

Combustão Lenhosa Directa e Indirecta Sua Relevância para a Temática dos Fogos Florestais

Augusto M. Sardinha*, F. Wolfango Macedo** e F. Vasconcelos Macedo***

* Engenheiro Silvicultor, ** Investigador Principal, *** Engenheiro Agrícola
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5001-911 VILA REAL

Sumário: Analisa-se a dinâmica da combustão directa e indirecta e mostra-se o seu interesse quanto à produção do carvão de madeira, para a compreensão da génese dos fogos subterrâneos e para a boa condução do rescaldo dos fogos florestais.

Palavras-chave: combustão lenhosa; fogos florestais; fogos subterrâneos; carvão de madeira

Abstract: Both the direct and indirect dynamics of wood combustion are analysed and applied to the understanding of charcoal production, to the development of underground fires, and to the most effective approaches for forest fire extinction.

Key words: wood combustion; charcoal; underground fires; forest fires

Résumé: On analyse le phénomène de la combustion du bois et de ses implications sur la production du charbon de bois, l'expansion des feux en sous-sol et les opérations d'extinction des feux de forêt.

Mots clés: combustion du bois; feux de forêt; feux en sous-sol; charbon de bois

Introdução

A temática dos fogos florestais deve incluir o estudo de diversos fenómenos ligados à combustão de materiais de origem vegetal existentes quer à superfície (árvores, arbustos, herbáceas), quer no subsolo (raízes, turfa e carvão mineral).

Entre esses fenómenos figuram os *fogos subterrâneos*, mais raros e de explicação teórica mais complexa do que os *fogos de superfície* ou *de copas*, mas que devem ser tidos em consideração pelas suas implicações na prevenção e rescaldo de fogos florestais (Figura 1).

Um fenómeno de certo modo relacionado com os fogos subterrâneos é

o da *destilação seca da madeira*, que se processa em vaso fechado ou retortas, sem acesso de ar, e com produção de várias substâncias sólidas, líquidas e gasosas, como adiante se explica.

Para um conhecimento mais alargado dos fenómenos ligados à combustão de materiais de origem vegetal julga-se pertinente estudar também os processos industriais de produção de *carvão de madeira*, quer através de medas ou de fornos metálicos, dado que quando ocorre um fogo florestal podem ocasionalmente ocorrer situações análogas.

O estudo dos processos atrás enumerados tem importância para a compreensão e aplicação dos procedimentos relativos à prevenção, combate e rescaldo

dos fogos florestais, evitando tomadas de decisão ocasionais sem a devida fundamentação técnica, que podem conduzir a resultados imprevistos ou de pouca eficácia.

Dinâmica da combustão lenhosa directa

A dinâmica da combustão lenhosa directa refere-se essencialmente ao rendimento e à velocidade da transformação da matéria lenhosa com libertação de energia calorífica. A duração do processo de combustão depende de muitos factores, por exemplo, *fracciona-*

mento e teor de humidade do combustível e ainda a quantidade e mobilidade do fluxo de ar comburente (*ventilação*). Outros factores importantes são o *calor específico* e a *condutibilidade calorífica* do material lenhoso, que influenciam o seu *ponto de inflamabilidade*. O processo de combustão desenvolve-se por diversas fases com duração variável: *vaporização, gaseificação, ignição* (ou *inflamação*) e *combustão propriamente dita*, que consiste numa oxidação viva, total, de todos os componentes, resultando apenas as *cinzas, incombustíveis*, como resíduo sólido.

