



1º CONGRESSO  
**FLORESTAS**  
ENERGÉTICAS

BRASILEIRO SOBRE  
**ENERGÉTICAS**

02 a 05 de Junho de 2009  
Expominas - Belo Horizonte - MG

---

# A torrefação como pré-condicionamento da biomassa para a gaseificação

- Estado da arte -

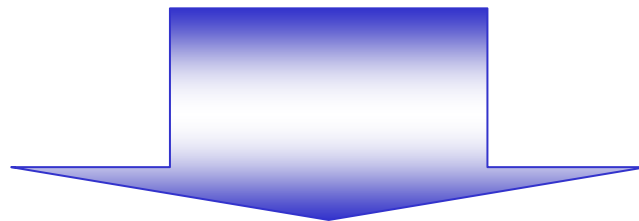
---

P. Rousset, J-M. Commandré, T.O.Rodrigues



- Contexto / Problemática / histórico da torrefação
- Composição da biomassa
- Os mecanismos reacionais
- friabilidade e moagem da madeira torrificada
- O projeto Torbigap

- Contexto internacional de tensão sobre as energias fósseis,
- sensibilização às alterações climáticas ligadas à emissão de gases de efeito estufa,
- limitações dos biocombustíveis de primeira geração:
  - limitações ambientais : poluição, índice energético baixo (~1 etanol; ~2 óleos) , fatores sociais,...
  - limitação quantitativa: disponibilidade da biomassa limitada

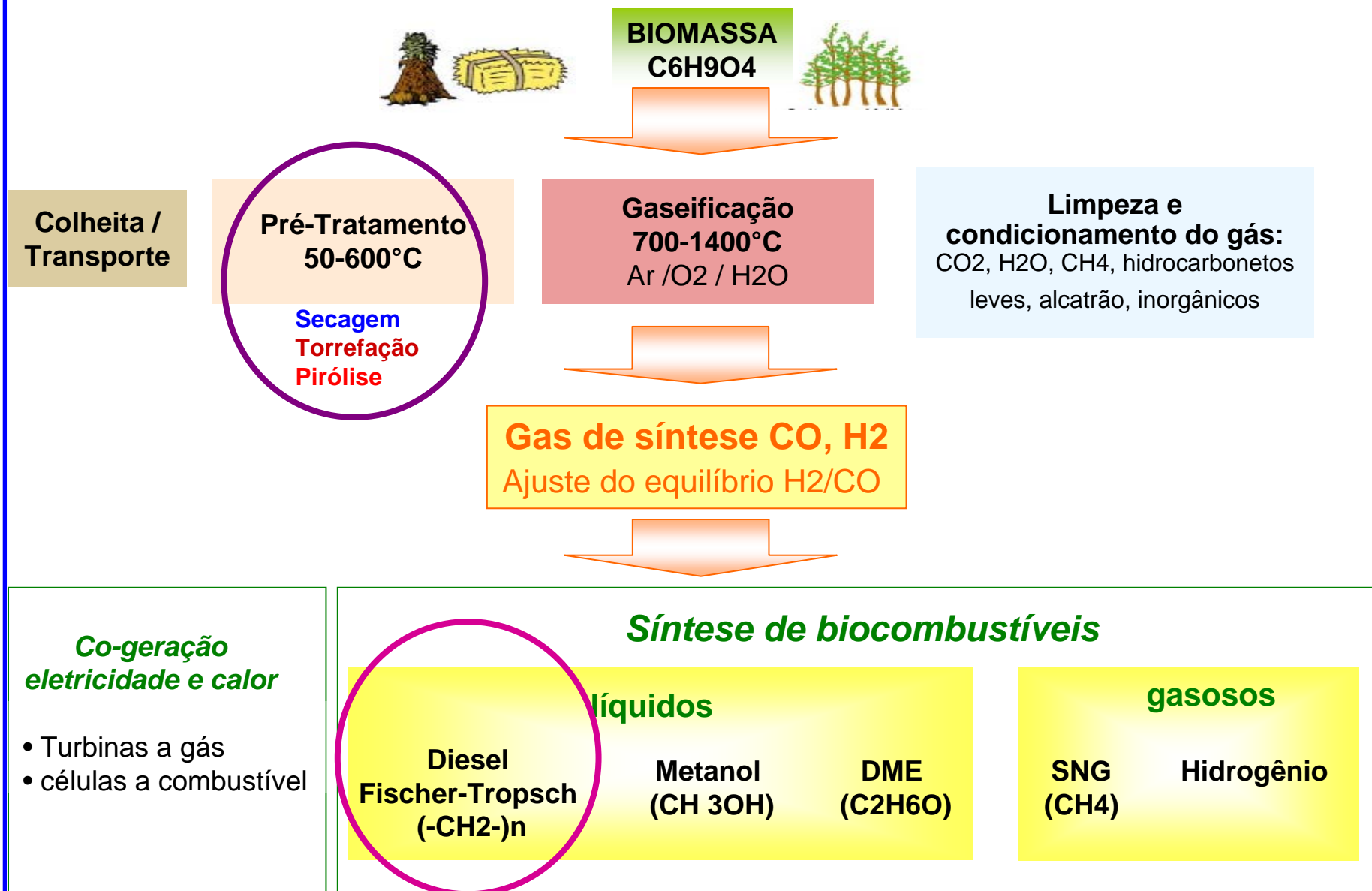


### **Desenvolvimento de biocombustíveis de 2ª geração**

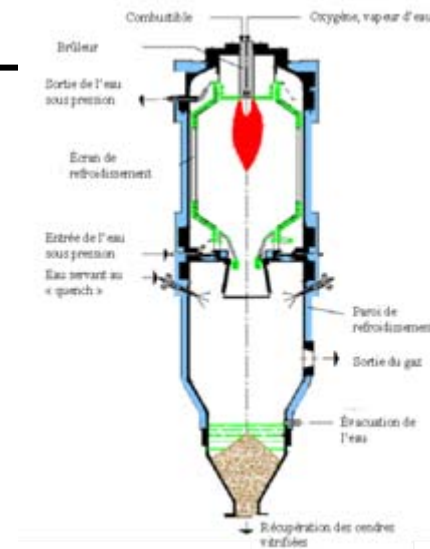
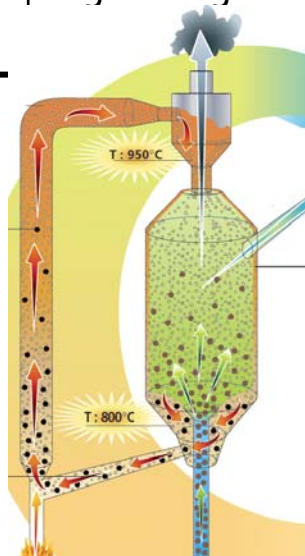
Índice energético: 3 → 5 (com energia externa).

Maximização do uso da biomassa

# A via termoquímica e as finalidades



|                                | Reator com leito fluidizado      | Reator com injeção mista        |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Faixa de temperatura           | 800-1000°C                       | 1200-1500°C                     |
| Pressão                        | 1-20 bars                        | 5-80 bars                       |
| Taxa de aquecimento            | >500 °C.s <sup>-1</sup>          | >1000 °C.s <sup>-1</sup>        |
| granulometria                  | 1-30 mm                          | <0,2 mm                         |
| Gás reativo                    | H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub> |
| Tempo de permanência do sólido | Alguns minutos                   | Alguns segundos                 |
| Tempo de permanência do gás    | Alguns segundos                  | Alguns segundos                 |



- Os reatores com injeção mista (RFE) : tecnologia promissora para a gaseificação da biomassa de grande porte
- Precisa de uma alimentação em produtos com baixa granulometria (<0,2mm)
- **Moer diretamente** a biomassa é **possível** mas com **gastos energéticos muito altos**

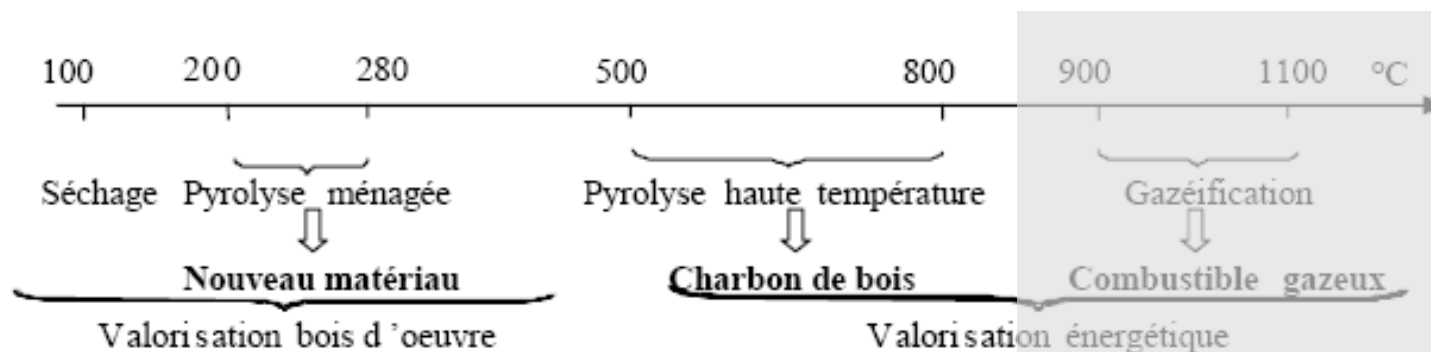
Solução possível : **a torrefação**

## Histórico

- A torrefação não é um processo novo e já é objeto de intensas pesquisas científicas há muitas décadas.
- Inicialmente prevista para produzir um substituto ao carvão vegetal
- 1985-1990 : Pesquisas orientadas para a produção de madeira para uso na construção
- 2000-Hoje : Volta para fins energéticos

