

Estudo Paramétrico sobre Incandescência em Biomassa

Elaine Reis de Carvalho Rabelo

Departamento de Energia, UNESP – Campus de Guaratinguetá
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, CEP 12516-410
e-mail: elaine@cptec.inpe.br

João Andrade de Carvalho Jr. (*)

Departamento de Energia, UNESP – Campus de Guaratinguetá
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, CEP 12516-410
e-mail: joao@feg.unesp.br
(*) Autor correspondente

Carlos Alberto Gurgel Veras

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília
Asa Norte, Brasília, DF, CEP 70910-900
e-mail: gurgel@unb.br

Marco Aurélio Ferreira

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Rod. Presidente Dutra, km40, Cachoeira Paulista, SP, CEP 12630-000
e-mail: marco@lcp.inpe.br

David V. Sandberg

Forest Service, U.S. Department of Agriculture
3200 SW Jefferson Way, Corvallis, OR 97331
e-mail: David.Sandberg@orst.edu

Resumo. Este trabalho trata da combustão sem chama, denominada incandescência, em espécimes de madeira. O estágio de incandescência é muito comum em queimadas florestais, ocorrendo após o período de chamas, quando a biomassa de tamanho maior permanece fumegando por até vários dias. Este material, em estado de incandescência, é foco permanente de emissão de gases tóxicos bem como de re-ignição de biomassa não queimada. Os objetivos principais do trabalho são: verificar experimentalmente os parâmetros que favorecem o início e a continuidade do processo de incandescência e quantificar as concentrações de CO, CO₂, O₂ e HC durante a queima. Também serão determinadas temperaturas, em diferentes pontos dos corpos de prova, a velocidade da frente de incandescência e, finalmente, a taxa de queima. Os ensaios foram feitos em um tubo de aquecimento de 1,80 m de comprimento por 0,60 m de diâmetro, conectado a um controlador de temperatura, com vazões de ar de combustão previamente estabelecidas. Além da vazão de ar, outros parâmetros também variaram, como a temperatura interna do tubo, a espécie da madeira, o volume e a umidade da amostra. Para otimizar a execução dos testes foi aplicada a técnica de “Projeto de Experimentos”. Os ensaios de laboratório foram comparados com os resultados obtidos em uma queimada realizada no interior da floresta Amazônica, no norte do estado de Mato Grosso.

Palavras chave: Combustão em Madeira, Incandescência, Queimadas em Florestas Tropicais.

1. Introdução

A incandescência é definida como um modo de combustão em que se verificam degradação térmica (pirólise) e carbonização de material virgem, sem chama na fase gasosa, com emissão de fumaça e radiação intensa no infravermelho. A zona de reação apresenta, quase que invariavelmente, uma camada de cinzas. Muitos materiais podem sustentar a combustão por incandescência. Dentre eles incluem-se: carvão vegetal, algodão, cinzas, papel, espumas de poliuretano, materiais de isolamento térmico e madeira. Estes materiais devem apresentar, em comum, uma estrutura porosa de forma que a área da zona de reação é muitas vezes maior que a área projetada e, após a degradação térmica, o produto remanescente deve ser majoritariamente carbono.

A incandescência é sustentada, por reações heterogêneas (gás-sólido) em regiões onde o oxigênio está presente. O calor produzido nesta zona de reação é conduzido pelo sólido e dois outros fenômenos são observados como

consequência do aumento da temperatura local, secagem e pirólise (Carvalho Jr. et al., 2001; Carvalho et al. 2002). A degradação térmica produz gases tóxicos, principalmente alcatrão e monóxido de carbono, entre outros. A zona de reação propaga-se, via de regra, lentamente podendo não ser detectada por longos períodos de tempo, para num dado instante, sofrer transição para chama.

Normalmente, a incandescência difere notadamente dos demais tipos de chama, por exemplo, a temperatura de “smolder” é baixa, variando entre 350 e 700 °C em função do material queimado e das condições ambientes. A velocidade de propagação da frente de chama é, em média, da ordem de 10^{-2} cm/seg. Incandescência, portanto, tende a ser muito menos intensa que a queima dos voláteis, provenientes da degradação térmica da correspondente fonte de biomassa. Nas últimas décadas, houve um aumento permanente no uso de novos materiais como polímeros sintéticos, têxteis, madeiras e outros, com diversificada aplicação (materiais de construção, móveis, roupas, etc.). Conseqüentemente, torna-se necessário um estudo mais fenomenológico do comportamento destes materiais em incêndios e a contribuição deles para o perigoso alastramento do fogo. Estudos teóricos e experimentais têm sido realizados por pesquisadores de diferentes disciplinas, notadamente das engenharias, objetivando a caracterização do comportamento dos diversos materiais sob diferentes condições de incêndio (ignição, incandescência, chama e propagação da chama). A modelagem da queima de substratos sólidos, principalmente o processo de incandescência realizada por diferentes pesquisadores é revista por Ohlemiller (1985). Porém, mais trabalho é necessário para estabelecer uma base de conhecimento inclusivo e preventivo que poderia ser usado por cientistas químicos e de materiais no projeto de materiais com comportamentos específicos sob diferentes condições de incêndio. No presente, uma análise realística ou modelo numérico capaz de usar as propriedades termoquímicas intrínsecas de materiais para prever diferentes aspectos de seus desempenhos no fogo (flamabilidade, calor perdido, geração de fumaça, toxicidade, etc.) não é disponível. O problema não é puramente químico, ocorrendo forte influência de fatores físicos. Estes incluem a área da superfície por unidade de volume do combustível, permeabilidade do combustível para o fluxo do gás, a taxa de perda de calor da zona de reação e o tipo de fonte de ignição (Ohlemiller, 1985).