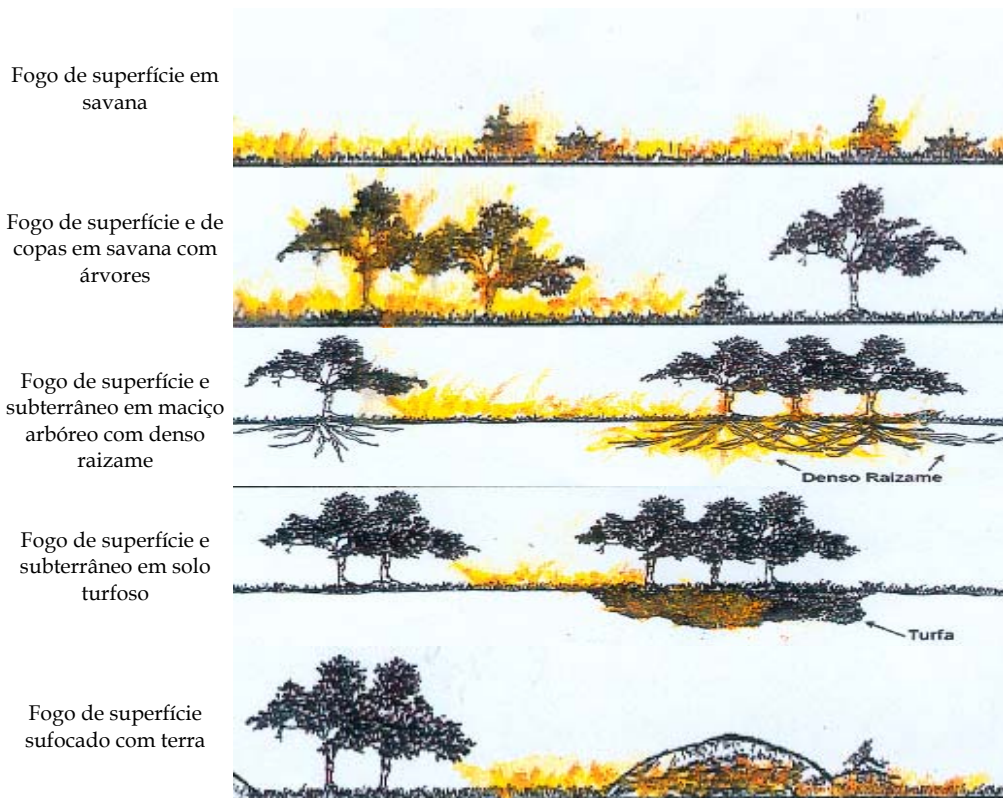


Figura 1 - Tipos de fogos florestais

Todos os factores e aspectos da dinâmica da combustão lenhosa acima referidos, além de outros, são relevantes para a compreensão dos fogos florestais, e têm importância prática para a sua prevenção e combate.

Sendo o calor específico da matéria lenhosa baixo, $0,4-0,7 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \times (\text{°C})^{-1}$, embora variável com o teor de humidade, não são necessárias grandes quantidades de calor para elevar a sua temperatura a cerca de 150°C , temperatura em que se inicia a fase de gaseificação. As diferentes camadas de um tronco de madeira atingem a fase de gaseificação em tempos diferentes, dada a sua baixa condutibilidade calorífica, sendo a condutibilidade radial cerca de metade da condutibilidade na direcção longitudinal das fibras. A inflamabilidade e a velocidade de combustão aumentam, durante as primeiras fases, à medida que diminui a densidade e aumenta a *porosidade*.

As madeiras mais densas são melhores combustíveis, por terem um maior poder calorífico por unidade de volume, mas por outro lado opõem maior resistência à combustão, devido à sua menor condutibilidade calorífica.

As propriedades anatómicas têm também importância na dinâmica da combustão: a combustão das Coníferas é em parte dificultada porque os gases provenientes da decomposição dos traqueídeos fechados, especialmente os das células das paredes espessas do crescimento de outono, se escapam dificilmente, com pequenas explosões que rebentam as paredes das células, o que explica o crepitar das Coníferas quando ardem (KOLLMANN, 1959).

A porosidade do carvão vegetal, que constitui a última fracção em combustão, tem importância na dinâmica global da

combustão. No carvão vegetal das Coníferas o oxigénio do ar penetra com dificuldade, pelo que as suas brasas se mantêm acesas muito tempo. Pelo contrário, quando o carvão vegetal é muito poroso, como por exemplo na Faia, os gases de decomposição desprendem-se facilmente e o ar penetra sem dificuldade no carvão, pelo que as brasas são mais intensas, embora de menor duração.

