

## II FÓRUM NACIONAL DE CARVÃO VEGETAL

# QUALIDADE DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Angélica de Cássia O. Carneiro

Viçosa- MG

# 1. Aspectos econômicos do setor

Consumo de Carvão Vegetal - Brasil									1.000 mdc
Anos	Carvão Vegetal de Origem Nativa			Carvão Vegetal Originário de Florestas Plantadas			TOTAIS		
	Consumo	%	Índice	Consumo	%	Índice	Consumo	%	Índice
1997	5.800,0	24,6	100	17.800,0	75,4	100	23.600,0	100,0	100
1998	8.600,0	32,6	148	17.800,0	67,4	100	26.400,0	100,0	112
1999	8.070,0	30,0	139	18.830,0	70,0	106	26.900,0	100,0	114
2000	7.500,0	29,5	129	17.900,0	70,5	100,5	25.400,0	100,0	108
2001	9.115,0	34,8	157	17.105,0	65,2	96	26.220,0	100,0	111
2002	9.793,0	36,5	169	17.027,0	63,5	95,5	26.820,0	100,0	114
2003	12.216,0	41,8	210	16.986,0	58,2	95	29.202,0	100,0	124
2004	19.490,0	52,2	336	17.430,0	47,8	98	36.920,0	100,0	156
2005	18.862,3	49,6	325	19.188,8	50,4	108	38.051,1	100,0	161
2006	17.189,0	49,0	296	17.936,0	51,0	101	35.125,0	100,0	149
2007	17.653,0	48,0	304	19.125,0	52,0	107	36.778,0	100,0	156
2008	15.630,1	47,4	270	17.339,1	52,6	98	33.437,2	110,0	142

## Consumo de Carvão por Estado

1.000 mdc

ESTADOS	2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%
MG	24.420	66,1	25.158	66,1	21.017	59,8	21.908	59,6	20.935,0	63,5	13.495,8	66,79
SP	890	2,4	984	2,6	915	2,7	1.140	3,1	125,0	0,4	112	0,51
RJ	428	1,2	399	1,05	358	1,0	368	1,0	280,0	0,8	319	1,51
ES	1.440	3,9	1.456	3,8	1.133	3,2	1.058	2,9	850,0	2,6	180	0,9
BA	762	2,1	432	1,15	562	1,6	492	1,3	438,2	1,3	435,7	2,17
MS	480	1,3	750	2,0	780	2,2	892	2,4	1050,0	3,2	710	3,52
MA / PA	7.900	21,4	8.272	21,7	9.780	27,8	10.340	28,1	9291,0	28,2	4.953,5	24,6
Outros	600	1,6	600	1,6	580	1,7	580	1,6	xxx	xxx	xxx	xxx
TOTAIS	36.920	100,0	38.051	100,0	35.125	100,0	36.778	100,0	32969,2	100	20206,0	100,0

Fonte: Anuário, 2009 - AMS

## Consumo de Carvão pelos Diversos Segmentos - Brasil

1.000 mdc

Segmentos	2003		2004		2005		2006	
	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%
Usinas Integradas a Aço	3.383	11,6	3.984	10,8	4.499,0	11,8	4.579	13,0
Prod. Independ. de Ferro Gusa	20.220	69,2	27.590	74,7	27.817,0	73,1	25.116	71,5
Ferroligas	3.164	10,8	3.002	8,1	3.191,0	8,4	3.091	8,8
Tubos de Ferro Nodular	302	1,0	357,2	1,0	318,5	0,9	278	0,8
Outros (*)	2.133	7,3	1.987	5,4	2.226,0	5,8	2.061	5,9
<b>TOTAIS</b>	<b>29.202</b>	<b>100,0</b>	<b>36.920,2</b>	<b>100,0</b>	<b>38.051,5</b>	<b>100,0</b>	<b>35.125</b>	<b>100,0</b>

Segmentos	2007		2008		2009		2010	
	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%	Consumo	%
Usinas Integradas a Aço	5.527	15,0	5.710,0	17,3	4.850,1	24,0		
Prod. Independ. de Ferro Gusa	25.706	69,9	23.826,5	72,3	12.462,2	61,7		
Ferroligas	3.097	8,4	3.152,7	9,6	2.574,7	12,7		
Tubos de Ferro Nodular	288	0,8	280,0	0,8	319,0	1,6		
Outros (*)	2.160	5,9	x-x-x-x	x-x	x-x-x-x-x-x	x-x-x		
<b>TOTAIS</b>	<b>36.778</b>	<b>100,0</b>	<b>32.969,2</b>	<b>100,0</b>	<b>20.206,0</b>	<b>100,0</b>		