# Definição

- tratamento térmico se efetua em um intervalo de temperatura entre 200 e 300°C sem O<sub>2</sub>
- Madeira torrificada = produto intermediário entre a madeira seca e o carvão



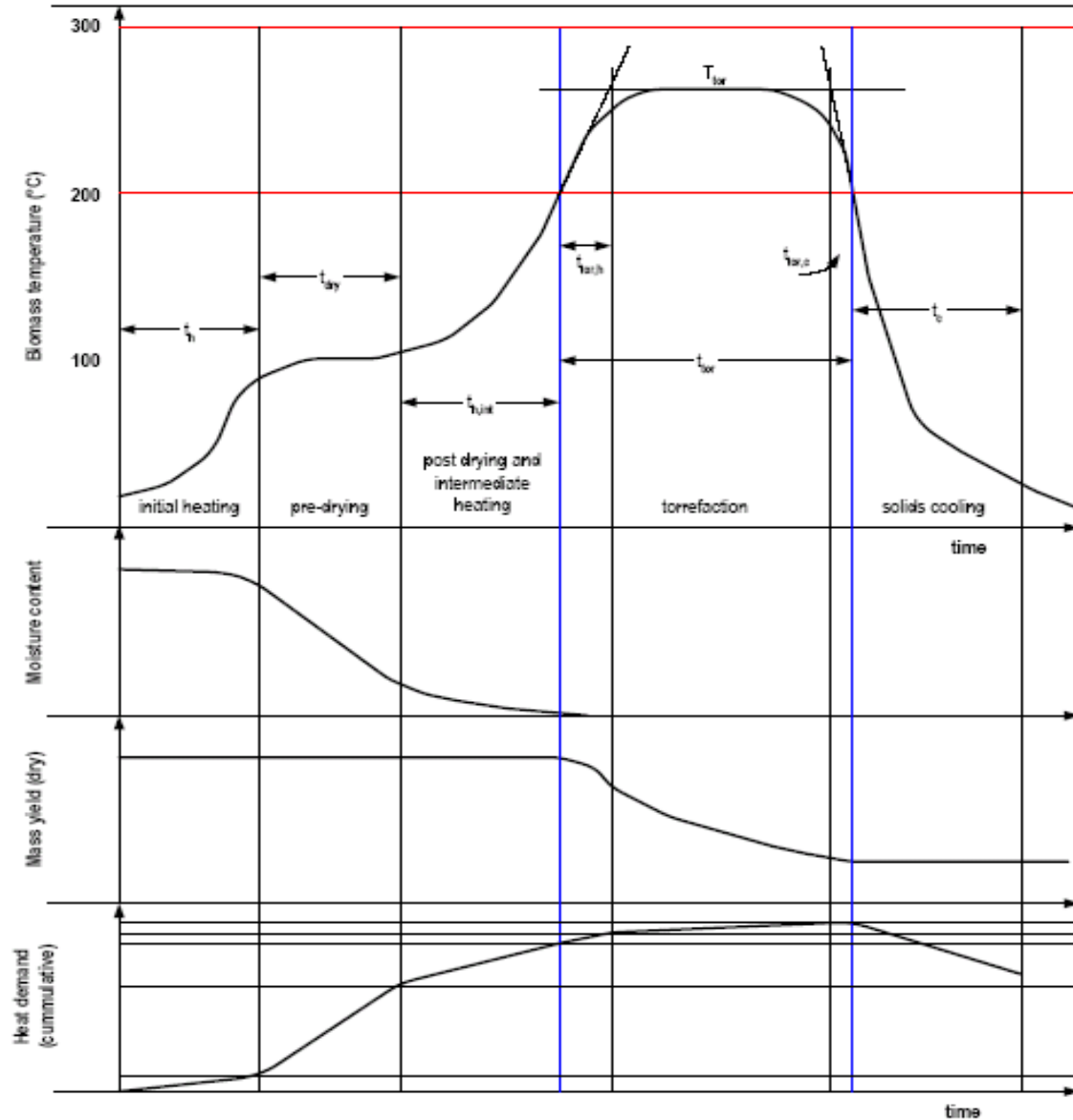
| Transformação   | T (°C)  | Taxa de aquecimento        | Produtos                                   | Reatores                         | Interes   |
|-----------------|---------|----------------------------|--|----------------------------------|---|
| Pirólise rápida | 500     | >1000 °C.s <sup>-1</sup>   | 75% líquido<br>10-15% sólido<br>10-15% gás | Leito fluidizado,<br>rosca dobra | Produção de um líquido facilmente<br>carregável e injetável |
| Pirólise lenta  | 400-500 | 5-100 °C.min <sup>-1</sup> | 30% gás<br>30% líquido<br>30% sólido       | Forno rotativo                   | Transformações bem controladas                              |
| Torrefação      | 200-300 | 5-10 °C.min <sup>-1</sup>  | 80% sólido<br>20%<br>gás+líquido           | ?                                | Moagem fina do sólido facilitada<br>Perda de massa limitada |

Temperatura

Umidade

Rendimento gravimétrico

Energia de aquecimento



Evolução dos parâmetros durante a torrefação (Bergman, 2005)



## Objetivos da torrefação (madeira - energia) :

- Produzir um **combustível** com as **características físicas, mecânicas e energéticas adaptadas** ao gaseificadores de arraste
- **Redução do custo de moagem, aumentando a friabilidade**

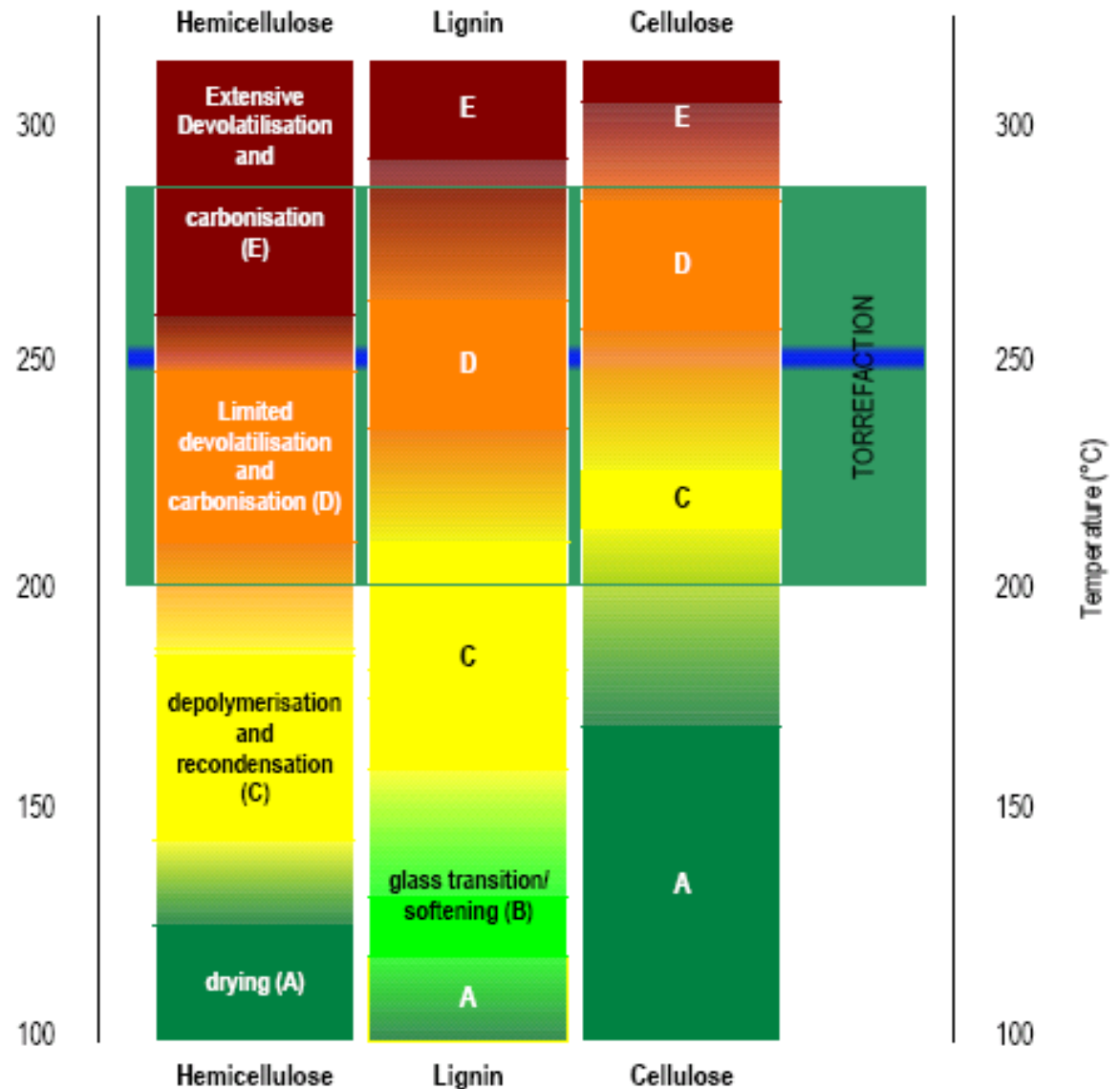
## Gargalos técnicos :

- **Reprodutibilidade** do tratamento
- **Homogeneidade** do tratamento em toda a carga de biomassa
- Dificuldade de garantir um **ganho nas propriedades** desejadas
  - ↳ **Estudos fundamentais ainda necessários** para definir os tratamentos mais adaptados