Fogos subterrâneos

Os fogos subterrâneos ocorrem devido à presença de materiais combustíveis abaixo da camada superior do solo. Embora raros, comparativamente aos fogos de superfície e aos de copas, devem ser tidos em consideração pelas equipas responsáveis pelo combate aos incêndios florestais. Estes fogos são normalmente detectáveis pela emissão de vapor de água à superfície, escapando-se outros fluidos não condensáveis, por exemplo o hidrogénio, o monóxido e dióxido de carbono e o metano, através dos interstícios e poros do solo.

Nas áreas onde têm lugar esses fogos, existe o risco de aluimentos do solo, devido à criação de espaços vazios, o que poderá originar graves consequências para a integridade física de pessoas e animais.

Outro risco é a emissão de gases tóxicos, como o monóxido de carbono e gases sulfurosos, que podem ocasionar acidentes em zonas residenciais construídas sobre jazigos de combustíveis minerais ou turfeiras.

Um fogo subterrâneo pode ser alimentado pelo ar atmosférico, caso em que a combustão é relativamente rápida, ou desenvolver-se isolado da atmosfera, caso em que continua por um processo

exotérmico de autocombustão, análogo a uma destilação seca da madeira, progredindo então muito lentamente, sem chama, designado por "fogo morto", por dar a sensação de se encontrar extinto. Um fogo subterrâneo pode durar semanas ou ser de duração muito longa como acontece com certos fogos em jazigos de carvão mineral.

Quando, numa operação de rescaldo, se lança terra sobre material lenhoso em combustão com o objectivo de o isolar da atmosfera, operação que se designa vulgarmente por "abafamento", cria-se a condição para a ocorrência de uma combustão sem acesso de ar atmosférico, análoga à destilação seca da madeira numa retorta. Eventualmente origina-se assim um foco invisível de ignição de um incêndio de superfície, se porventura a zona adjacente contiver suficiente concentração de material combustível. Esta eventualidade de recorrência de um fogo florestal numa área ardida e sujeita a operações de rescaldo é infelizmente frequente, razão pela qual os sapadores devem ter o máximo cuidado, assegurando-se que o fogo se encontra efectivamente extinto.

Todos os aspectos aqui focados são principalmente de interesse para os responsáveis do combate a incêndios, e para os chefes de brigada de sapadores.

Destilação seca da madeira

Trata-se de um processo químico exotérmico que se realiza sem chama, resultando numa série de produtos, entre os quais se destaca o carvão vulgarmente conhecido por *carvão de retorta* (25% em peso), e ainda outros produtos: *água* (46,5%); *alcatrão*; *ácido pirolenhoso*, constituído essencialmente por *ácido acético* (2,9%), *acetona*, e *álcool metílico*;

vários gases não condensáveis (18%) como o *monóxido de carbono*, o *hidrogénio* e *hidrocarbonetos* - entre os quais *metanol* (1,9%) -.

Quando a temperatura da matéria lenhosa ultrapassa a *temperatura de secagem*, i.e., a temperatura à qual deixou de existir *água intersticial* ou *livre* (**NB 1**), inicia-se uma reacção de decomposição exotérmica em que se liberta alguma *água de constituição* e pequenas quantidades de monóxido e dióxido de carbono, mesmo que o aquecimento tenha ocorrido fora de contacto com o ar. Esta reacção é tão lenta a baixas temperaturas, que o calor produzido é imediatamente dissipado. Mas quando a temperatura externa aumenta, a velocidade da reacção exotérmica aumenta rapidamente. Por exemplo, se a temperatura externa aumenta 1,78 vezes, a velocidade da reacção exotérmica aumenta 1440 vezes. Se o aquecimento continua, a velocidade da reacção exotérmica torna-se tão grande que a temperatura no interior da matéria lenhosa ultrapassa a temperatura exterior. Esta temperatura crítica designa-se por *temperatura de reacção exotérmica*, que no caso de matéria lenhosa seca é de 270-280°C. Esta temperatura é considerada como a *temperatura de ignição* da madeira seca. Contudo, há casos em que a ignição de matéria lenhosa ocorre a temperaturas inferiores (*combustão espontânea*). Tais casos ocorrem quando oxidações lentas ou processos de decomposição causados por fungos ou outras acções enzimáticas têm lugar no interior da matéria lenhosa, quando esta está confinada e não há portanto possibilidade de dissipação do calor. Estes fenómenos ocorrem em depósitos de serradura, de contraplacados com colas resinosas insuficientemente curadas ou depósitos muito

compactos de madeiras (STAMM).