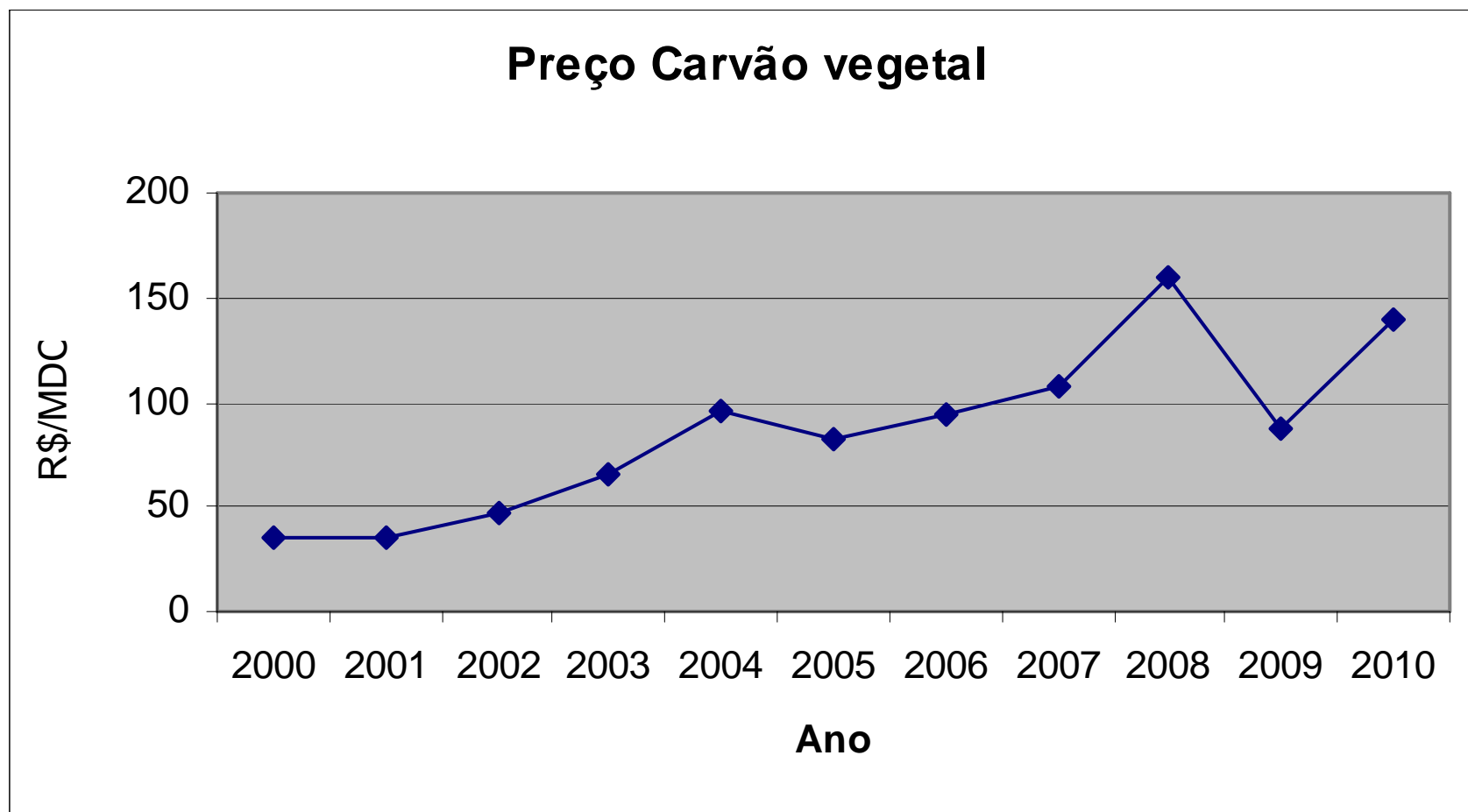
Obs 1. A partir de 2008 só foi computado o carvão vegetal consumido pelas siderúrgicas e pelas ferroligas

Fonte: AMS, 2010

## Produção de Ferro Gusa Independente a Carvão Vegetal por Estado/Região (t)

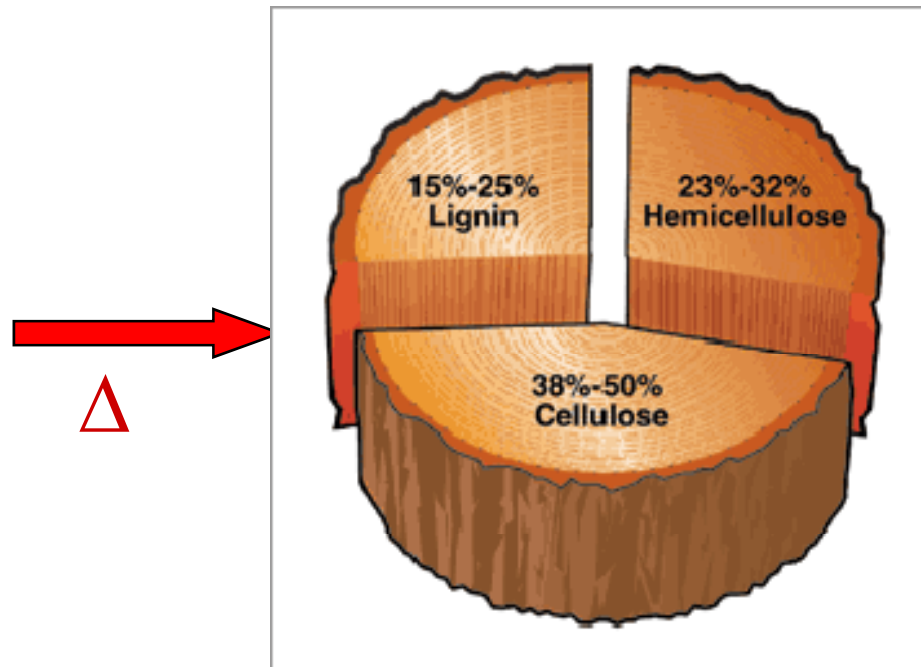
Ano	Minas Gerais	%	Carajás	%	Esp. Santo	%	Mat G. Sul	%	TOTAIS
1993	4.158.727	86,6	398.354	8,3	245.743	5,1	0	0,0	4.802.824
1994	4.543.995	83,4	623.083	11,5	279.761	5,1	0	0,0	5.446.839
1995	4.118.810	80,0	632.216	12,3	334.269	6,5	60.300	1,2	5.145.595
1996	3.344.009	76,7	694.194	15,9	255.593	5,9	65.592	1,5	4.359.388
1997	3.486.668	73,2	942.632	19,8	250.470	5,3	82.800	1,7	4.762.570
1998	3.407.145	68,7	1.218.483	24,6	242.977	4,9	91.500	1,8	4.960.105
1999	3.664.352	67,8	1.390.543	25,8	252.520	4,7	93.998	1,7	5.401.413
2000	4.039.932	65,7	1.652.000	26,9	372.925	6,1	80.520	1,3	6.145.377
2001	4.005.548	61,5	2.021.500	31,1	387.185	5,9	96.000	1,5	6.510.233
2002	4.043.163	59,8	2.245.000	33,2	375.727	5,6	96.000	1,4	6.759.890
2003	5.193.060	64,1	2.364.500	29,2	450.304	5,5	96.000	1,2	8.103.864
2004	6.302.964	62,5	3.102.750	30,7	499.358	5,0	180.000	1,8	10.085.170
2005	5.797.999	59,3	3.228.287	33,0	505.795	5,2	241.653	2,5	9.773.832
2006	5.353.664	56,5	3.452.400	36,5	376.755	4,0	282.800	3,0	9.465.716
2007	5.042.637	52,4	3.927.800	40,8	350.521	3,6	307.100	3,2	9.628.058
2008	4.303.302	50,3	3.543.718	41,4	280.865	3,3	424.500	5,0	8.552.485