Estatísticas mostram que 75% de incêndios em habitações podem queimar sem chama gasosa visível em seus estágios iniciais, seguido somente mais tarde por chama (National Fire Protection Association, 1963); sendo o cigarro uma das causas mais comuns de incêndios residenciais.

A queima de um cigarro é um exemplo familiar de combustão incandescente, ele é também um dos mais comuns iniciadores da incandescência em outros materiais, especialmente artigos de tapeçaria e de cama. Um cigarro também tem várias características comuns com os principais materiais que queimam sem chama. As partículas de combustível divididas finamente fornecem uma grande área de superfície por unidade de massa de combustível, o que facilita o ataque da superfície pelo oxigênio. A natureza permeável dos agregados das partículas de combustível permite o transporte do oxigênio para o local de reação por difusão e convecção. Ao mesmo tempo em que agregados de partícula formam isolantes térmicos que minimizam perdas de calor, permitindo sustentar a combustão, ainda que a taxa de liberação de calor seja de baixa magnitude.

Neste trabalho descreve-se a investigação do processo de incandescência desenvolvido em troncos de madeira. O estudo foi conduzido para melhor compreender o mecanismo, na tentativa de obter uma base racional para prevenção, detecção e controle do processo.

2. Equipamentos e Procedimento Experimental

2.1. Ensaio de Laboratório

Para iniciar e manter o processo de incandescência das amostras foi desenvolvido um forno elétrico. Tal equipamento, cujo esquema é mostrado na Figura 1, foi montado com 7 resistências tipo coleira, que operavam em tensão de 220 V, fornecendo uma potência de 9000 W. As dimensões do forno são 60 cm de diâmetro interno e 180 cm de comprimento. O material utilizado na construção foi o aço inox 304 (chapas de 2 mm). O isolamento do tubo para reduzir as perdas de calor foi feito em manta de fibra cerâmica, marca Carbolane Z; posteriormente o mesmo foi revestido com fita adesiva de substrato de alumínio. Ao longo do forno de ensaios foram instalados seis visores (três de cada lado), de boro-silicato de 175 mm de diâmetro, para que a frente de incandescência pudesse ser observada durante os ensaios.

Para provocar a incandescência na amostra foi utilizado um queimador infravermelho (marca Jackwal, potência de 1200 kcal/h). A ignição dos troncos era realizada em uma das faces, ocasionando queima por incandescência na direção longitudinal (semelhante à queima do cigarro). Como na direção longitudinal do tronco tem-se uma maior condutividade térmica e uma maior permeabilidade, o processo de incandescência ocorre com mais facilidade nesta direção e, além disso, este método representa com mais fidelidade o fenômeno ocorrido nas florestas. Em alguns testes com queimador infravermelho, as resistências não permaneceram ligadas e, em outros, elas foram utilizadas apenas para manter o interior do forno aquecido com temperatura não superior a 200 °C.

Logo na saída de gases foi instalado um trocador de calor (“banho de gelo”) para condensar o alcatrão, retendo-o em um recipiente para posteriormente ser analisado através de cromatografia. Para garantir a ausência do alcatrão na linha de análise de gases, foi instalado também, um filtro de areia lavada, bloqueando totalmente a passagem do alcatrão, sem alterar a composição dos gases, conforme ilustra a Figura 2.

Uma sonda coletava os gases para o analisador de gases modular, da marca Sun, modelo MGA 1200. É uma unidade compacta que afere as concentrações de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e hidrocarbonetos não queimados (UHC), através de técnica infravermelha não dispersiva.

Sete termopares tipo K (cromel-alumel) e uma sonda para coleta dos gases de combustão foram instalados. Um dos termopares foi conectado a um controlador de temperatura que permite fixar a temperatura final do forno em um patamar, outro foi conectado na saída dos gases do banho de gelo para garantir a temperatura mínima de entrada dos gases no analisador e os demais foram conectados ao corpo de prova. Na entrada do forno foi instalada uma tampa, no formato de um cone, acoplada a uma mangueira com um rotâmetro para controlar e medir a vazão de ar. O ar de combustão foi fornecido por um compressor radial, marca IBRAM, modelo CR-6.