# Fenômenos reacionais

A pirólise é um **processo complexo** com reações endo. e exotérmicas

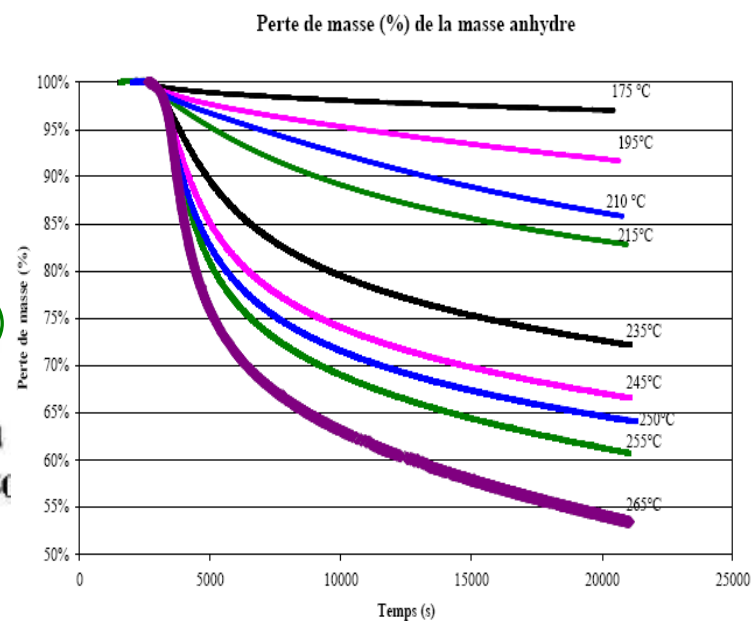
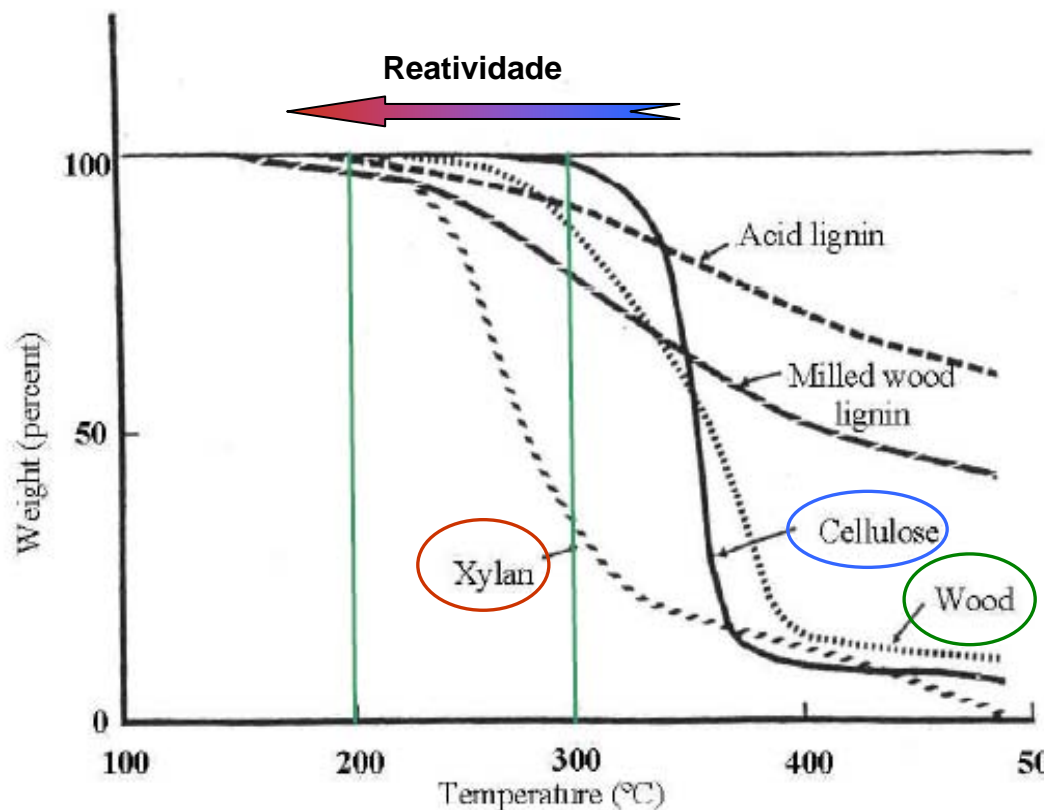
- A zona **(A)** = fase de secagem
- Quando  $T \uparrow$ , as reações mudam para as zonas **(C)** e **(D)** = fase de depolimerização/recondensação e devolatilização/carbonização
- Zona **(E)** = intensa devolatilização



Fenômenos físico-químicos dos componentes lignocelulósicos durante o tratamento térmico (Bergman, 2005)

# Composição da biomassa – perdas de massa

Perda de massa com ATG de Celulose, Hemicelulose, Lignina = madeira

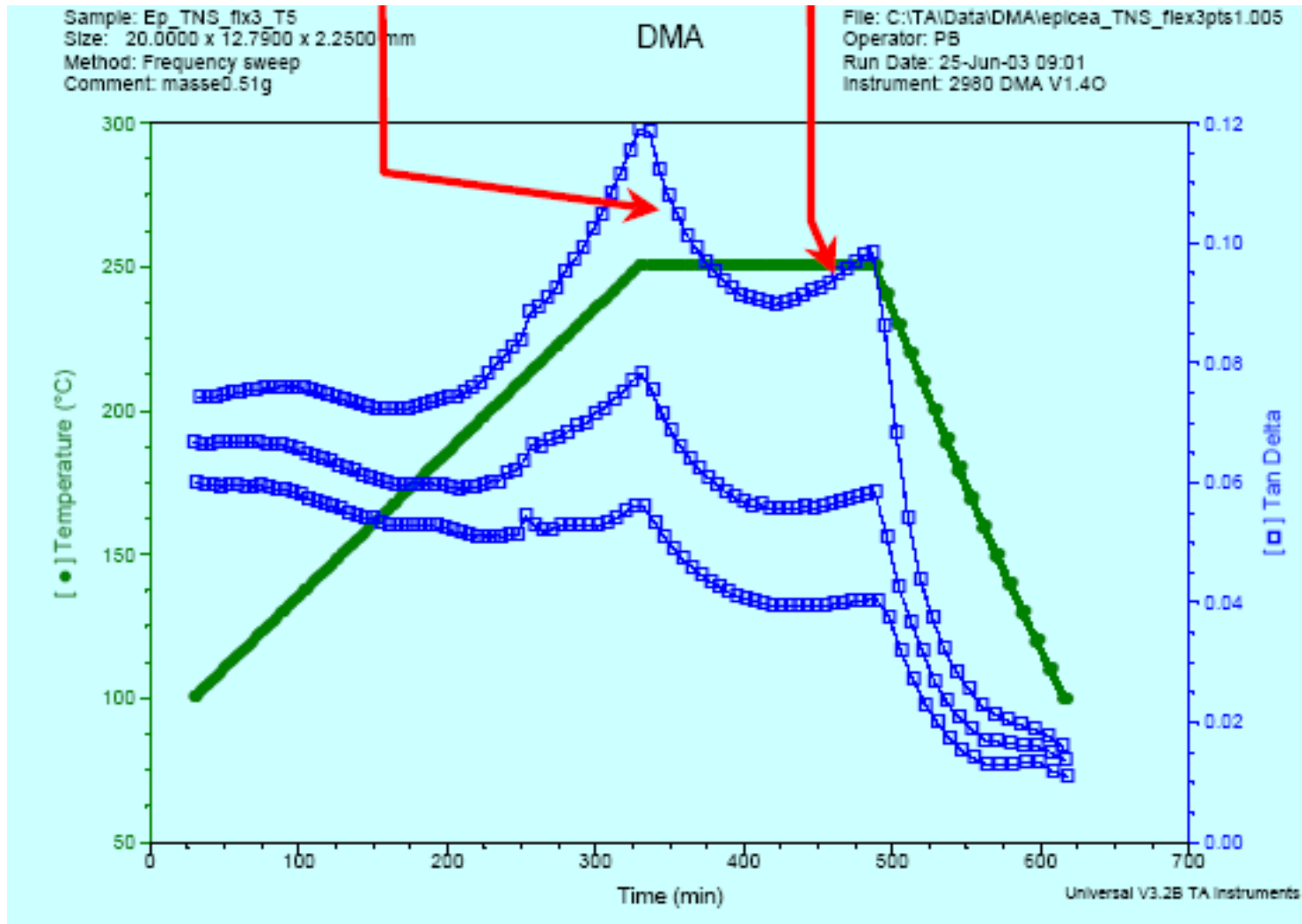


Shafizadeh, 1971

Perda de massa com ATG de *Fagus* em atmosfera neutra (Rousset, 2004)

Os estudos mostram que a **decomposição** térmica da madeira será controlada pela **reação mais lenta**, a degradação da **celulose**.