## PREÇOS MÉDIOS DO CARVÃO VEGETAL EM MINAS GERAIS



**27/10/2010 R\$ 90,00**

## 2. Carbonização da Madeira



- **Carbonização** ou **Pirólise**: degradação térmica em ambiente com atmosfera controlada de oxigênio.

- O processo pode ser **autotérmico** ou **alotérmico**.

### 3. Qualidade da madeira para produção de carvão vegetal

---



X





# Qualidade da madeira

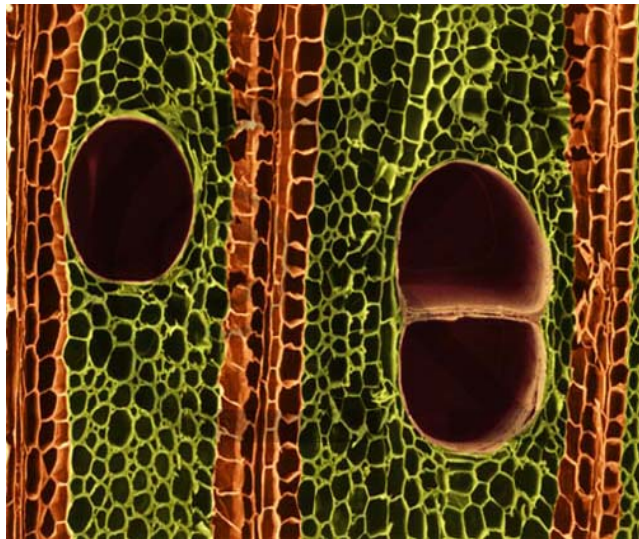


Foto: [www.sementesquality.com.br](http://www.sementesquality.com.br)

**QUALIDADE** É UMA COMBINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E ANATÔMICAS DE UMA ÁRVORE OU DE SUAS PARTES QUE PERMITEM UMA MELHOR **UTILIZAÇÃO** PARA DETERMINADO **USO FINAL**.

**QUALIDADE = ADEQUAÇÃO PARA USO FINAL**

# Silvicultura baseada em volume

Foto: Casiraghi, 2007



**Tabela 5.** Valores do incremento médio anual, massa seca, massa de lignina, energia disponível e massa de carvão vegetal referentes ao diferentes materiais genéticos.

Material genético	IMA (m <sup>3</sup> /ha)	Massa seca (ton/ha.ano)	Massa de lignina (t/ha.ano)	Energia (kW.h)/ha.ano	Massa de carvão vegetal (t/ha.ano)	Massa de carbono (t/ha.ano)
1	49,1 a	26,9 a	8,1 a	143.678,9 a	8,1 a	13,1 a
2	43,9 bc	22,3 c	6,7 c	111.388,4 c	6,4 bc	10,7 c
3	47,0 b	23,4 b	7,5 b	121.310,8 b	6,7 b	11,1 b
4	40,0 c	21,9 c	7,0 c	112.726,4 c	6,2 c	10,3 d

Fonte: Santos e Carneiro, 2010

O rendimento e as propriedades do **carvão vegetal** dependem da **qualidade da madeira** que lhe deu origem, do **equipamento** e das **condições operacionais** da carbonização.

## Fatores inerentes a madeira

- + Densidade básica → Alta
- + Composição química → Lignina
- + Espessura parede → Alta
- + Umidade → Baixa
- + Cinzas → Baixa

## Fatores inerentes ao processo

- + Temperatura de carbonização
- + Taxa de aquecimento
- + Pressão
- + Dimensões da madeira
- + Fluxo gasoso



### Aspectos práticos:

- Ser denso;
- Quebrar sem soltar moinha;
- Queimar sem desprender fumaça;
- Isento de tiços, pedras, terra e outras impurezas;
- Granulometria média e uniforme (4-5 cm).