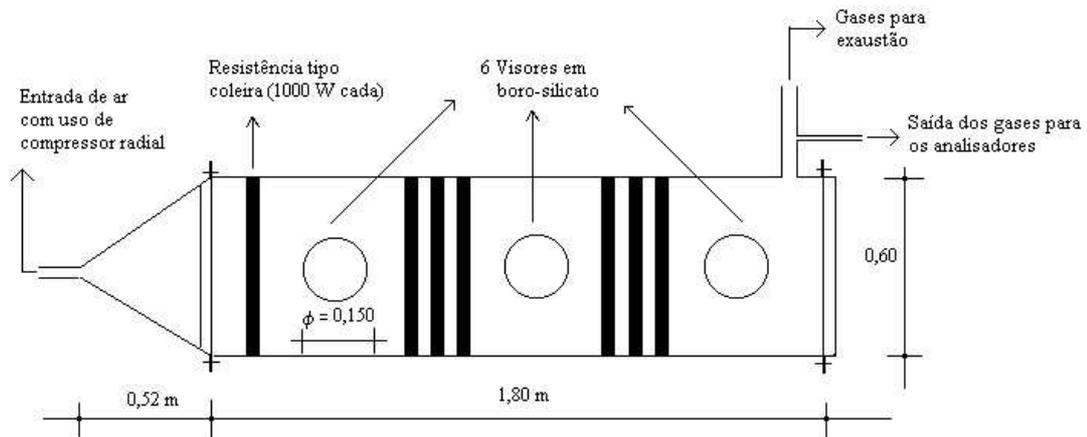


Figura 1 – Esquema do forno de ensaios.

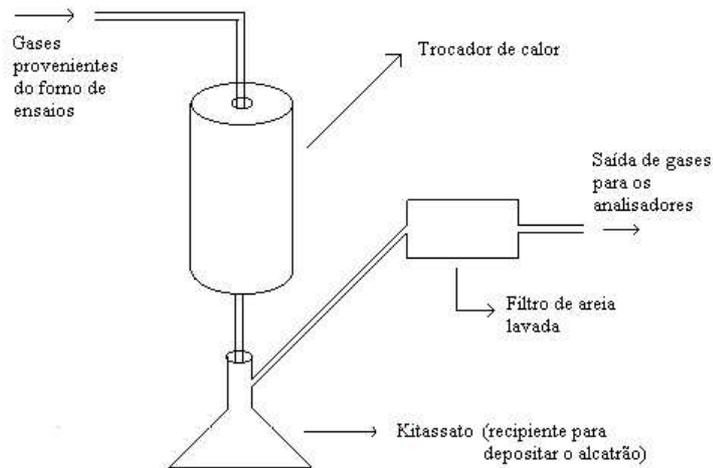


Figura 2 – Esquema do condensador de alcatrão.

A aquisição de dados de temperatura foi realizada através do coletor de dados Campbell Scientific, modelo CR10 WP. As concentrações dos gases foram registradas a cada dez minutos, com relatório impresso pelo analisador de gases. As temperaturas dos termopares foram registradas do começo ao fim do processo, sem intervenção alguma durante o ensaio. A disposição dos termopares ao longo da amostra é mostrada na Figura 3. Os termopares 4 e 5 estão em laterais opostas e todos estavam a uma profundidade de 3 cm. O processo de queima incandescente realizada em laboratório permanecia normalmente de 36 a 48 horas. Assim, a concentração dos gases foi registrada até o momento em que os níveis de O₂ e CO₂ atingissem um patamar estável. Isto foi feito devido à impossibilidade de se permanecer 48 horas ininterruptas acompanhando a aquisição dos dados do analisador, e para evitar o superaquecimento do aparelho. Após o processamento dos mesmos, obtiveram-se gráficos das variações de concentrações com o tempo e das variações da temperatura com o tempo.

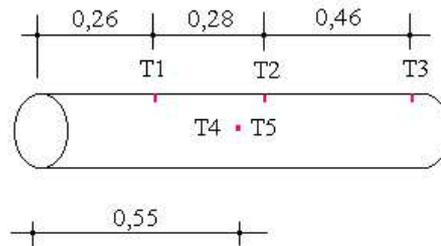


Figura 3 – Esquema da disposição dos termopares na amostra.

2.2. Ensaio de Campo

Paralelamente aos ensaios de laboratório, foi realizado um teste de queimada florestal no interior da floresta Amazônica, em uma área de 200x200 m². Após o experimento, alguns troncos permaneceram queimando em processo de incandescência por mais alguns dias. No dia seguinte à queimada havia 59 troncos incandescentes, destes foram escolhidos 11 para realizar o monitoramento do processo. As características de evolução da frente de incandescência, assim como as temperaturas e velocidade de propagação da frente foram registradas nestes troncos. As temperaturas foram tomadas com um pirômetro ótico a laser da marca Raytec, modelo ST6, com confiabilidade de medida de até 600 °C. Para o cálculo das velocidades da frente incandescente considerou-se o eixo do tronco como a dimensão característica e foram determinadas através das medidas de comprimento do avanço da frente em cada amostra, durante os três dias de monitoramento.