## Degradação e re-estruturação das macromoléculas durante o tratamento térmico (DMA)



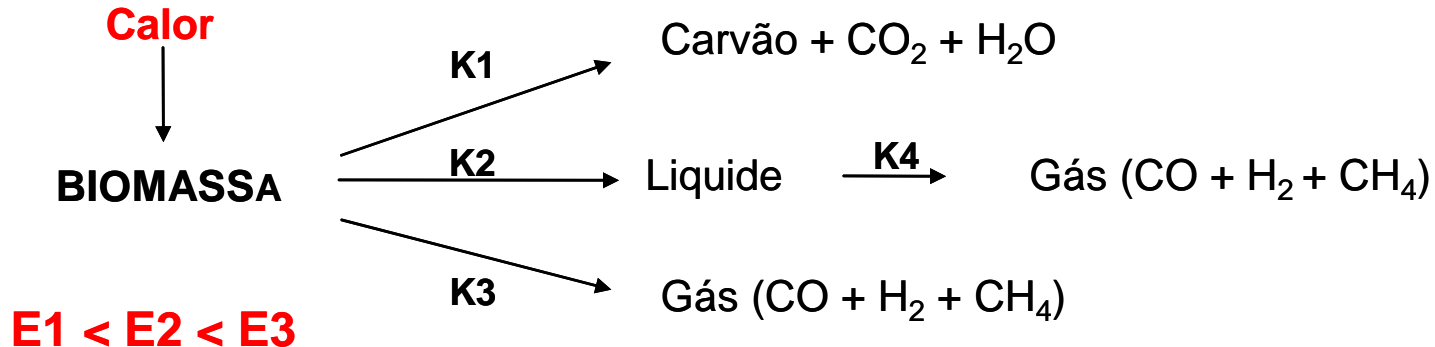
Perré, 2007

Duas abordagens diferentes :

1. Descrever o comportamento global da madeira a partir da **evolução dos principais componentes** segundo a equação :

$$\text{madeira} = \% \text{ celulose} + \% \text{ lignina} + \% \text{ hemiceluloses}$$

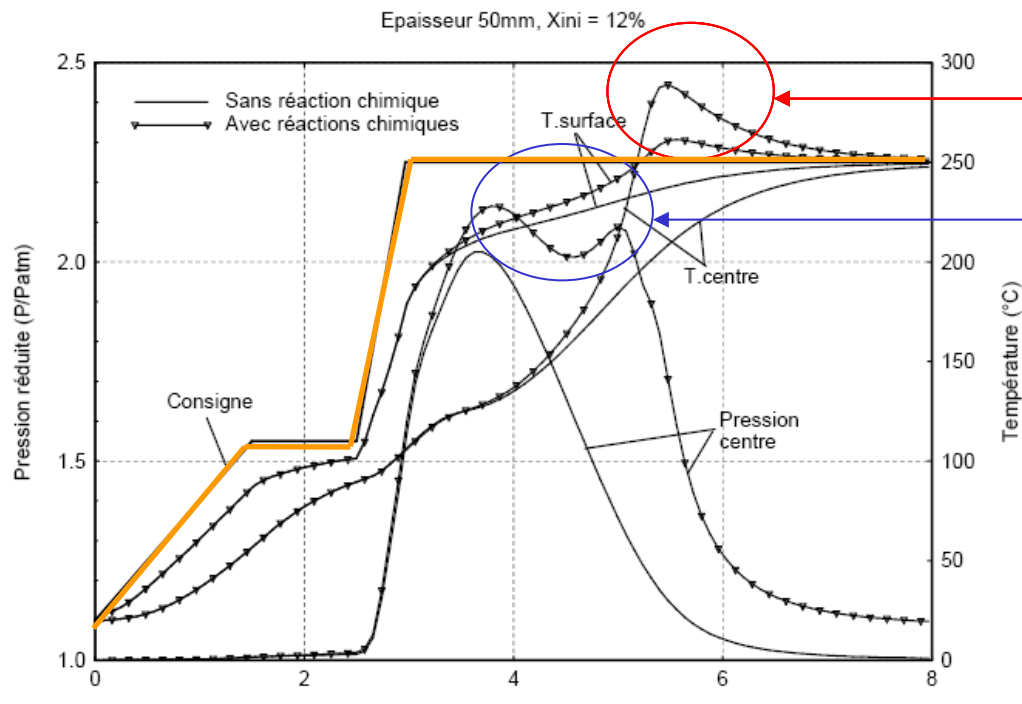
2. Classificar os produtos da **degradação da biomassa** considerada como um **elemento homogêneo** somente, em produtos não condensáveis (gás), condensáveis (líquido) e sólidos (carvão)



# Modelagem das reações

Uma descrição **detalhada** dos fenômenos é **necessária**

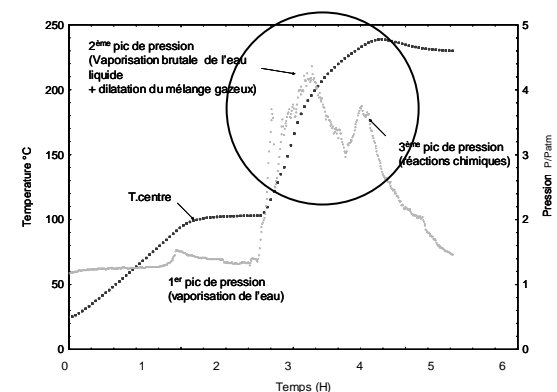
- Existem **poucos trabalhos** na modelagem da torrefação da biomassa e com resultados parcialmente encorajadores
- Geralmente, esses modelos **não permitem** uma descrição **detalhada** dos mecanismos reacionais
- Levar em conta os mecanismos físicos e químicos : modelo de Rousset (2006) a partir de um modelo de secagem *TransPore* (Perré, 1997)



Temperaturas e pressões simuladas com e sem as reações químicas. Espessura = 50mm ; Umidade = 12%. (Rousset, 2006)

**Exotermicidade das reações**

**2 picos de pressão : vaporização e devolatilização**



## Resíduo sólido

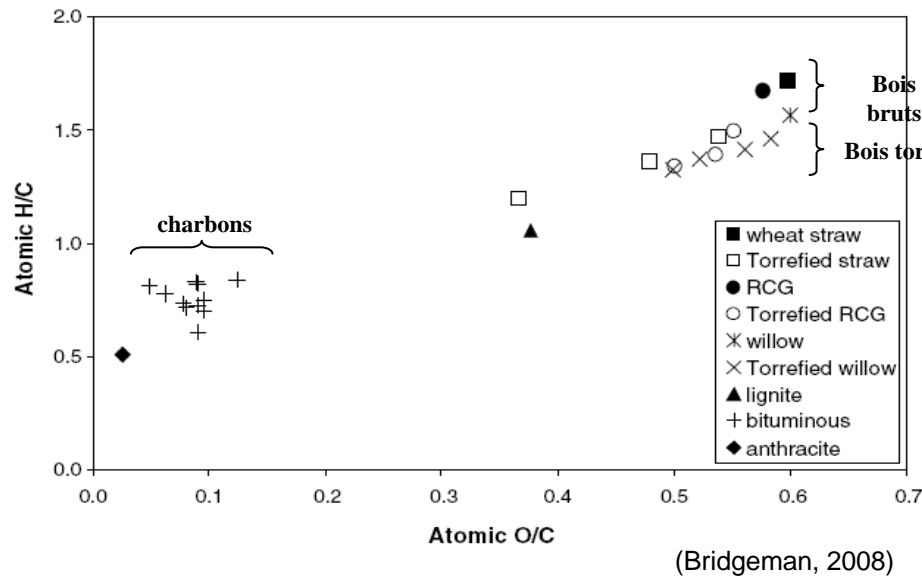
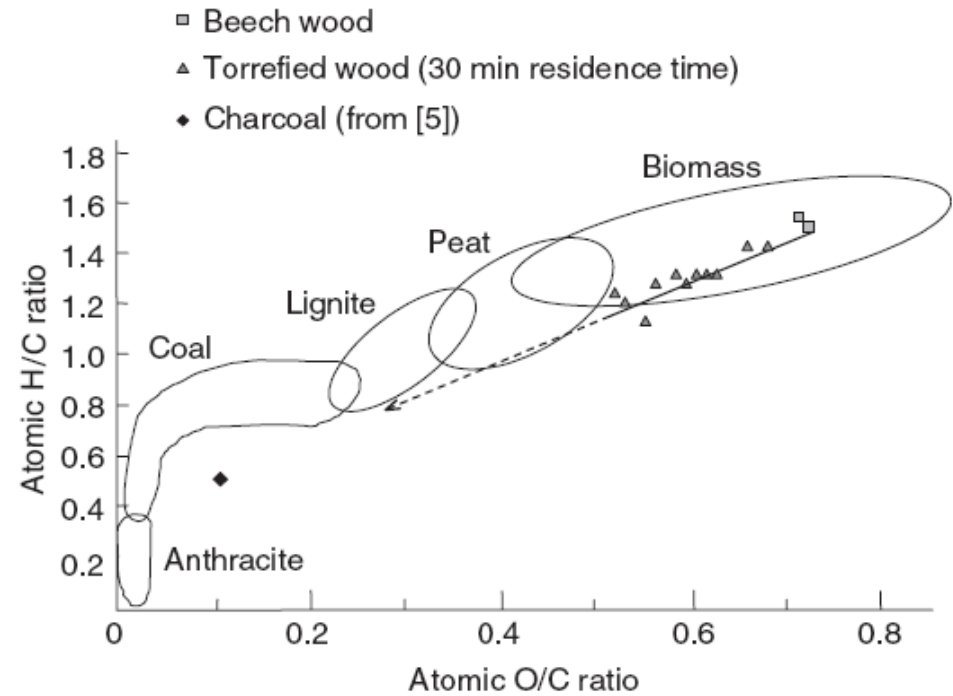
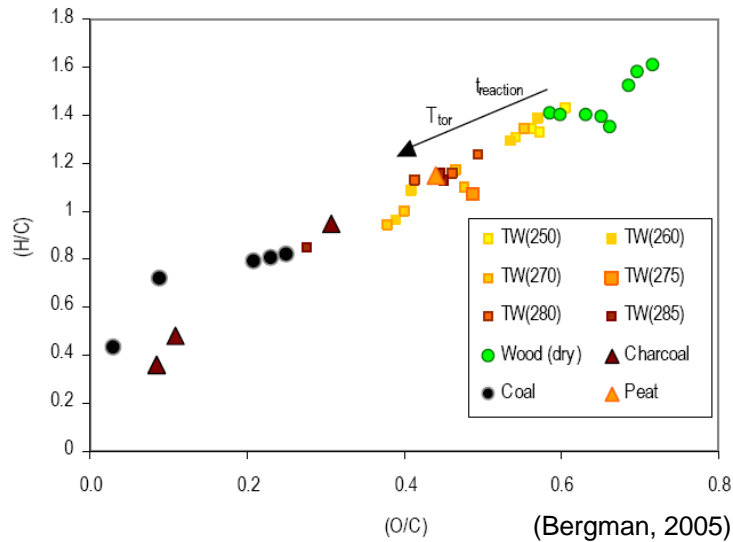