## ESCOLHA DA ESPÉCIE

- ✚ Alto teor de lignina
- ✚ Alta densidade
- ✚ Alta produtividade
- ✚ Resistência a pragas e doenças
- ✚ Resistência a condições adversas



### Principais materiais genéticos comerciais utilizados

*E. grandis*

*E. urophylla*

*E. cloesiana*

*E. camaldulensis*

*E. saligna*

*E. urograndis;*

*E. urocam;*

*outros...*



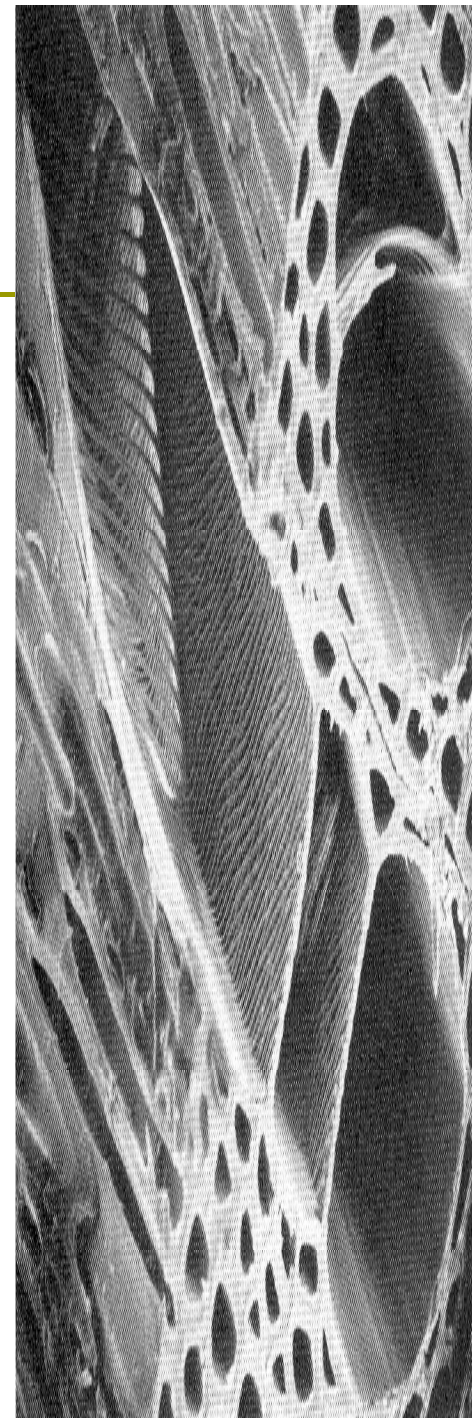
**Tabela 6.** Teor de lignina, Densidade básica e Poder calorífico de diferentes espécies de *Eucalyptus*.

Espécie	Densidade Básica Média (g/cm <sup>3</sup> )	Pode Calorífico Superior (kcal/kg)	Teor de Lignina (%)
<i>E. pilularis</i>	0,482	4989	25,2
<i>E. triantha</i>	0,565	4949	29,4
<i>E. microcorys</i>	0,583	4940	24,2
<i>E. gummifera</i>	0,466	4935	24,2
<i>E. pellita</i>	0,553	5023	25,2
<i>E. globulus</i>	0,474	4733	21,8
<i>E. saligna</i>	0,476	4889	24,6
<i>E. grandis</i>	0,391	4790	23,3
<i>E. saligna</i> - M	0,469	4799	25,9

# DENSIDADE DA MADEIRA

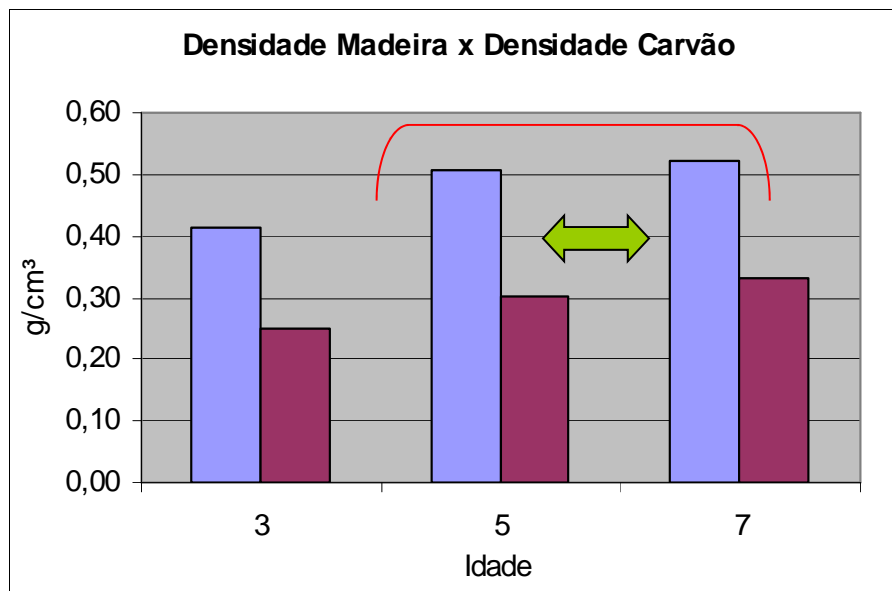
## Fatores que afetam a densidade

- Idade
- Clima
- Localização geográfica
- Práticas silviculturais (espaçamento, idade, adubação, etc)
- Outros (extrativos, posição no tronco, taxa de crescimento)