Os troncos monitorados no campo eram de espécie, dimensões e características variadas, mas, a propagação da incandescência em troncos foi observada somente em madeira altamente porosa e fibrosa.

3. Planejamento de Experimentos

Para otimizar a execução dos testes foi aplicada a técnica de ‘Projeto de Experimentos’, que consiste na utilização de princípios estatísticos, onde é possível tirar o máximo de informações úteis, com um mínimo de experimentos e realizando a análise dos dados obtidos a partir desse planejamento. Nesta técnica, consideram-se os seguintes elementos:

- fatores são as variáveis controláveis, variáveis de entrada (independentes);
- níveis são os valores nos quais os fatores são ajustados;
- resposta é a variável de saída, o resultado do processo.

As vantagens deste método são:

- requer menor número de experimentos que os métodos convencionais;
- permite que o estudo seja feito com diversas variáveis, sendo investigadas simultaneamente;
- determina a influência (interação) de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse;
- mostra as variáveis mais importantes do processo;
- permite a otimização com redução significativa de custos;
- aplica-se a qualquer tipo de processo;
- permite uma modelagem do experimento.

Para a realização dos testes variaram-se cinco parâmetros: a temperatura interna do forno de ensaios (i), a vazão de ar (ii), a umidade das amostras (iii), as espécies de madeira (iv) e o volume das mesmas (v). Utilizou-se uma matriz de experimento fatorial fracionada do tipo 3⁵, onde foram considerados 5 fatores que são os parâmetros que variaram (variáveis de entrada e independentes) em 3 níveis (3 = alto, 2 = intermediário, 1 = baixo). As variáveis de saída ou de resposta (resultado do processo) são: velocidade da frente de incandescência, taxa de queima, concentração dos gases e temperaturas ao longo da amostra. A matriz escolhida foi a que mais se adequou ao estudo em questão. Optou-se pelo fatorial fracionado, em virtude da impossibilidade de realização do fatorial completo (3⁵ = 243).

Aplicando-se a Técnica de Taguchi (1991), escolheu-se a matriz originária dos Arranjos Ortogonais com três níveis, L18, originando a Tabela 1. As variáveis de entrada possuem três níveis de variação (Tabela 2), com exceção da variável umidade que possui apenas dois. No parâmetro ‘volume’ foram adotados três níveis diferentes, pois as amostras variavam de 3 a 83*10⁻³ m³, sendo que o primeiro nível aproximadamente a metade do segundo e este a metade do terceiro, originando os níveis 1 (25*10⁻³ m³), 2 (26 a 51*10⁻³ m³) e 3 (52 a 83*10⁻³ m³). A realização dos dezoito experimentos seguiu uma ordem aleatória para que não houvesse o risco de incorrer em vícios.

Tabela 1 – Matriz experimental.

Ensaio	Fatores				
	Umidade	Temperatura	Vazão de ar	Espécie	Volume
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	3	3
5	1	2	2	1	1
6	1	2	3	2	2
7	1	3	2	2	3
8	1	3	3	3	1
9	1	3	1	1	2
10	2	1	3	2	1
11	2	1	1	3	2
12	2	1	2	1	3
13	2	2	2	3	2
14	2	2	3	1	3
15	2	2	1	2	1
16	2	3	3	1	2
17	2	3	1	2	3
18	2	3	2	3	1

Tabela 2 – Fatores e níveis utilizados na matriz experimental.

Fatores	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Umidade	Secagem ao natural	Secagem em estufa	----
Temperatura	ambiente	100 °C	200 °C
Vazão	85 L/min	99 L/min	113 L/min
Espécie	Embaúba preta	Embaúba branca	Embaúba pata de anta
Volume	Até $25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	De 26 a $51 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	De 52 a $83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

O procedimento adotado foi sempre o mesmo em todos os ensaios realizados. Este procedimento está descrito a seguir:

- Ligava-se o analisador para aquecimento, tempo mínimo de 20 minutos.
- Preparava-se o filtro de areia lavada e colocava-se gelo dentro do trocador de calor.
- Depois de escolhida a amostra, ela era pesada e furada nos pontos de posicionamento dos termopares.
- Ignitava-se a amostra com o queimador infravermelho, fora do forno de ensaios.
- Ligava-se o compressor de ar, o qual fornecia uma vazão de ar constante e fixada de acordo com a matriz experimental.
- Reposicionava-se o corpo de prova dentro do forno, de maneira que o fluxo de ar estivesse na mesma direção da frente de incandescência, ou seja, a zona de reação propagava-se na mesma direção do escoamento do oxidante (incandescência direta).
- Introduziam-se os 5 termopares e fechava-se o forno.
- A temperatura interna do forno era fixada por um controlador de temperatura, exceto nos casos em que a temperatura era ambiente, conforme matriz experimental.
- Ajustava-se o relógio do coleta de dados de temperatura com o relógio do analisador de gases.
- Conectava-se a sonda da amostra com a ponta de prova do analisador e iniciava-se a aquisição dos dados (temperatura e concentração dos gases).