Diagrama para diferentes biomassas e produtos não lignosos

- Emissões de O e H > as emissões de C durante as reações

- H/C e O/C ↘ qd t° ↗

## Os condensáveis

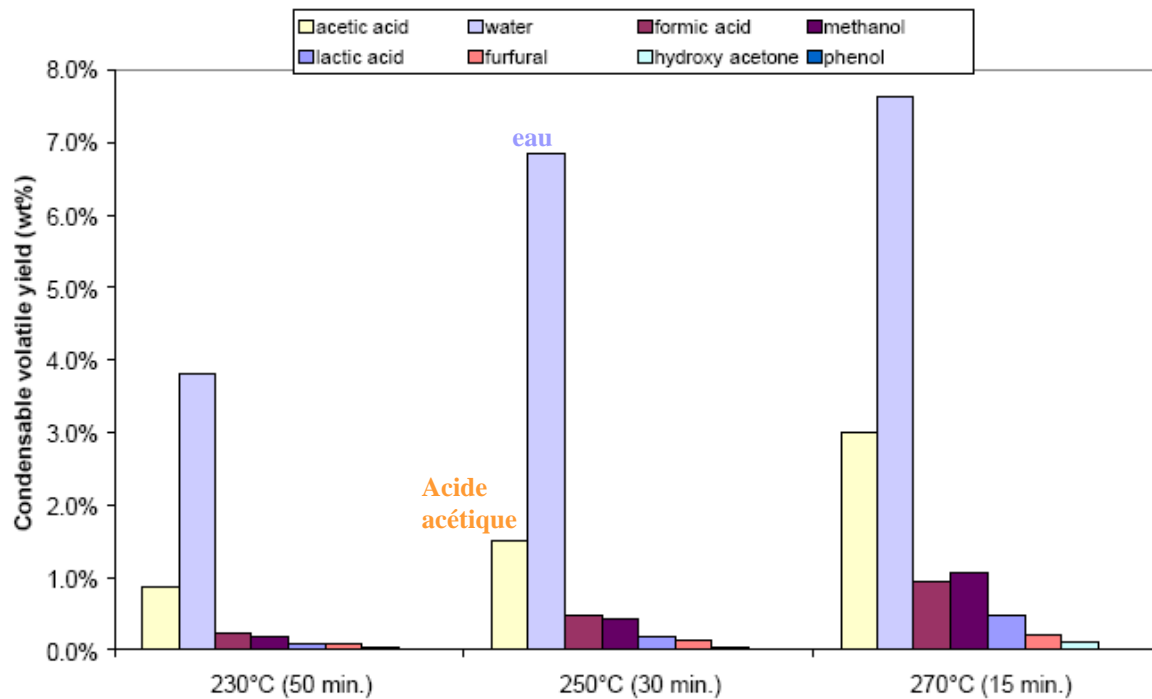


Figure 3.6 *Product yields of condensable volatiles formed in torrefaction of willow at different conditions*

(Bergman, 2005)

Massa de condensáveis ↗ com t°



# Os incondensáveis

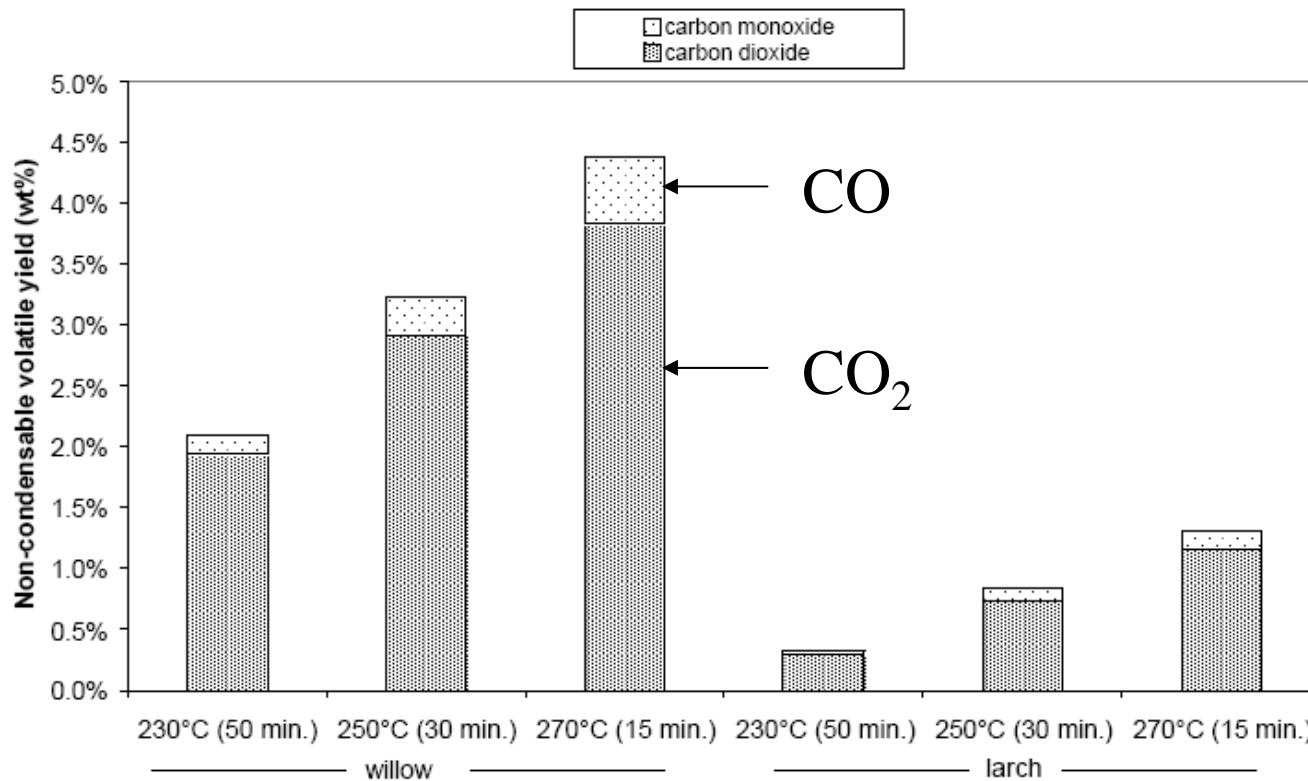


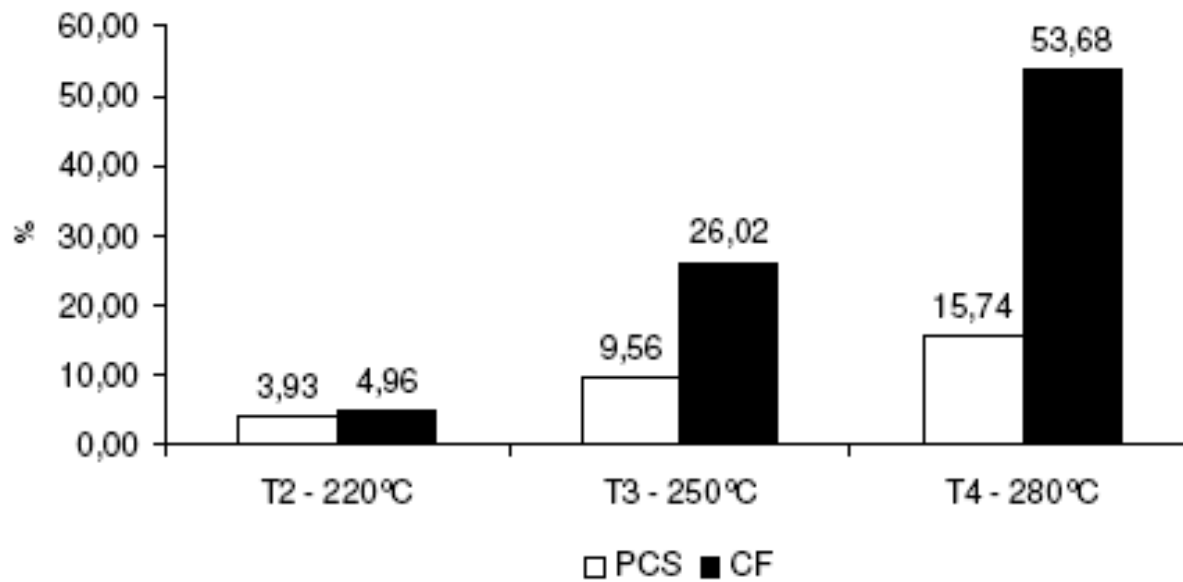
Figure 3.8 *Product yields of non-condensable volatiles formed in torrefaction at different conditions, for willow and larch*

(Bergman, 2005)