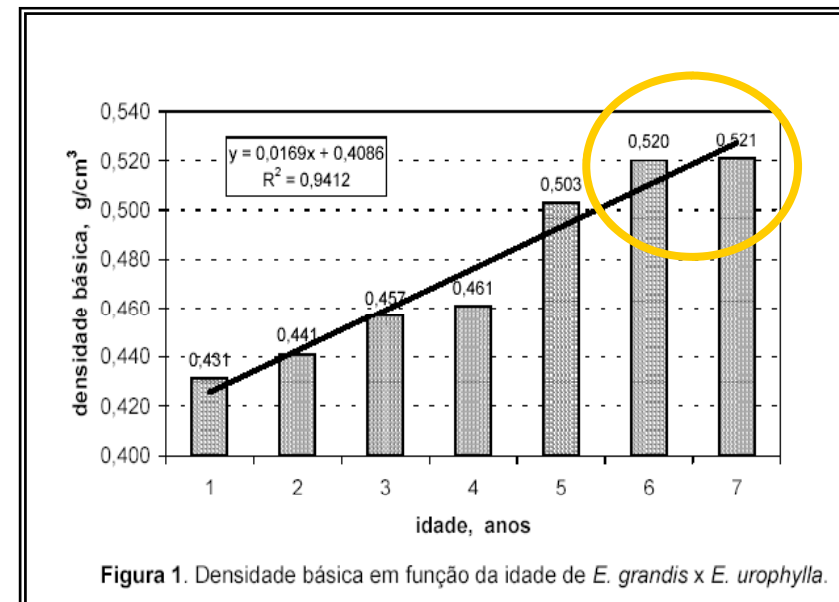


## A densidade da madeira afeta a capacidade de produção das plantas de carbonização

- Maior energia armazenada por unidade de volume
- Reduz os custos de colheita e transporte, em função do menor volume
- Aumento na capacidade de produção dos fornos
- Redução de mão-de-obra



Fonte: Carneiro & Pereira, 2008



Fonte: Alencar, et al, 2002



## IMPORTÂNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL

### Estudo de caso 1

Dados	Carvão vegetal 1	Carvão vegetal 2
Carbono fixo (%)	75	75
Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> )	210	230
Preço R\$/MDC	100	100
Consumo de Carbono fixo por tonelada de gusa - 430 kg		

DADOS	Carvão vegetal 1	Carvão vegetal 2
Consumo de CV por tonelada de gusa	2,73 MDC/t gusa	2,49 MDC/ t gusa
Custo com CV por tonelada de gusa (R\$)	273	249
Ex.: Empresa com produção mensal de 20.000 t gusa usando o CARVÃO VEGETAL 2	<b>QUALIDADE + R\$ 24 /t gusa</b>	

**LUCRO MENSAL = R\$ 480.000,00**



## ***Características do carvão produzido com madeira densa***

---

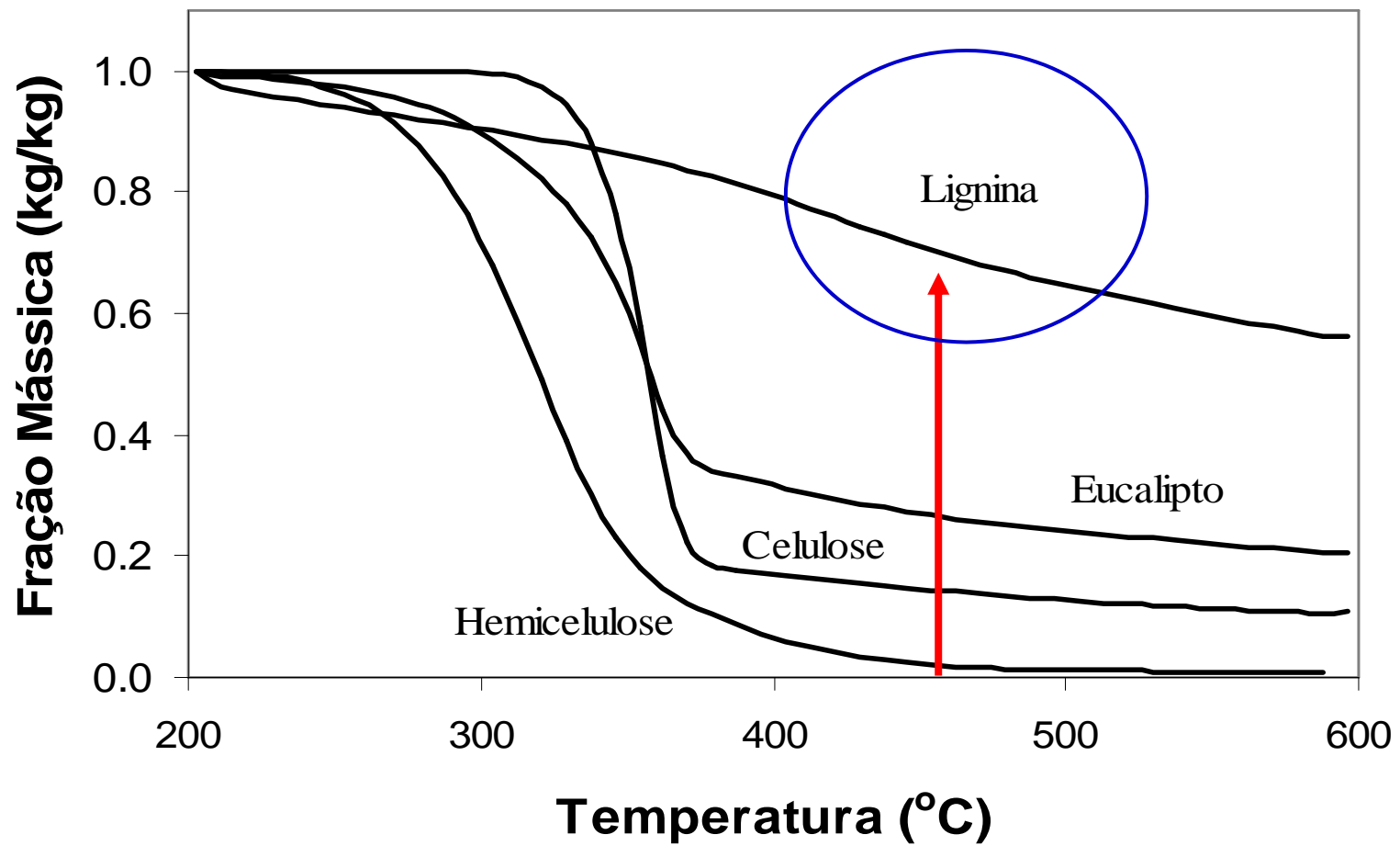
- **Carvão mais denso**
- **Maior massa de Carbono fixo e energia por volume**
- **Carvão menos friável e quebradiço → mais resistente**
- **Reduz custos de transporte → mais massa por unidade volume**
- **Maior rendimento gravimétrico → redução de finos**
- **Maior produtividade dos fornos → Maior aproveitamento do volume dos fornos**
- **Aumenta o tempo de carbonização**

# COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

MADEIRA:

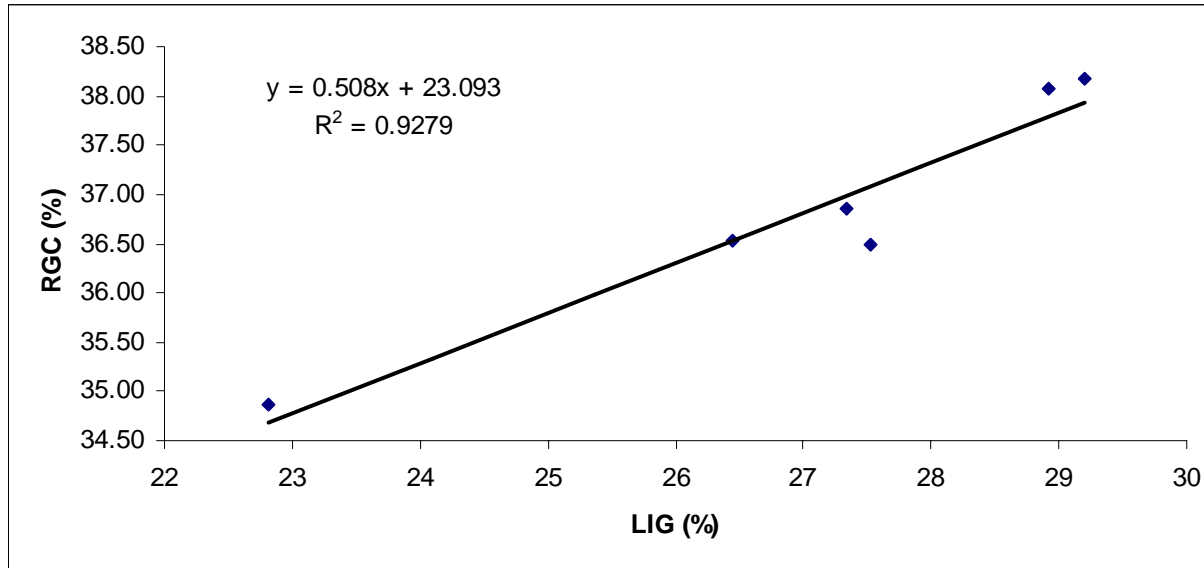
- ✚ Diversos componentes químicos
- ✚ Polímeros difíceis de serem isolados sem alterações significativas
- ✚ Constituídos de polímeros de alto peso molecular
- ✚ Diferentes temperaturas de degradação

COMPONENTE		CONÍFERA (%)	FOLHOSA (%)
CELULOSE		40-45	40-45
HEMICELULOSE	<b>Glucomananas</b>	20	5
	<b>xilanas</b>	10	25-30
LIGNINAS		25-30	20-25
EXTRATIVOS		3-10	3-10
CINZAS		< 1	< 1

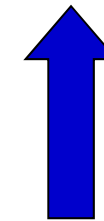


Comparação entre TG dinâmica da carbonização dos componentes do eucalipto

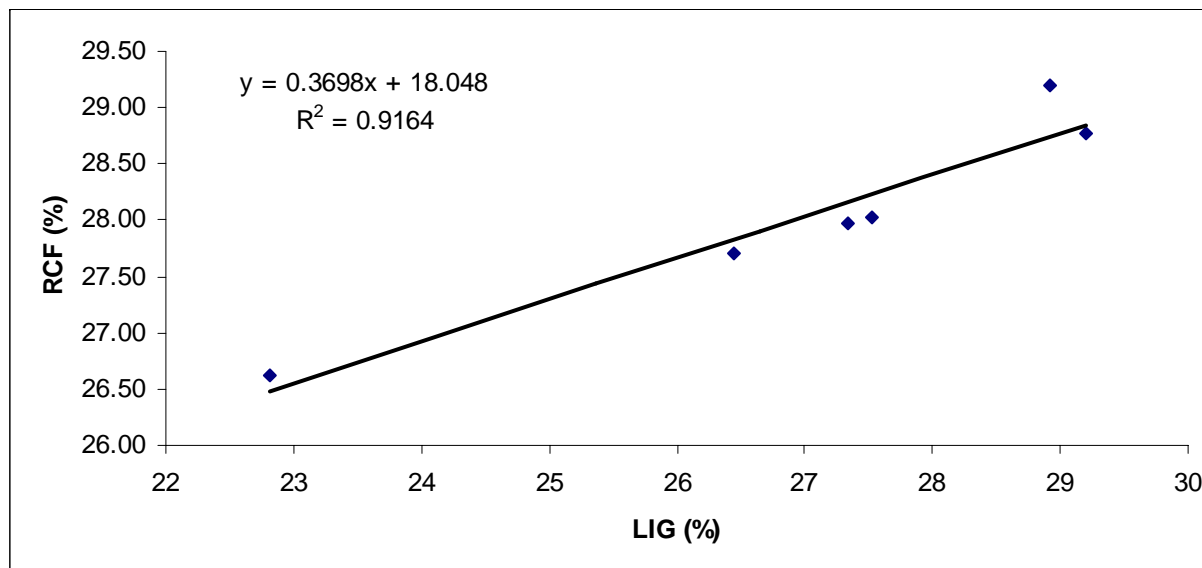
***E. maculata*, *E. pellita*, *E. tereticornis*, *E. urophylla*, *E. cloeziana* e Híbrido (*E. urophylla* x *E. grandis*) – Idade 7 anos**