Entre 280°C e 380°C produzem-se grandes quantidades de destilados, principalmente ácido acético e metanol (NB 2), e posteriormente quantidades cada vez maiores de alcatrão e produtos gasosos. Matéria lenhosa aquecida a 400°C produz 33-41% de carvão de madeira, 3-7% de ácido acético, 1,5-2,5% de metanol, 11-19% de alcatrão e 15-17% de diversas substâncias gasosas condensáveis. A separação dos componentes voláteis produz uma fracção constituída por *alcool metílico*, composta por água com 45% de metanol, 7% de acetona, 5% de metilacetato, 3% de acetaldeído, e outras substância em menor quantidade, e outra fracção, conhecida por *vinagre de madeira*, formada por ácidos propiónico e butírico, e outros ácidos, além do ácido acético. O *alcatrão* contém creosote, guaiacol e outros fenóis, e ainda éteres de fenol (FENGER e WEGENER, 1989).

O fenómeno da destilação seca da madeira pode ser facilmente compreendido observando a Figura 2, que constitui o esquema de um protótipo industrial destinado à produção de carvão de retorta. Uma instalação com esse desenho foi construída e montada pelo primeiro autor na Estação Florestal da Sacaala, Huambo, Angola, tendo aí funcionado perfeitamente. Depositadas as achas de madeira na *retorta* (1) é fechada a sua porta (1 A), aquecendo-as através do calor produzido na *fornalha* (2), até se atingir uma temperatura entre 250°C e 290°C, iniciando-se então o fenómeno de *pirólise*. Este fenómeno ocorre sem contacto das achas com o ar atmosférico, visto que o dispositivo (7), constituído por uma tina de água, impede a entrada de ar no tubo (6), e o sifão (9) impede a entrada de ar na serpentina do condensador (16). A

destilação dos componentes voláteis da madeira processa-se sem formação de chama, e dura enquanto existirem esses componentes, num processo auto-regulado, obtendo-se como produto residual um carvão com textura homogénea e com característico timbre metálico. A destilação seca da madeira termina sem a formação de cinzas, visto que não se processa a combustão do carvão, por ser o intervalo de temperaturas acima indicado inferior à temperatura de ignição do carvão (300°C). Quando a destilação seca termina deve manter-se fechada a porta da retorta (1A) durante algumas horas, ou seja, o tempo necessário para que o carvão arrefeça bastante abaixo da sua temperatura de combustão espontânea em contacto com o ar.

Devemos notar que a destilação seca da madeira, obtida através de um dispositivo idêntico ou análogo ao protótipo da Figura 2, difere bastante da realizada em *medas* e *fornos*, utilizados tradicionalmente na produção industrial de carvão de madeira, visto que nestas duas técnicas de fabrico parte do combustível lenhoso arde completamente, por não serem esses dispositivos completamente herméticos relativamente à entrada de ar. Além disso, esses dispositivos não permitem a recuperação das substâncias líquidas e voláteis, por ausência de um sistema de condensação.

A quantidade de carvão obtida por destilação seca da madeira em retortas, pelo processo de Stafford, pode atingir cerca de 400-500 kg por tonelada de lenha.

O ácido pirolenhoso representa 35-45% do peso da madeira. É uma mistura de consistência aquosa, formada por alguns compostos voláteis designados impropriamente por *metileno*. O ácido

pirolenhoso pode ser destilado em destiladores de coluna, que permitem a separação de vários produtos com diferentes *pontos de condensação*.