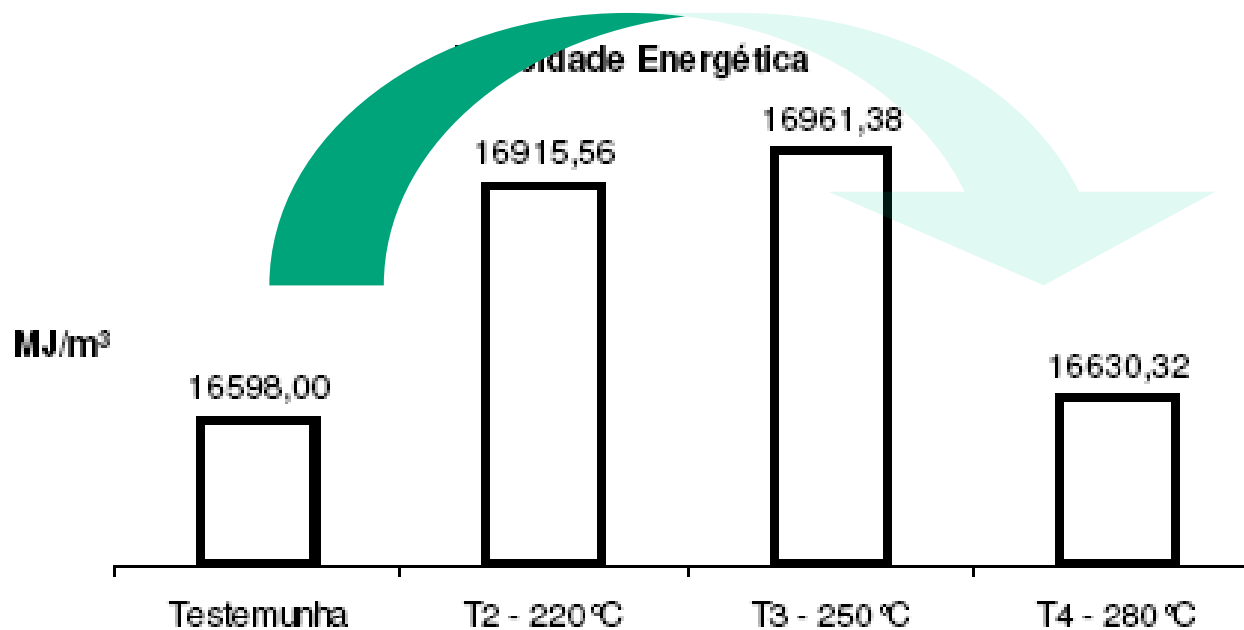
Essencialmente CO<sub>2</sub>

Massa dos incondensáveis ↗ com temperatura

# Poder calorífico



Ganhos percentuais em Poder Calorífico Superior e Carbono Fixo da madeira, de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos



Densidade energética da madeira de *Eucalyptus grandis* sob três tratamentos térmicos.

(Rodrigues, 2009)

# Rendimento calorífico

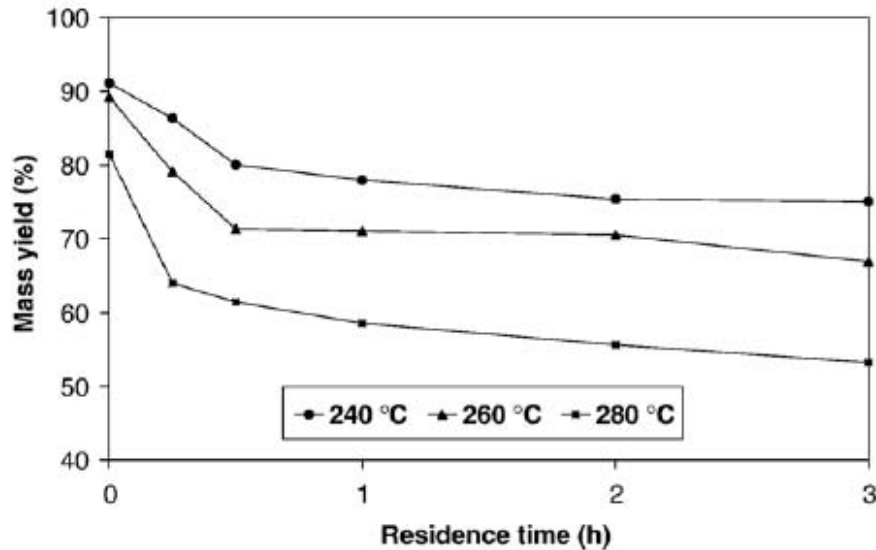


Fig. 1 - Variation in the mass yield of the torrefied samples.

- Poder calorífico  $\approx$  constante entre 15min e 2h
- Diminuição importante do rendimento calorífico a 280°C



**Ganho na friabilidade?**

$$+ \text{ Heating value yield (\%)} = \frac{M_f \text{ GCV}_f}{M_o \text{ GCV}_o} \times 100$$

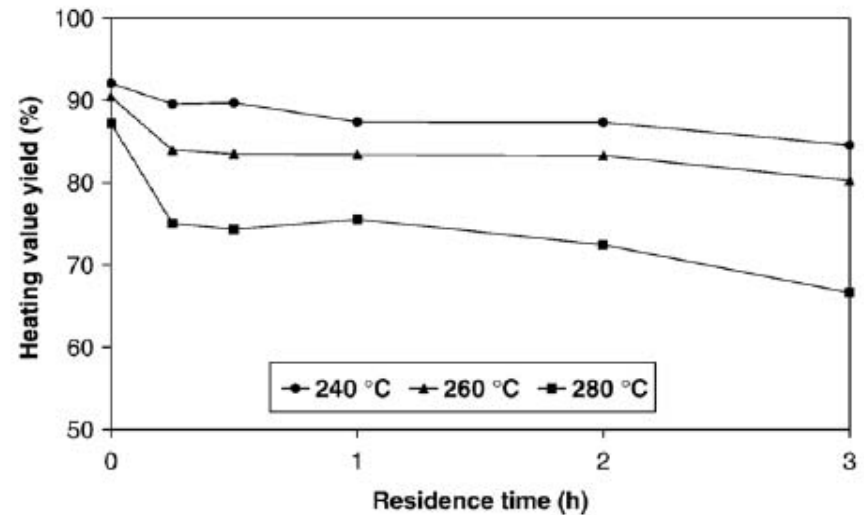
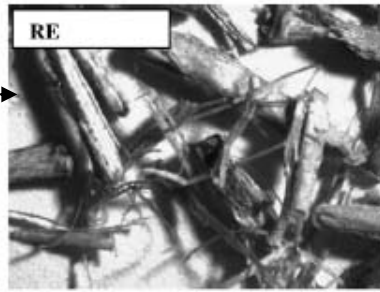


Fig. 2 - Variation in the heating value yield of the torrefied samples.

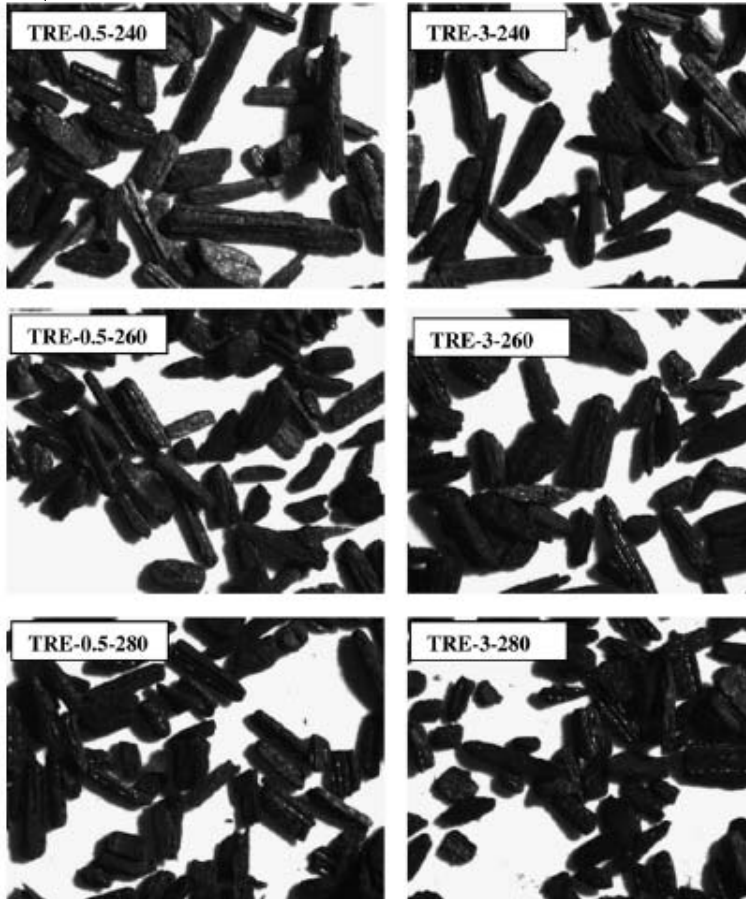
(Arias, 2008)

# Morfologia da madeira torrificada

não torrificada



Torrificada 30min,  
240°C



- Desaparecimento do aspecto « fibroso » após a torrefação → facilita a fluidização
- Comprimento das partículas (diâmetro  $\approx$  ct) quando  $\nearrow$   $t^\circ$  e  $t(h)$

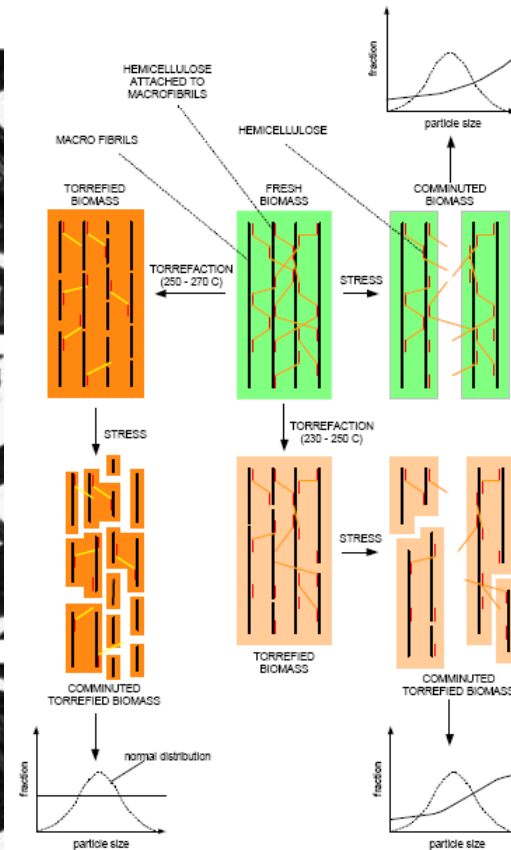


Figure 4.7 Artist impression of particle breakdown of fresh biomass and torrefied biomass