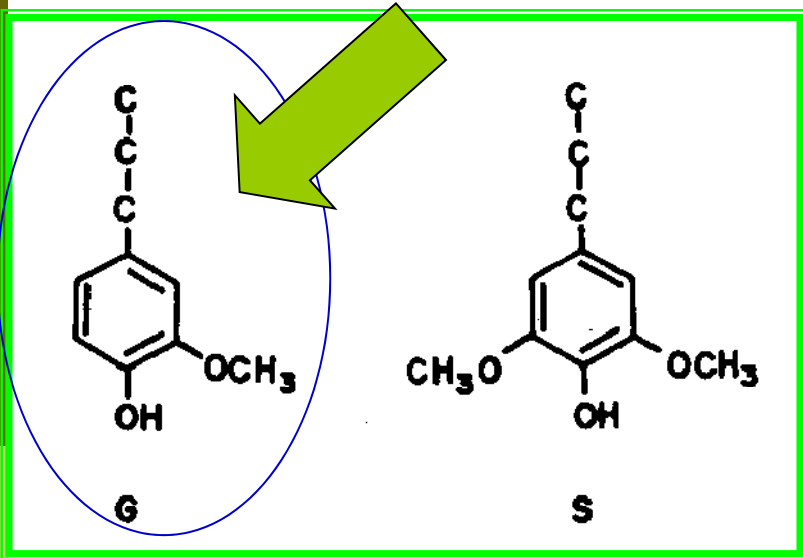


**Lignina**



**Rendimento em carvão e carbono fixo**





**Estrutura proposta para lignina  
 presente em madeira das angiospermas.  
 FONTE PILÓ-VELOSO et. al. (1993).**

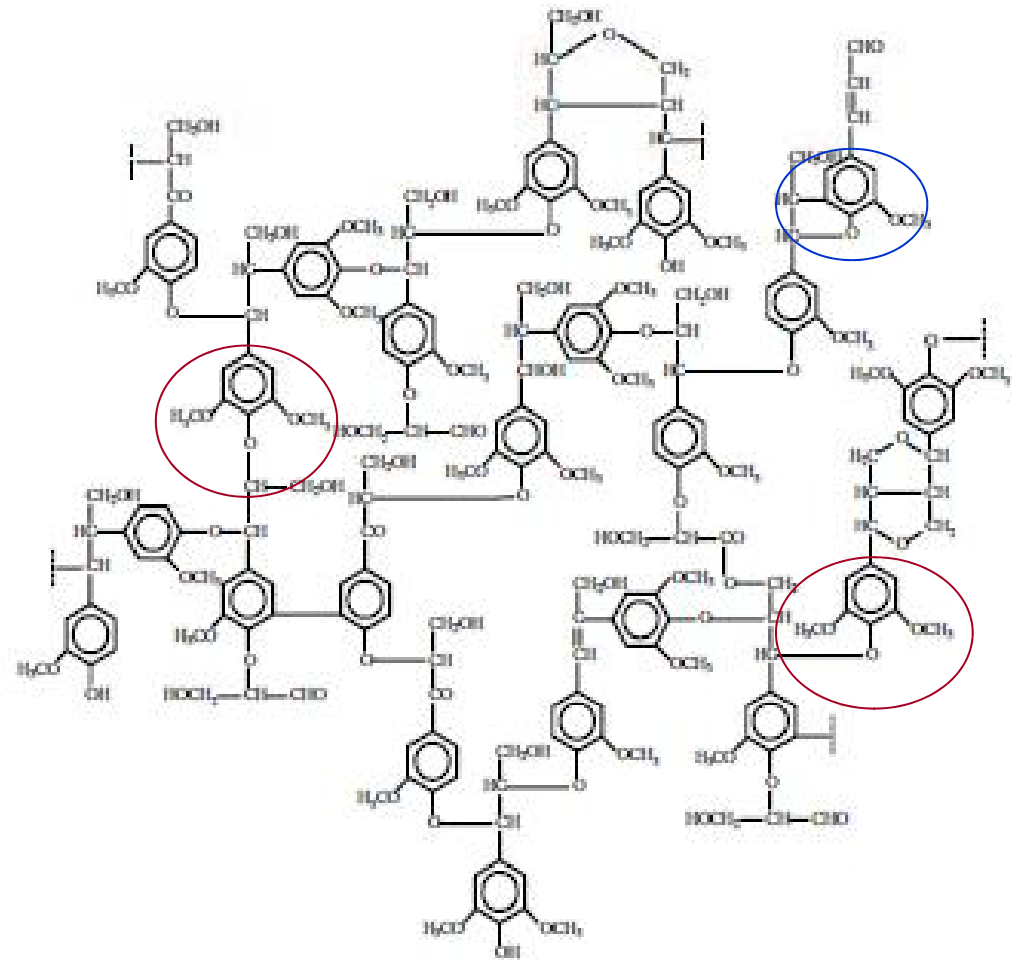
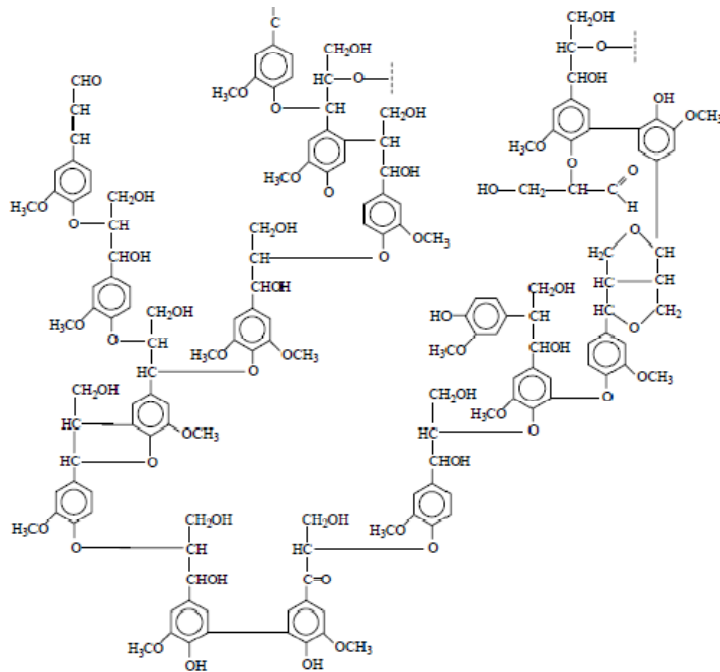