O alcatrão tem diversas utilizações industriais e farmacêuticas.

O hidrogénio e os hidrocarbonetos produzidos no processo da destilação seca da madeira podem ser recuperados e utilizados como combustíveis.

Produção industrial do carvão de madeira

Existem basicamente dois métodos para fabrico de carvão de madeira, o

método directo e o *indirecto*.

No *método directo* usa-se calor proveniente de uma combustão incompleta da lenha que se pretende transformar em carvão. A velocidade da combustão é regulada pela quantidade de ar que se deixa entrar no forno, impedindo-se a combustão do carvão formado, evitando totalmente, no momento próprio, o acesso de ar. Este método é o método clássico usado pelos carvoeiros para produzir carvão de madeira, em covas ou medas, com cobertura de torrões e mais recentemente em fornos de alvenaria, de tijolo ou em fornos metálicos.

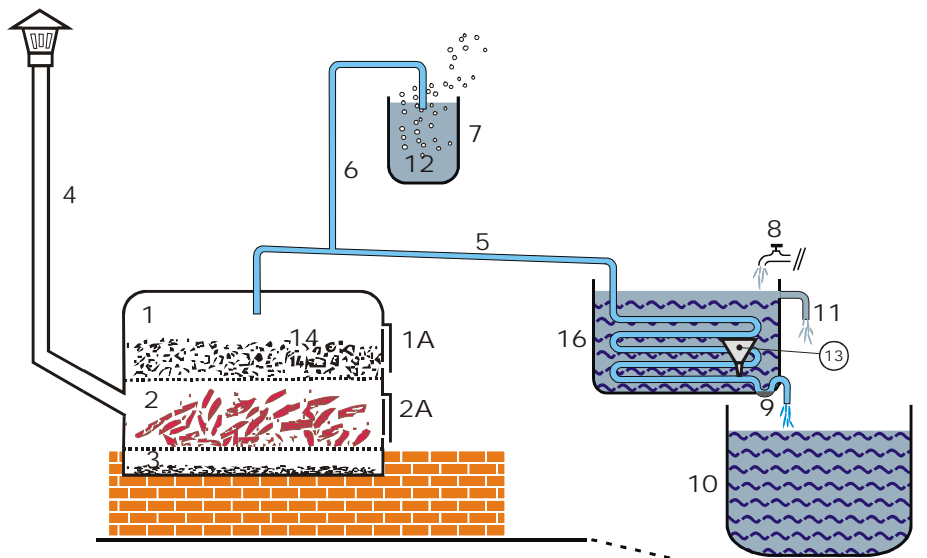


Figura 2 - Esquema de um protótipo industrial para destilação seca da madeira.

Legenda: 1 - Retorta munida de porta (1A) para carga e descarga; 2 - Fornalha de produção de calor para aquecimento da retorta, com porta para carregamento (2A); 3 - Cinzeiro; 4 - Chaminé de tiragem; 5 - Conduta de descarga de gases para destilação; 6 - Tubo para condução de gases não condensáveis; 7 - Tina com água para impedir a entrada de ar na retorta (1); 8 - Torneira para abastecimento de água do condensador; 9 - Sifão para impedir a entrada de ar na retorta; 10 - Reservatório para recolha de ácido pirolenhoso; 11 - Saída de água do condensador; 12 - Água para evitar a entrada de ar; 13 - Funil com torneira para encher de água o sifão antes e durante o aquecimento; 14 - Carvão de retorta; 15 - Gases não condensáveis; 16 - Condensador com serpentina imersa em água circulante

A Figura 3 constitui um esquema explicativo do método directo de fabrico de carvão de madeira, realizável em qualquer depósito, por exemplo, num simples bidão.