4. Resultados

4.1. Em Campo

As temperaturas obtidas nos troncos incandescentes, no campo, permaneceram entre: 292 e 600 °C. Estas foram obtidas diretamente na região incandescente. A temperatura média da frente foi cerca de 506 °C.

As velocidades médias de propagação da frente variaram de: 0,67 a 3,79 cm/h, onde os valores maiores foram obtidos quando havia transição de incandescência para chama no tronco monitorado. Observou-se que fatores como ventilação no local, porosidade e volume da amostra influenciaram também a velocidade de propagação da frente.

Os valores de temperatura e velocidade de propagação encontrados nos ensaios de campo foram da mesma ordem de grandeza daquelas obtidas nos ensaios de laboratório.

4.2. Em Laboratório

Para analisar, comparar e discutir os resultados obtidos após os ensaios de laboratório foram consideradas 7 variáveis respostas. São elas: velocidade média da frente de incandescência, taxa de queima, temperatura máxima atingida pela amostra, as concentrações máximas de CO, CO₂, HC e a concentração mínima de O₂.

Foram realizados 18 experimentos, sem repetibilidade, os quais forneceram estimativas dos valores das respostas discriminadas acima. O procedimento adotado foi seguido rigorosamente para que não houvesse interferências de outras variáveis não adotadas neste sistema.

Na Tabela 3 encontram-se os valores de todas as respostas obtidas em cada um dos ensaios realizados em laboratório.

Tabela 3 – Valores obtidos nas respostas para os 18 ensaios realizados.

Ensaio	V _{média} (cm/h)	Taxa Q. (g/min.)	T _{máx.} (°C)	[CO] _{máx.} (%)	[CO ₂] _{máx.} (%)	[HC] _{máx.} (ppm)	[O ₂] _{mín.} (%)
1	4,03	1,62	671	0,46	3,2	321	18,0
2	4,88	2,94	340	1,38	4,39	528	16,7
3	3,5	3,04	451	1,28	3,86	433	16,9
4	3,47	4,27	499	2,67	7,46	820	13,7
5	3,59	2,13	618	0,60	3,54	412	17,7
6	3,16	3,78	485	1,52	5,03	615	16,2
7	2,25	2,59	485	1,04	4,17	459	17,6
8	7,50	2,29	462	1,07	3,08	741	19,3
9	5,22	3,27	491	1,22	6,22	864	14,8
10	5,17	3,45	407	1,33	4,38	545	15,9
11	4,47	2,53	267	1,37	4,25	704	16,2
12	1,88	3,82	589	1,27	6,4	993	15,2
13	5,45	3,78	488	1,86	5,58	691	15,3
14	3,75	4,03	500	0,98	6,02	746	15,5
15	3,57	2,42	447	1,33	4,26	799	17,0
16	6,00	6,99	657	2,13	10,3	1630	11,2
17	4,29	6,20	396	3,77	11,58	1997	10,0
18	3,73	1,79	548	0,76	2,72	403	18,5

A velocidade média da frente de incandescência foi calculada com base no comprimento do tronco (1 m) e o tempo necessário para a frente percorrer a amostra em cada ensaio aferidos com auxílio das medidas de temperatura, ou seja, era possível detectar a passagem da frente incandescente através dos cinco termopares posicionados no tronco. As curvas geradas são apresentadas no gráfico da Figura 4.

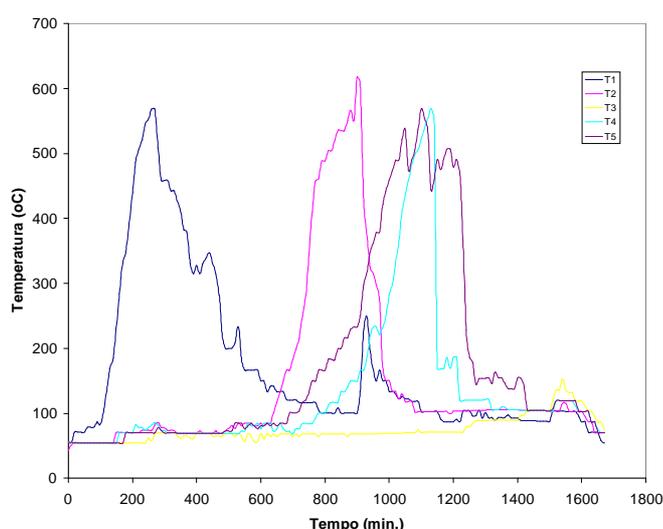


Figura 4 – Variação das temperaturas T₁ a T₅ em função do tempo, ensaio número 5.

