do combustível e, em consequência, quanto maior a temperatura de chama, maior será a taxa de pirólise, e maior a tendência a formação de fuligem. Portanto, a temperatura teria efeitos opostos, dependendo do tipo de chama.

Pressão

Segundo Glassman (1977), em todos os tipos de chama, quanto menor a pressão, menor a tendência de formação de fuligem. A sensibilidade à pressão seria coerente com as menores taxas de reação do processo de nucleação, que ocorreriam à medida que se diminua a pressão. Em 1987, ele afirmou que o efeito da variação da pressão seria decorrente do efeito da temperatura do sistema. Resultados obtidos em chamas difusas teriam mostrado um aumento da produção de fuligem com o aumento da pressão, o que, em realidade, seria devido ao aumento de temperatura inerente ao aumento de pressão (sob condições de volume constante).

Tipos e Regimes de Chama

As chamas difusas produzem maior quantidade de fuligem do que as chamas pré-misturadas. Isso é explicado pela existência de elementos oxidantes na região onde ocorre a pirólise, conforme mencionado anteriormente.

Em chamas laminares difusas, a variação da concentração da fuligem ocorre ao longo do eixo da chama. Isso seria explicado pela rápida formação da fuligem, seguida por sua lenta oxidação nas regiões onde os elementos oxidantes estão disponíveis.

Glassman (1977) comenta que em chamas difusas turbulentas a formação de fuligem seria drasticamente reduzida. Altos níveis de turbulência rapidamente misturariam o combustível e o oxidante, aumentando a oxidação dos precursores da fuligem. Do mesmo modo, a tendência de formação de fuligem decresceria em chamas pré-misturadas turbulentas.

Segundo Bartok (1991), a formação da fuligem em chamas turbulentas parece ser controlada pelo perfil da temperatura na chama, particularmente na região de oxidação, de maneira análoga ao que ocorreria em chamas laminares.

2.4. Influência de Parâmetros Químicos na Formação da Fuligem

Tipo de Combustível

A tendência a formação da fuligem depende do tipo de combustível utilizado.

Em chamas pré-misturadas, que utilizam o ar como elemento oxidante na mistura, a tendência de formação da fuligem com o tipo do combustível é dada, em ordem decrescente, por Glassman (1987):

Aromáticos > álcoois > parafínicos > olefínicos > acetileno.

Para chamas difusas a ordem é diferente, como apresentada a seguir:

Aromáticos > acetileno > olefínicos > parafínicos > álcoois.

O autor comenta que se as chamas pré-misturadas são mantidas em condições de mistura muito ricas de combustível e operadas acima da taxa crítica de formação da fuligem – relação ar/combustível na qual tem início a formação da fuligem – a influência do tipo de combustível se aproxima da que ocorre com chamas difusas, já que haveria um aumento substancial da pirólise frente à oxidação, fato este característico de chamas difusas.

Ligações Químicas

As ligações químicas consideradas são as ligações C-C entre os elementos carbono encontradas nos hidrocarbonetos.

Segundo Takahashi *et al.* (1984), a taxa crítica de formação da fuligem a uma temperatura de chama de 2200 K é função apenas do número de ligações C-C, na qual uma ligação dupla é contada como dois e uma tripla como três:

$$\log \psi_{c,2200K} = a_1 \times N_{c-c} + a_0 \quad (5)$$

onde N_{c-c} é o número de ligações C-C, a_1 e a_0 são constantes independentes do tipo de combustível ($a_1 = -0,02173$ e $a_0 = 0,1372$), e ψ_c é a taxa crítica de formação da fuligem, para uma dada relação ar / combustível. Esta equação pode ser generalizada em função da temperatura adiabática de chama (T_f), e pode ser expressa por:

$$\log \psi_c = a_2 \times \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{2200} \right) + \log \psi_{c,2200K} \quad (6)$$

onde o coeficiente a_2 foi obtido para vinte e um combustíveis, variando na faixa de $-1,95 \times 10^3$ a $-0,562 \times 10^3$, correspondendo a uma aparente energia de ativação em torno de 3 a 9 kcal/mol.

Glassman (1987) comenta que a escolha do número de ligações C-C como parâmetro para determinação da taxa de formação de fuligem, teria um significado físico. A análise é feita levando em conta as taxas de pirólise do combustível e do ataque dos radicais hidroxila (OH) aos precursores da fuligem. O número de ligações C-C seria uma medida do tamanho da molécula do combustível e da relação carbono/hidrogênio (C/H). Assim, quanto maior a molécula, maior a taxa de pirólise e maior a relação C/H, resultando numa menor concentração relativa de OH na chama devido à redução dos radicais H, que formam os radicais OH. Isto aumentaria a produção de fuligem – pirólise frente a oxidação.

Oxidação da Fuligem

Um dos parâmetros de controle da fuligem é a oxidação de partículas de fuligem e seus precursores em regiões onde espécies oxidantes estão presentes.