1 - Cria-se uma fonte de calor, por combustão de uma porção de lenha, com livre acesso de ar;

2 - Logo que o fogo esteja bem vivo, vai-se enchendo o forno com pedaços de lenha, tendo o cuidado de colocar os pedaços maiores na parte inferior, e mantendo o fogo aceso;

3 - Quando o fogo estiver bem pegado e já não houver o perigo de se apagar, reduz-se a entrada de ar no forno e tapa-se quase completamente a chaminé, reduzindo a saída de fumo. Este passará a ser branco, indicando a presença de vapor de água;

4 - Quando o fumo passar a azul, o que indica que o carvão de madeira formado começou a arder, fecha-se completamente a entrada de ar no forno e a saída do fumo pela chaminé. A partir desta fase o processo é semelhante ao da destilação seca da madeira. O processo demorará cerca de 4 horas, deixando-se depois arrefecer

durante 24 horas, para que não se dê a ignição espontânea do carvão de madeira produzido.

As quantidades de carvão produzidas pelo método directo em medas e fornos metálicos variam com a natureza do material lenhoso utilizado no seu fabrico e do teor de humidade (água de constituição + água intersticial + água livre), atingindo em geral cerca de 250-350 kg de carvão por tonelada de material lenhoso.

No *método indirecto* usa-se calor proveniente de uma fonte externa para a "cozedura" da lenha contida numa câmara fechada, feita de alvenaria ou metálica, e vedada à entrada de ar. Este método é semelhante ao da destilação seca da madeira em retorta, atrás descrito, não havendo no entanto, geralmente, a recolha do ácido pirolenhoso, embora se possam adaptar aos fornos metálicos dispositivos destinados à recuperação parcial do ácido pirolenhoso. No método indirecto obtém-se maior quantidade e melhor qualidade de carvão, com alto poder calorífico e que entra facilmente em ignição.



Figura 3 - Esquema do método directo de fabrico do carvão de madeira

Propriedades do carvão de madeira

O carvão de madeira é um material muito poroso, o que lhe confere a propriedade de boa *adsorvência*, que o torna indicado como produto desodorizante do ar e decolorante de soluções. A adsorvência pode ser aumentada se aumentarmos a sua porosidade, convertendo-o desse modo em *carvão activado*. Este produto é utilizado em máscaras

anti-gás e como filtro purificador da água.

No Quadro abaixo indicam-se as composições e os *poderes caloríficos (NB 3)* da lenha seca, do carvão de madeira e de vários tipos de carvão mineral. O poder calorífico da lenha seca não varia muito com as espécies (3900 kcal x kg⁻¹ para *Salix alba* e 5066 kcal x kg⁻¹ para o *Pinus Sylvestris*).



Figura 4 - Bateria de fornalhas de alvenaria (Fonte: US Forest Survey).

Quadro 1 - Composição da lenha seca, do carvão e da madeira e de vários tipos de carvão mineral

COMBUSTÍVEL	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	CINZAS (%)	kcal x kg ⁻¹
Lenha seca	50,3	6	43	-	0,4	5 000
Carvão de madeira	85-95	-	-	-	2	7500-8000
Turfa	56-63	5,7-6,3	31-38	1-2	1-4	5000-6000
Lenhite	57-84	5,5-7	10-37	1-2	-	6000-7000
Hulha	75-90	4,5-5,5	5-20	0,5-1,5	-	7000-8000
Antracite	95	2-3	2-3	0,1-0,5	-	8000-8500

Aplicações do carvão de madeira

A importância do carvão de madeira como fonte de energia calorífica tem vindo a diminuir, face à concorrência dos derivados do petróleo e da electricidade, e ainda porque os materiais lenhosos encontram utilizações mais rentáveis, por exemplo na indústria dos aglomerados de madeira. Todavia continua a usar-se como combustível doméstico em muitas regiões do terceiro-mundo. Uma das principais aplicações do carvão de madeira foi outrora como combustível nas locomotivas a vapor, que foram substituídas por locomotivas *diesel* ou eléctricas. Outro factor que explica a decrescente utilização do carvão de madeira é o seu crescente custo, devido não só ao aumento dos salários como à redução das reservas florestais, sobretudo nas proximidades das zonas urbanas.