Através da Figura 4 pode-se visualizar os quatro picos de temperatura, indicando que a frente de incandescência atingiu os quatro pontos de termopares, atingindo temperaturas próximas a 600 °C, com exceção do termopar T₃ que localizava-se no final. Para atingir o termopar 1 que se localizava a 26 cm da extremidade, foram 270

minutos, e para alcançar o segundo (a 28 cm de T₁) foram 910 minutos. Com estes dados pode-se estimar a velocidade média de propagação da frente de incandescência. Os termopares 4 e 5 registraram temperaturas máximas em instantes próximos, como era de se esperar, por estarem em sentidos opostos, mas à mesma distância da extremidade. O termopar 2 registrou a máxima temperatura atingida no experimento, 618 °C. No termopar 3 não houve temperaturas superiores a 155 °C; deduz-se que, por estar bastante próximo à outra extremidade, provavelmente o tronco se soltou do termopar antes que a frente chegasse até ele.

As taxas de queima heterogênea foram obtidas a partir do balanço de massa. Como a reação normalmente ocorre a uma temperatura superior a 400 °C, considerou-se que o material consumido neste instante é praticamente carbono, tendo os voláteis já sido eliminados. Este procedimento, portanto, tem-se a seguinte reação química:



onde os coeficientes y, z, p são obtidos através das concentrações medidas em base seca de [CO]_{máx.}, [CO₂]_{máx.} e [O₂]_{mín.} para cada ensaio realizado. Esta metodologia é válida pois, para as concentrações utilizadas, entende-se que a frente de pirólise já percorreu o corpo de prova na sua totalidade, ocorrendo apenas, neste instante, queima heterogênea. As curvas referentes às concentrações destes gases estão na Figura 5.

Para a resposta referente à temperatura máxima, considerou-se a maior temperatura obtida em cada ensaio, registrada por qualquer termopar posicionado na amostra.

Durante os ensaios, as concentrações eram registradas a cada 10 minutos, mas foram utilizados para cálculos e conclusões finais apenas os valores máximos de CO, CO₂ e HC e mínimos de O₂ verificados em cada teste.

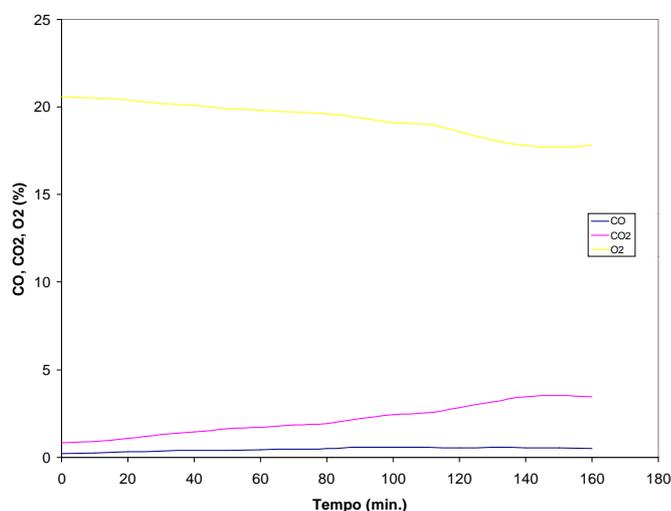


Figura 5 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, ensaio número 5.

Para estas condições pode-se verificar que a concentração de CO manteve-se baixa e a de CO₂ aumentou gradativamente. A concentração de O₂, conforme esperado, tem comportamento inverso à de CO₂. Os valores máximos das concentrações de CO e CO₂ foram 0,60% e 3,54%, respectivamente.

Conforme a Figura 6, a concentração de HC (hidrocarbonetos não queimados) teve o ponto máximo em 412 ppm e diminuiu até manter-se relativamente constante em 280 ppm. É importante ressaltar que uma quantidade significativa de hidrocarbonetos ficou retida no próprio forno de ensaios, no condensador de alcatrão e nos filtros, ou seja, quando na forma gasosa, ele se condensa ao atingir temperaturas mais baixas., dando origem ao alcatrão. Portanto, a concentração medida no analisador de gases é de hidrocarbonetos não condensáveis. De acordo com Numm et al. (1985), a formação do alcatrão inicia-se em 327 °C, podendo atingir 58 % da massa da madeira em torno de 577 °C.