Millikan e Foss (1962) encontraram evidências de que a formação da fuligem em chamas pré-misturadas somente poderia ocorrer após a concentração de OH ter alcançado um valor de equilíbrio. Antes disso, os radicais OH seriam inibidores da fuligem, pela oxidação dos precursores e partículas embrionárias.

Smith (1981) apontou pequenas ambiguidades encontradas nas informações disponíveis para a explicação do mecanismo de oxidação da fuligem. Um dos aspectos diz respeito a qual espécie oxidante predominaria no processo. Fenimore e Jones (1969) atribuíram a oxidação da fuligem aos radicais O e OH, enquanto outros autores, como Appleton, 1973, e Wagner, 1978, a atribuíram diretamente ao O_2 .

Aditivos Químicos

Estudos recentes têm revelado que os efeitos de aditivos químicos na formação da fuligem em chamas podem ser bastante complexos, até mesmo quando o aditivo é inerte. Os aditivos podem ter influência na formação da fuligem através de efeitos na concentração do combustível, na temperatura, no tempo de residência e no mecanismo químico; esta influência pode ocorrer na nucleação, no crescimento ou em estágios de oxidação. Esses efeitos são

fortemente acoplados à maneira de introdução dos aditivos, não somente indiretamente, através da diluição do combustível e, conseqüentemente, modificação do campo de temperatura e do tempo de residência, como também diretamente, através da participação dos aditivos no mecanismo químico.

Glassman (1977) comenta que o efeito de diluentes inertes na formação de fuligem é coerente com a diminuição da pressão parcial dos reagentes precursores da fuligem, o que diminui sua formação.

Segundo Haynes *et al.* (1982), a presença do SO₃ em chamas pré-misturadas tem o mesmo efeito de outros aditivos sulfonados, reduzindo a formação da fuligem. Por outro lado, Glassman (1987), relatou que o aditivo SO₃ seria conhecido por suprimir a fuligem em chamas difusas e por aumentar a fuligem em chamas pré-misturadas. Nas chamas difusas, a diminuição seria explicada em termos da influência dos radicais H, formados durante a pirólise do combustível, que reagiriam com o SO₃, formando radicais OH ($H + SO_3 \Rightarrow OH + SO_2$), que atacariam os precursores da fuligem. Em chamas pré-misturadas o efeito seria oposto, possivelmente pela dissociação do SO₃ em SO₂, que removeria os radicais H da chama ($SO_2 + H + M \Rightarrow HSO_2 + M$), reduzindo a formação de radicais OH e, assim, aumentando a produção de fuligem. Bartok (1991) também tratou do assunto para comentar os resultados conflitantes sobre a influência do SO₃.

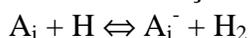
Segundo Mitchell e Miller (1989), aditivos facilmente ionizáveis, como Cs, K, Na e Ba, têm sido considerados como inibidores efetivos da formação de fuligem. Essa ação seria explicada em termos de reações íons-moléculas, onde os aditivos sofreriam ionização na chama e os íons formados neutralizariam os íons precursores da fuligem, inibindo sua formação. Outras pesquisas sugerem que estes aditivos alterariam as cargas elétricas das partículas menores de fuligem, o que inibiria seu crescimento por aglomeração, devido à ação das forças de repulsão geradas entre as partículas de mesma carga, facilitando o ataque oxidativo nessas partículas.

Os mesmos autores afirmaram que a adição de Mg em chamas difusas causaria um aumento dos elétrons livres, mas com pouco efeito na formação da fuligem. Essa constatação vai contra a validade da proposição de um mecanismo iônico de produção de fuligem, segundo a qual elétrons poderiam se recombinar com os íons precursores da fuligem encontrados na chama, reduzindo a formação da fuligem.

Segundo Du *et al.* (1995), o efeito da adição de N₂ em chamas difusas seria devido à redução da concentração do combustível, bem como da temperatura, situações que concorrem para a diminuição da formação de fuligem.

Com referência ao comportamento da adição de H₂ em chamas pré-misturadas, Haynes *et al.* (1982) comentaram que, mesmo reduzindo a taxa crítica de C/O, o H₂ não apresentou influência na concentração de fuligem na chama, sendo que a adição de 3% H₂ não afetou significativamente a produção da fuligem.

Frenklach (1988) propôs o mecanismo de crescimento dos PAH, um dos possíveis precursores da fuligem, por reações de subtração de H e adição de acetileno (C₂H₂). O modelo mostra que para regimes de alta temperatura, onde o [H₂] é maior ou comparável a [C₂H₂], e em regimes de baixa temperatura, onde [C₂H₂] << [H₂], a taxa de crescimento varia com a relação [H]/[H₂], onde a dependência inversa em relação a [H₂] seria devida a uma reação reversa à de subtração de H:



onde A_i denota uma molécula aromática contendo i cadeias aromáticas e A_i⁻ denota um radical aromático. A adição de H₂ reduziria o crescimento dos PAH, mesmo com o aumento de temperatura decorrente da adição de H₂. Em estudos de pirólise do acetileno, Frenklach *et al.* (1988) verificaram que a adição de H₂ reduziu substancialmente a formação da fuligem, efeito já antecipado pelo seu modelo.