Todavia, continua-se a utilizar o carvão de madeira na indústria siderúrgica, no fabrico de aços de boa qualidade, visto não conter enxofre, ao contrário do que sucede com os carvões de origem mineral: por exemplo, na lenhite inglesa o teor de enxofre é cerca de 2%. O Brasil é o País onde mais se utiliza o carvão de madeira, especialmente na metalurgia do aço.

Fogos urbanos

Um incêndio florestal é geralmente uma combustão que se processa em campo aberto com livre acesso de ar e com possibilidade de se expandir superficialmente, ao contrário do que sucede com os fogos urbanos, confinados pelas paredes dos edifícios, e que portanto se expandem predominantemente na vertical, como se tratasse de

um fogo com tiragem por chaminés (janelas, poços de elevadores e escadarias).

Contudo, nos fogos urbanos podem também ocorrer os mesmos complexos fenómenos que se verificam nos incêndios florestais. Por exemplo, existem algumas analogias entre os fogos urbanos e os fogos florestais ascendentes numa encosta, dado que em ambos os casos se forma uma coluna ascendente de ar quente que arrasta as chamas e as põe em contacto com os combustíveis num nível superior.

Notas bibliográficas

NB 1 (Água na Matéria Lenhosa) - A matéria lenhosa contém água sob duas formas: *água intersticial* líquida ou vapor, em cavidades das células, e *água de constituição*, nas paredes das células (*microfibras*). No processo de secagem da madeira, liberta-se primeiramente a água intersticial. Quando toda a água intersticial foi eliminada resta apenas a *água de constituição*, contida nas paredes das células, atingindo-se então o *ponto de saturação das microfibras*. Se o processo de secagem continua, as células vão perdendo a sua água de constituição e as fibras retraem-se, tornando-se mais finas. O processo de secagem é reversível, visto que a matéria lenhosa é *higroscópica* (REEB, 1995).

NB 2 (Aplicação do Metanol) - Para informação técnica detalhada sobre o metanol, consulte-se a página <http://www.methanol.org/methanol/index.html>. Recentemente, foi iniciada investigação sobre a possibilidade de utilização do metanol como fonte de energia química, produzida no processo da sua oxidação e convertida em energia

eléctrica em *pillhas de combustível* de pequena dimensão, utilizáveis em automóveis ou em equipamentos eléctricos portáteis.

Consulte-se http://www.amerlis.pt/fuel_cell/fuelcell.htm#tipos, onde se poderá encontrar abundante informação sobre pilhas de combustível.

NB 3 (Poder Calorífico da Matéria Lenhosa) - A matéria lenhosa contém água livre e de constituição. Na fase inicial da combustão liberta-se primeiramente a água livre (secagem) e posteriormente a água de constituição sob a forma de vapor. O *calor de vaporização, H_v* , depende do *teor de humidade do combustível, x* , e do *teor de hidrogénio, h* , referidos ambos ao peso húmido, de acordo com a fórmula:

$$H_v = 600 \cdot (x + 9 \cdot h) \text{ kcal}^{-1}$$

Nos processos industriais em que se utiliza como combustível matéria lenhosa, sem recuperação do calor de vaporização, interessa apenas considerar o *poder calorífico inferior, H_i* , sendo o

poder calorífico superior, $H_s = H_i + H_v$.

Bibliografia

- FENGER, D., WEGENER, 1989. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, Walter de Gruyter, Berlin.
- KOLLMANN, F., 1959. *Tecnologia de la Madera y sus Aplicaciones*, Instituto Florestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera, Madrid.
- TBOR, R. - *Traditional Woodland Crafts*. Batsford, London, UK
- MACEDO, F.W., SARDINHA, A.M., 1988. *Fogos Florestais*. Editora Ciência e Vida, Lisboa.
- REEB, J.E., 1995. *Wood and Moisture Relationships*, Oregon State University Extension Service, EM 8600, June.
- STAMM, A.J. - *Wood and Cellulose Science*, The Ronald Press Co., N. York

Páginas Internet de consulta útil:

- <http://www.energy.demon.nl/index.html>
<http://www.abdn.ac.uk/~for253/index.htm>

Submetido para publicação em Abril de 2001
Aceite para publicação em Dezembro de 2001