Madeira bruta :  
Ruptura na direção  
das fibras

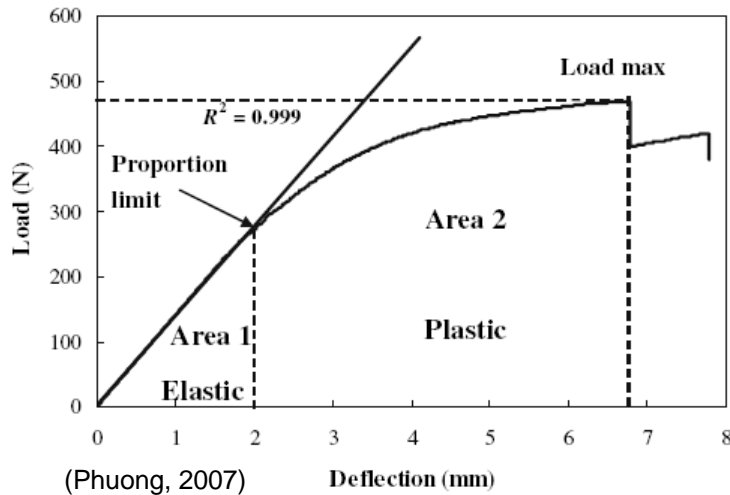
Madeira torrificada:  
Ligações  
fragilizadas  
⇒ Ruptura das  
fibras  
⇒ formas mais  
tetraédricas

Fig. 3 – Optical photomicrographs of the size fraction  $>450 \mu\text{m}$  for the torrefied samples obtained at different experimental conditions.

(Arias, 2008)

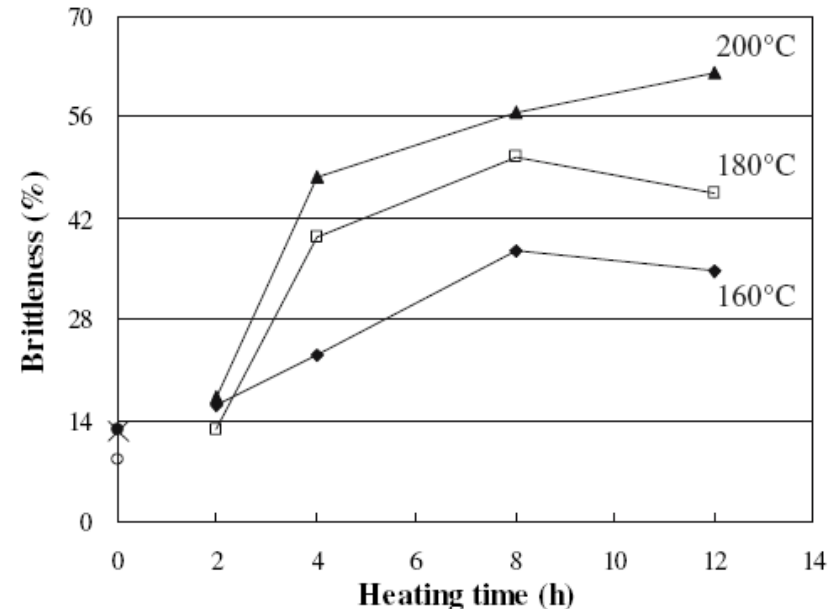
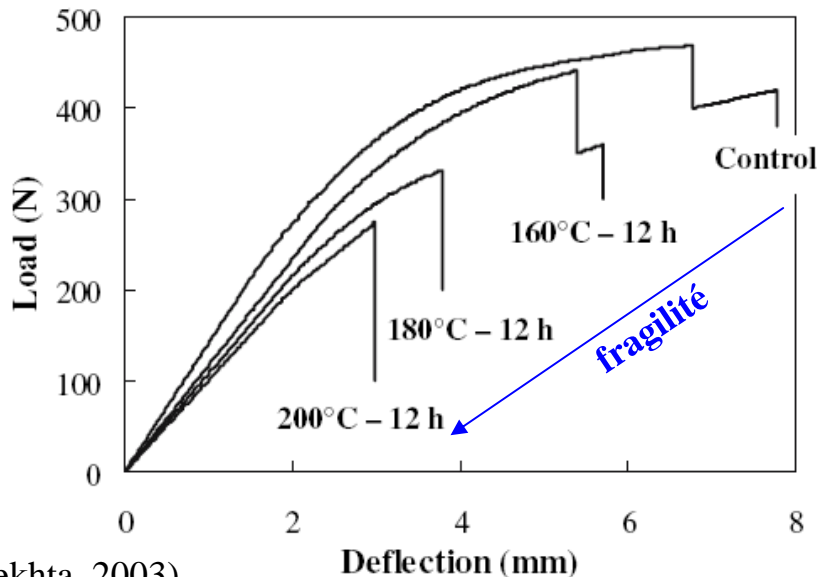
# Moagem da madeira torrificada

- Não existe normas
- Geralmente medido pelo ensaio de compressão : ruptura da fibra em função da carga

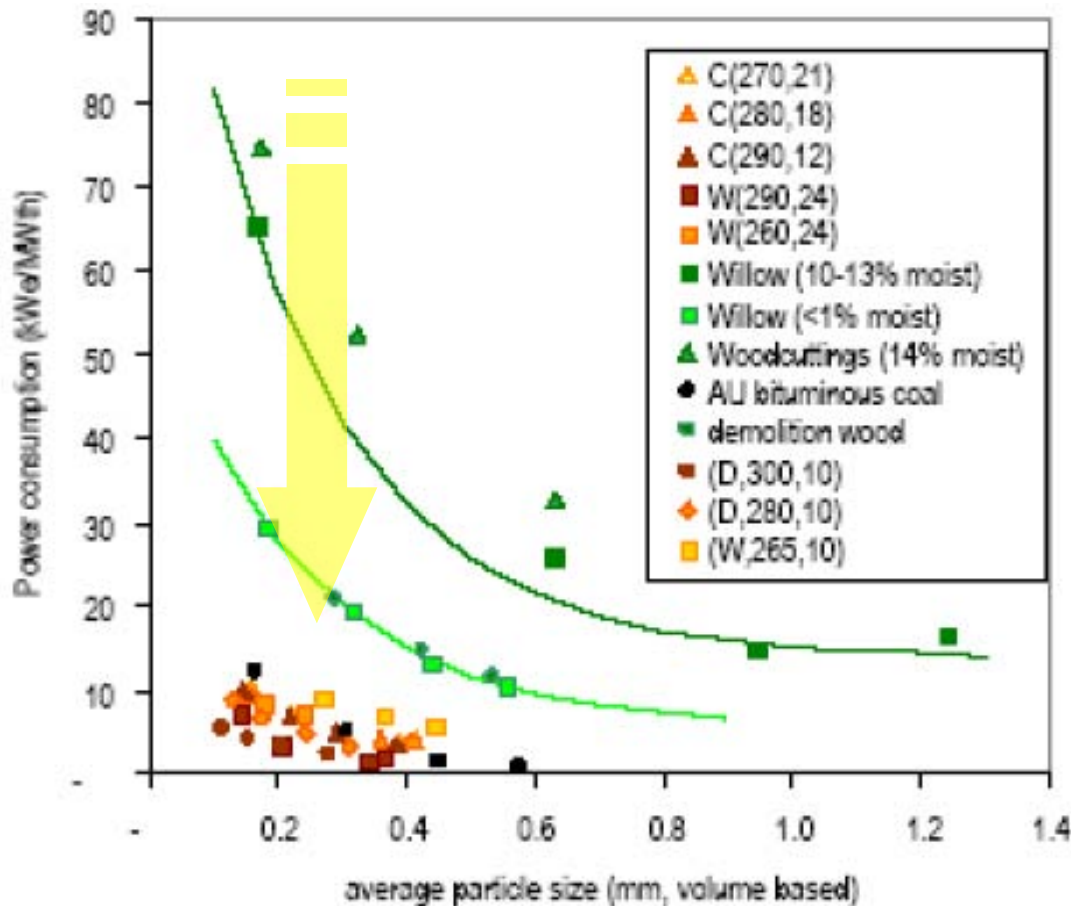


$$\text{Brittleness} = \frac{\text{Area 1}}{\text{Area 1} + \text{Area 2}} \times 100(\%)$$