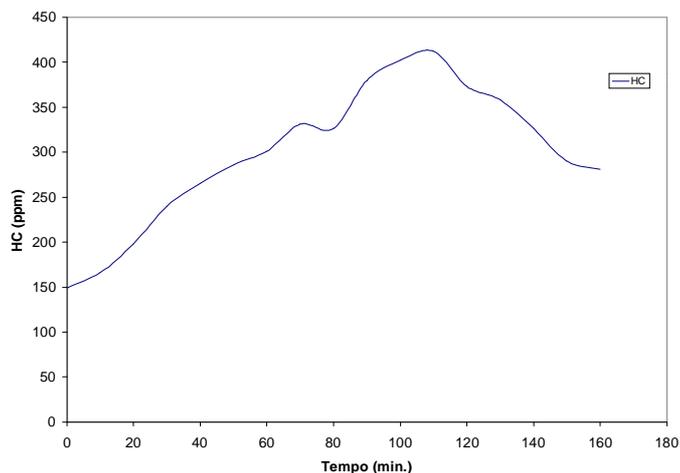


Figura 6 – Variação da concentração de HC em função do tempo, ensaio número 5.

Na Figura 7 pode-se verificar o avanço da frente de incandescência num tronco, no interior do forno experimental. Na passagem, a frente de incandescência deposita cinzas provenientes da queima heterogênea.



Figura 7: Ilustração do desenvolvimento de um ensaio.

A partir dos dados mostrados na Tabela 3, foi realizado o cálculo dos efeitos dos fatores para cada um dos três níveis, em todas as respostas. Os efeitos indicam a intensidade da interferência de cada nível sobre a resposta final. Para o cálculo dos efeitos, considera-se a média das respostas de cada nível. Estes valores indicarão uma influência considerável ou desprezível, dependendo do valor da média geral referente à resposta em questão. Os resultados dos efeitos sobre as respostas seguem na Tabela 4. Por exemplo, a média geral para a variável vazão de ar (C) é $\overline{M}_C = 4,22$ obtida de todos os ensaios (1 a 18) na Tabela 3, coluna 2, V_m . O efeito de C no nível 1 é obtido dos ensaios 1, 4, 9, 11, 15 e 17, perfazendo 4,18. Para o cálculo do efeito de C no nível 2 empregam-se os ensaios 2, 5, 7, 12, 13 e 18, obtendo-se 3,63. Finalmente, para o efeito de C no nível 3, empregam-se os testes 3, 6, 8, 10, 14 e 16, cuja média é 4,85. Portanto, verifica-se que a resposta, no experimento, referente à variável velocidade aumenta para o fator C no nível 3 e permanece abaixo da média para os níveis 1 e 2.

Tabela 4 – Resultados dos efeitos sobre as respostas.

Respostas	Velocidade (cm/h) $\overline{M} = 4,22$			Taxa de Queima (g/min.) $\overline{M} = 3,39$			Temperatura Máxima (°C) $\overline{M} = 489$			Concentração Máxima de CO (%) $\overline{M} = 1,45$			Concentração Máxima de CO ₂ (%) $\overline{M} = 5,36$			Concentração Máxima de HC (ppm) $\overline{M} = 761$			Concentração Mínima de O ₂ (%) $\overline{M} = 15,87$			
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	
Efeitos (*) Fatores																						
Umidade (A)	4,18	4,26	---	2,88	3,89	---	500	477	---	1,25	1,64	---	4,55	6,17	---	577	945	---	16,77	14,98	---	
Temperatura (B)	3,99	3,83	4,83	2,90	3,40	3,86	454	506	506	1,18	1,49	1,67	4,41	5,32	6,35	587	680	1016	16,48	15,9	15,23	
Vazão de ar (C)	4,18	3,63	4,85	3,38	2,84	3,93	462	511	494	1,80	1,15	1,39	6,16	4,47	5,44	917	581	785	14,95	16,83	15,83	
Espécie (D)	4,08	3,89	4,69	3,64	3,56	2,95	588	427	452	1,11	1,73	1,50	5,95	5,64	4,49	828	824	632	15,4	15,57	16,65	
Volume (E)	4,60	4,86	3,19	2,28	3,88	3,99	525	455	487	0,93	1,58	1,84	3,53	5,96	6,58	537	839	908	17,73	15,07	14,82	

(*) M₁, M₂ e M₃ são os valores médios de cada um dos níveis aplicados, ou seja, mínimo, intermediário e máximo.

5. Conclusões

Para uma melhor compreensão do desenvolvimento da incandescência em troncos de madeira, descreve-se, a seguir, a análise da influência que cada parâmetro exerceu sobre as 7 respostas obtidas nos 18 experimentos realizados em laboratório. A análise é baseada na técnica Projeto de Experimentos.

5.1. 1ª. Resposta: Velocidade

Considerando, primeiramente a resposta referente à velocidade da frente de incandescência, concluiu-se que:

- para o fator umidade, registrou-se uma mínima interferência nesta resposta;
- aumentando-se a temperatura interna do forno de ensaios, a velocidade de propagação da frente de incandescência foi maior;
- com o aumento da vazão, obteve-se uma velocidade de propagação maior;
- a espécie no nível 3 ('Embaúba Pata de Anta') produziu uma velocidade de queima superior às outras;
- para volumes menores, a velocidade da frente de incandescência era maior.