Kasper *et al.* (1999) relataram os efeitos da adição do composto $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ em chamas difusas de metano, que levaram a um surgimento precoce das partículas de fuligem. Partículas de óxido de ferro formadas nessa adição teriam servido como fonte de área superficial para o crescimento da fuligem. Os autores também relataram que em chamas difusas de acetileno, a adição de $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ também formaria óxidos de ferro, que são incorporados às partículas de fuligem, e agiriam como catalisadores da oxidação da fuligem no topo da chama.

3. CONCLUSÕES

- O presente trabalho organiza e analisa as informações disponíveis acerca da formação da fuligem na combustão. Foi aberta a discussão dos aspectos de maior importância na formação da fuligem, como a formação dos precursores, bem como a sua oxidação e o efeito do uso de aditivos. Estabeleceu-se a existência de pontos controversos, que requerem estudos adicionais:
- O composto C_2H_2 como o único precursor da fuligem;
- O radical OH como responsável pela sua oxidação;
- A influência da pressão, e
- O efeito do SO_3 em chamas pré-misturadas.

REFERÊNCIAS

- Appleton, J.P. Soot Oxidation Kinetics at Combustion Temperatures, 41st Meeting on Atmospheric Pollution by Aircraft Engines, AGARD Propulsion and Energetics Panel, London, p. 20.1 – 20.11, 1973.
- Bartok, W., Fossil and Fuel Combustion, Wiley Interscience Publication, New York, p. 261-326, 1991.
- Du, D.X., Axelbaum, R.L. e Law C.K. Soot Formation in Strained Diffusion Flames with Gaseous Additives. *Combustion and Flame*, v. 102, p. 11-20, 1995.
- Fenimore, C.P. e Jones, G.W., *Combustion and Flame*, 13, 303, 1969.
- Frenklach, M., Yuan, T. e Ramachandra, M.K. Soot Formation in Binary Hydrocarbon Mixtures. *Journal of Energy & Fuels*, v. 2, p. 462-480, 1988.
- Frenklach, M. On the Driving Force of PAH Production. Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p.1075-1082, 1988.
- Glassman, I., *Combustion*, Academic Press Inc., Orlando, 1^a ed., 1977.
- Glassman, I., *Combustion*, Academic Press Inc., Orlando, 2^a ed., p. 360-385, 1987.
- Graham, S.C. The Collisional Growth of Soot Particles at High Temperatures. Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 663-669, 1976.
- Haynes, B.S. e Wagner, H. G. Soot Formation. *Progress in Energy and Combustion Science*, Great Britain, v. 7, p. 229-273, 1981.
- Haynes, B.S., Jander, H., Matzing, H. e Wagner, H. G. The Influence of Gaseous Additives on the Formation of Soot in Premixed Flames. In: Nineteenth Symposium (International) on Combustion, 1982, p. 1379-1385.
- Homann, K.H e Wagner, H.G. Some New Aspects of the Mechanism of Carbon Formation in Premixed Flames. Eleventh Symposium (International) on Combustion, p. 371-379, 1967.

- Kasper M., Sattler, K., Siegmann, K., Matter, U. e Siegmann H.C. The Influence of Fuel Additives on the Formation of Carbon During Combustion. *Journal of Aerosol Science*, v. 30, p. 217-225, 1999.
- Kennedy, I.M. Models of Soot Formation and Oxidation. *Progress in Energy and Combustion Science*, Great Britain, v. 23, p. 95-132, 1997.
- Millikan, R.C. e FOSS, W.I. Non-equilibrium Effects in Soot Formation Deposition. *Combustion and Flame*, v. 6, p. 210-211, 1962.
- Millikan, R.C., Non-Equilibrium in Carbon Formation in Flames. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 66, p. 794-799, 1962.
- Mitchell, J.B.A. e Miller, D.J.M. Studies of the Effects of Metallic and Gaseous Additives in the Control of Soot Formation in Diffusion Flames. *Combustion and Flame*, v. 75, p. 45-55, 1989.
- Smith, O.I. Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particulate Emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, Great Britain, v. 7, p. 275-291, 1981.
- Takahashi, F., Bonini, J. e Glassman, I. Further Experiments and Analysis of the Sooting Tendency of Premixed Flames. *Chemical and Physical Processes in Combustion*, p. 98.1-98.4, 1984.
- Wagner, H.G. Seventeenth Symposium (Int.) on Combustion, 3, 1978.
- Wersborg, B.L., Howard, J.B. e Williams, G.C. Fourteenth Symposium (International) on Combustion, 929, 1973.
- Xu, F., Lin, K.C. e Faeth G.M. Soot Formation in Laminar Premixed Methane/Oxygen Flames at Atmospheric Pressure. *Combustion and Flame*, v. 115, p. 195-209, 1998.