Fragilidade ↗ com t° e tempo



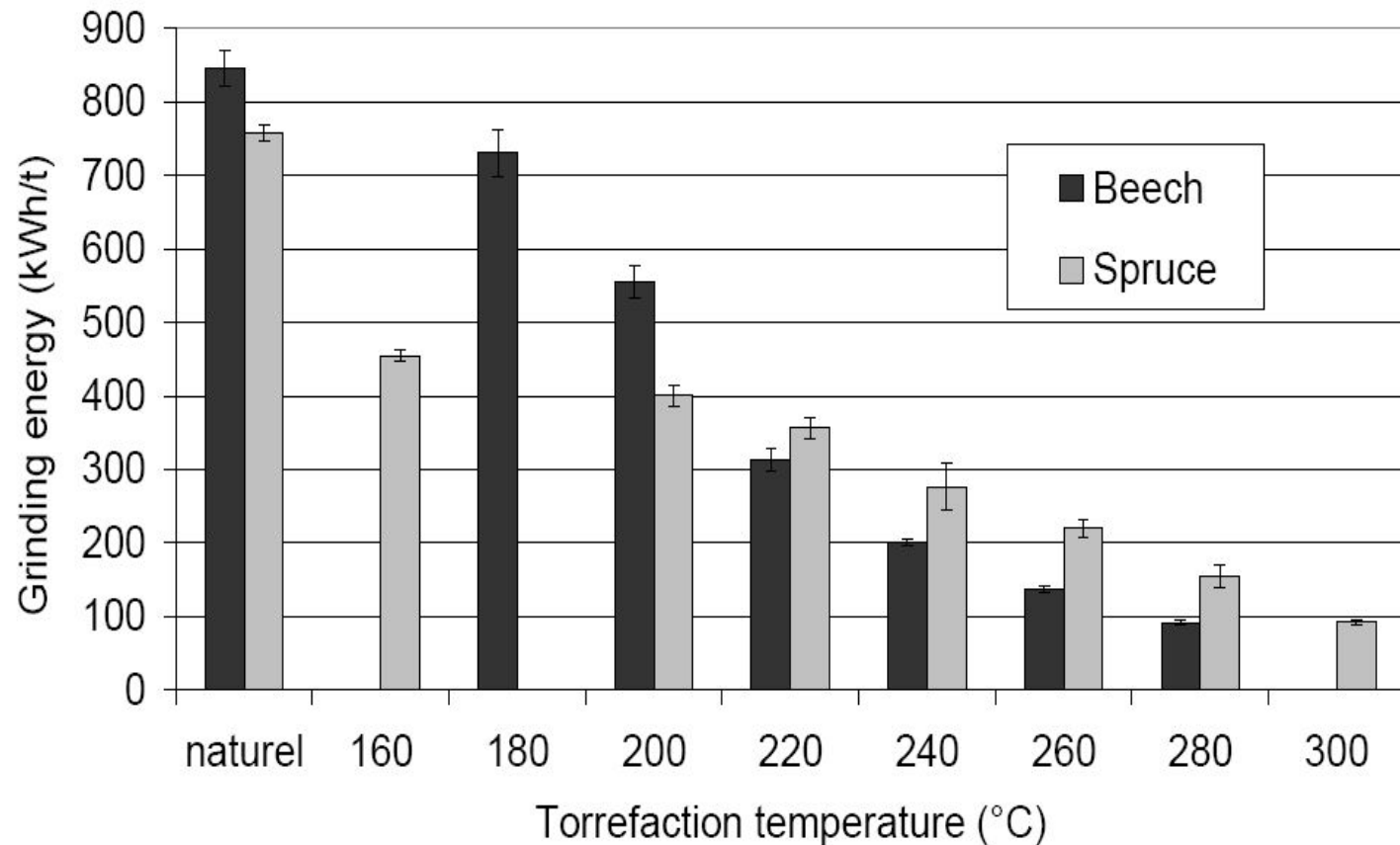
## Consumo energético da moagem



- **Redução** importante do consumo quando a biomassa está tratada
- **Redução** varia numa faixa de **70 a 90%**
- Grande **similaridade** da biomassa tratada com coque
- Consumo função da granulometria: C  $\nearrow$  D  $\searrow$

Consumo energético versus a granulometria (Bergman, 2005)

# Moagem da madeira torrificada

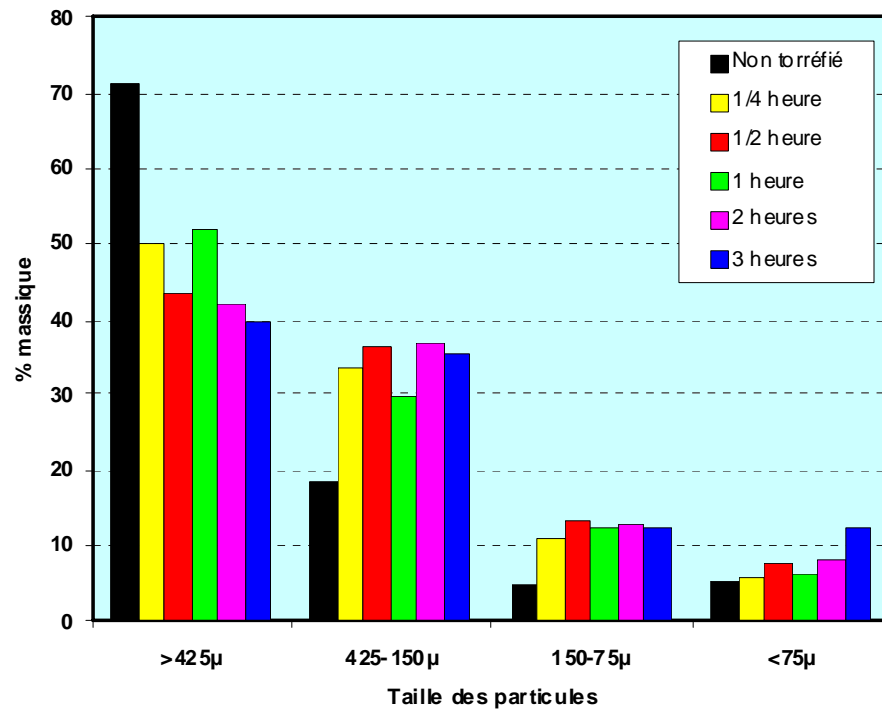


Consommation énergétique pour le broyage de lots de hêtre et d'épicéa torréfiés à différentes températures (tiré de Repellin et al., 2008)

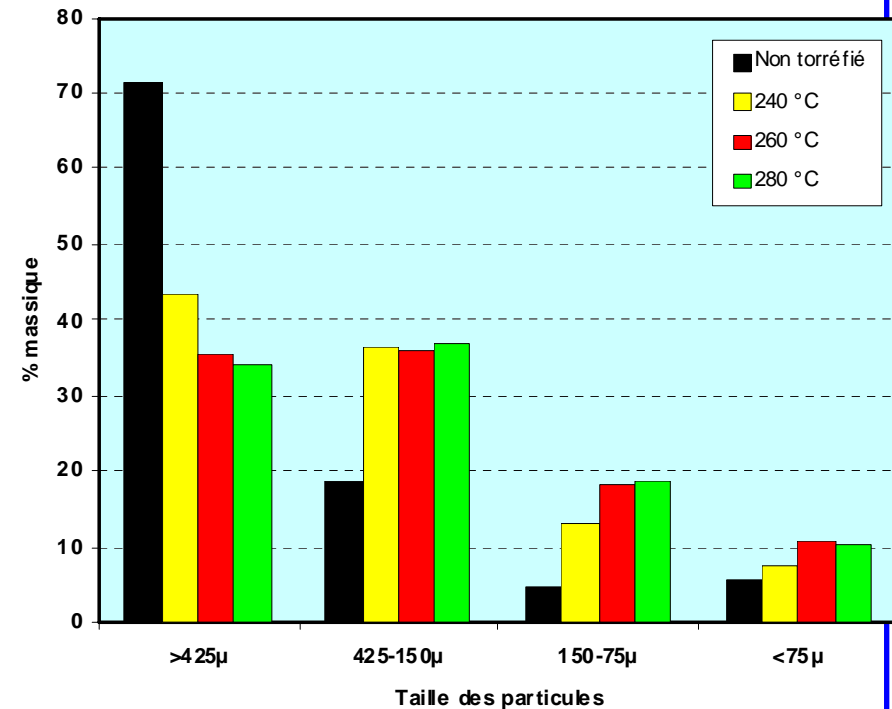
(Energia da moagem da madeira bruta) / (Madeira torrificada)  $\approx$  5-8

# Granulometria da madeira torrificada

T torréfaction = 240 °C



Temps de séjour = 3 heures



(Arias, 2008)

Após a moagem e peneiração, a madeira torrificada gera **mais finos** que a madeira não tratada



**Contexte**

La production de biocarburants ou d'hydrogène par gazéification de biomasse en Réacteur à Flux Entraîné (RFE) est une des voies les plus prometteuses, car travaillant à haute température, elle produit peu de méthane et de goudrons.

↳ **Mais** : temps de séjour court (≈ 1 s) nécessite un **broyage fin de la biomasse très gourmand en énergie**

↳ **Intérêt des travaux** : Torréfaction de biomasse = procédé de pré-conditionnement de la biomasse permettant de réduire la consommation d'énergie de broyage

↳ **Objectif de ces travaux** : Etude du procédé complet de torréfaction, depuis la torréfaction de biomasse jusqu'à l'injection dans un réacteur sous pression en passant par une modélisation fine des mécanismes mis en œuvre

**Modélisation multiphysique de la torréfaction**

Description :

- des transferts couplés de chaleur et de masse dans le milieu poreux
- des réactions chimiques, thermo-chimiques, de dégradation des constituants du bois

**Caractérisation mécanique des bois torréfiés**

Comparaison Appareil

Comparaison quasi-statique

**Expériences de torréfaction**

Pour l'Institut de Technologie

**Broyage des bois torréfiés**

Bois à broyer

Comparaison des énergies de broyage du bois brut et torréfié

Même consommation

LE feu inversé

LE feu inversé

**Injection de bois torréfié dans un gazéifieur sous pression**

Présentation :

- sous forme de slurry
- sous forme de mousses
- sous forme solide par vis de compression à pas variable

**Torréfaction de bois à échelle pilote**

**Modèle numérique : Aide à la conduite de procédé**

**Quelques perspectives**

|  |  |   |                           |
|--|--|---|---------------------------|
| Optimisation de la torréfaction<br>Influence de la température, du temps de séjour et de l'atmosphère sur le produit torréfié<br>Analyse chimique des produits torréfiés | Broyage<br>consommation énergétique du broyage de différents bois torréfiés<br>Caractérisation de la granulométrie des broyats | Caractérisation mécanique des bois torréfiés<br>Mise en place d'une caméra rapide dans le dispositif de compression dynamique | Etude technico-économique |
|--|--|---|---------------------------|





Obrigado pela atenção

Dr Patrick Rousset  
[patrick.rousset@cirad.fr](mailto:patrick.rousset@cirad.fr)