5.2. 2ª. Resposta: Taxa de Queima

Ao considerar a taxa de queima como variável resposta, obteve-se:

- uma taxa de queima 35% superior nas amostras em processo de secagem em estufa;
- com o aumento de temperatura, ocorreu um maior consumo de biomassa;
- para vazões de ar maiores, a taxa de queima também aumentou;
- as espécies dos níveis 1 ('Embaúba Preta') e 2 ('Embaúba Branca') forneceram taxas de queima superiores à média calculada;
- uma taxa de queima maior à medida que o volume da amostra era aumentado.

5.3. 3ª. Resposta: Temperatura máxima

Para esta resposta verificou-se que:

- o fator umidade interferiu pouco na temperatura máxima;
- para a variável temperatura, os valores máximos atingidos na amostra durante os ensaios eram superiores à média calculada apenas nos ensaios em que as resistências eram acionadas para aquecimento interno do forno (níveis 2 e 3);
- para os níveis 2 e 3 da variável vazão de ar, ocorreu aumento na temperatura média registrada, enquanto no nível 1, a resposta ficou abaixo da média;
- a espécie referente ao nível 1 ('Embaúba Preta') registrou temperaturas máximas mais elevadas;
- as amostras com volume menor (nível 1) registraram temperaturas mais elevadas.

5.4. 4ª. Resposta: Concentração máxima de CO (%)

Ao considerar a concentração máxima de CO como variável resposta, observou-se que esta aumentou quando:

- a secagem foi realizada em estufa;
- a temperatura interna do forno de ensaios era programada para os níveis 2 e 3, 200 e 300 °C, respectivamente;
- a variável vazão de ar era fixada no nível baixo;
- os ensaios eram realizados com troncos das espécies da Amazônia (níveis 2 e 3);
- o volume das amostras pertencia ao nível 3; o aumento na emissão foi de 27% em relação à média calculada.

5.5. 5ª. Resposta: Concentração máxima de CO₂ (%)

A concentração de CO₂ aumentou nos ensaios onde:

- a secagem era realizada em estufa;
- a temperatura interna do forno de ensaios era fixada no nível 3 (200 °C);
- a vazão de ar era fixada no nível 1;
- as espécies consideradas eram dos níveis 1 ('Embaúba Preta') e 2 ('Embaúba Branca');
- o volume das amostras pertencia ao nível 3, ocorrendo um aumento de 23 % em relação à média obtida.

5.6. 6ª. Resposta: Concentração máxima de HC (ppm)

Observou-se um aumento na produção de hidrocarbonetos quando:

- a secagem era realizada em estufa;
- a temperatura interna do forno de ensaios era fixada no nível alto, ocorrendo um aumento de 73% em relação ao nível 1;
- a vazão de ar era posicionada no nível baixo;
- as espécies ensaiadas eram dos níveis 1 e 2, ‘Embaúba Preta’ e ‘Embaúba Branca’, respectivamente;
- o volume das amostras pertencia ao nível 3.

5.7. 7ª. Resposta: Concentração mínima de O₂ (%)

A concentração de O₂ era diminuída nos ensaios quando:

- a secagem era realizada em estufa;
- a temperatura interna do forno de ensaios era posicionada no nível 3;
- a vazão de ar era mínima, ou seja, no nível 1;
- as espécies pertenciam aos níveis 1 e 2;
- o volume das amostras pertencia ao nível 3.

De um modo geral, todos os parâmetros interferiram nas respostas finais obtidas. Alguns acarretaram efeitos maiores e outros menores, mas a variação de um nível para outro provocava alterações nas respostas consideradas neste processo.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio deste trabalho pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através dos processos 98/00104-9 e 99/04663-5.

7. Referências

- Carvalho Jr., J.A.; Costa, F.S.; Veras, C.A.G.; Sandberg, D.V.; Alvarado, E.C.; Gielow, R.; Serra, A.M.; Santos, J.C., 2001. Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in northern Mato Grosso, Brazil, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16):17877-17887.
- Carvalho, E.R.; Gurgel Veras, C.A.; Carvalho Jr., J.A., 2002. Experimental investigation of smouldering in biomass, *Biomass and Bioenergy* 22(4), 283-294.
- National Fire Protection Association (NFPA), 1963. Fire Detection Systems in Dwellings, Los Angeles: Fire Department Tests.
- Nunn, T. R.; Howard, J. B.; Longwell, J. P.; Peters, W. A., 1985. Product compositions and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood, *Industrial Engineering Chemical Processes Des. Development*, 24(3), 836-844.
- Ohlemiller, T.J.; Rogers, F.E.; 1978, A Survey of Several Factors Influencing Smoldering Combustion in Flexible and Rigid Polymer Foams, *Fire Flammability*, 9:489-509.
- Ohlemiller, T.J., 1985, Modeling of Smoldering Combustion Propagation, *Prog. Energy Combustion Science*, 11, 277-310.
- Ross, P. J., 1991, Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade, Editora McGraw-Hill Ltda, São Paulo.