Figura 7: Estrutura proposta para lignina presente em madeira de gimnosperma (ROWELL, 2005).

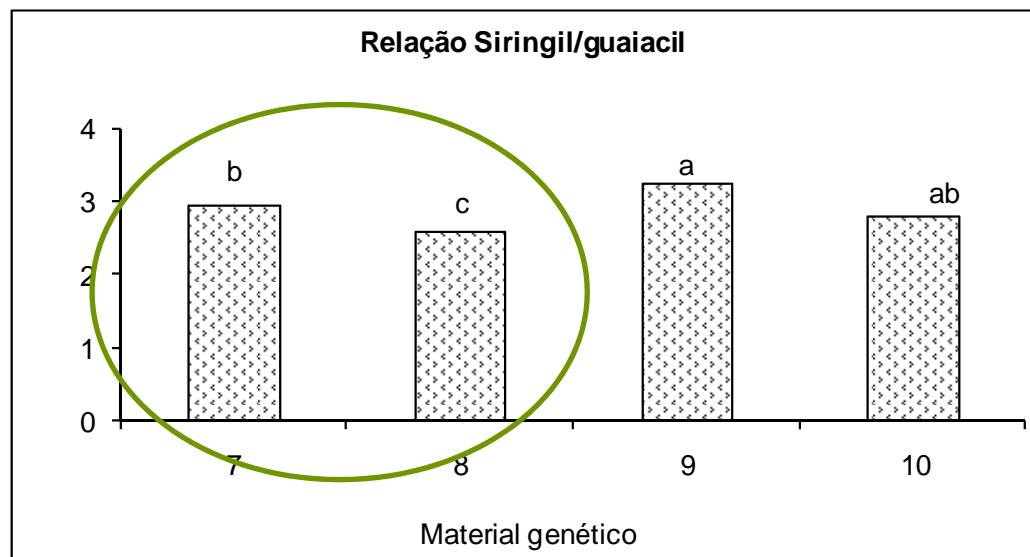
*Table 4 – Siringil and guaiacil content of Eucalyptus clones*

Clones	Siringil (mmol)	Guaiacil (mmol)	Relação Siringil/Guaiacil
A	1,82	0,83	2,2
B	2,04	0,81	2,5
C	1,70	0,74	2,3
D	1,88	0,88	2,1
E	1,91	0,77	2,5
F	1,88	0,85	2,2
G	2,19	1,01	2,2
H	1,98	1,00	2,0
I	1,83	0,66	2,8
J	2,26	0,97	2,4

Fonte: Gomide, et al, 2005

Relação siringil/guaiacil da madeira nos diferentes clones de eucalipto para energia.

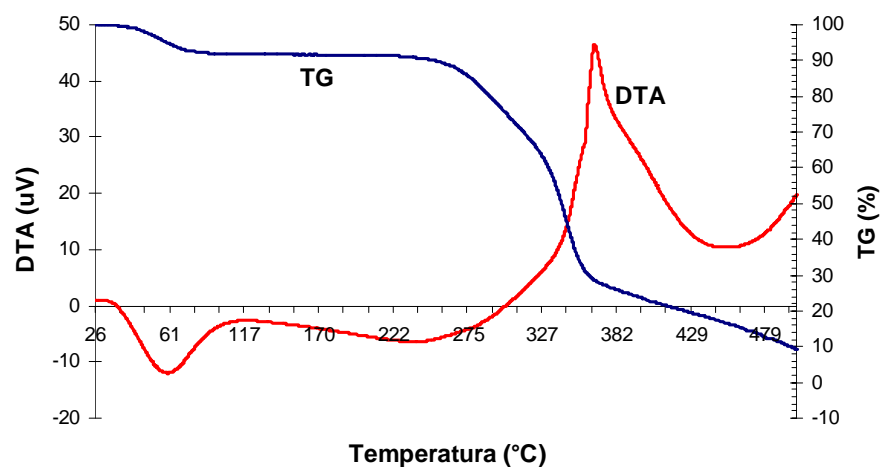
↓ Relação S/G      ↑ Rendimento



Fonte: Santos e Carneiro, 2010

**Tabela 7.** Perda de massa (%) dos diferentes materiais genéticos em função das faixas de temperaturas.

Material genético	Perda de massa (%)					Massa residual
	25°-100°C	100°-200°C	200°-300 °C	300°-400 °C	400°-500 °C	
1	6	0	16	53	14	11
2	8	0	16	53	14	9
3	7	0	19	54	16	4
4	8	1	17	52	16	6



Termograma e DTA da madeira para o material genético 2.

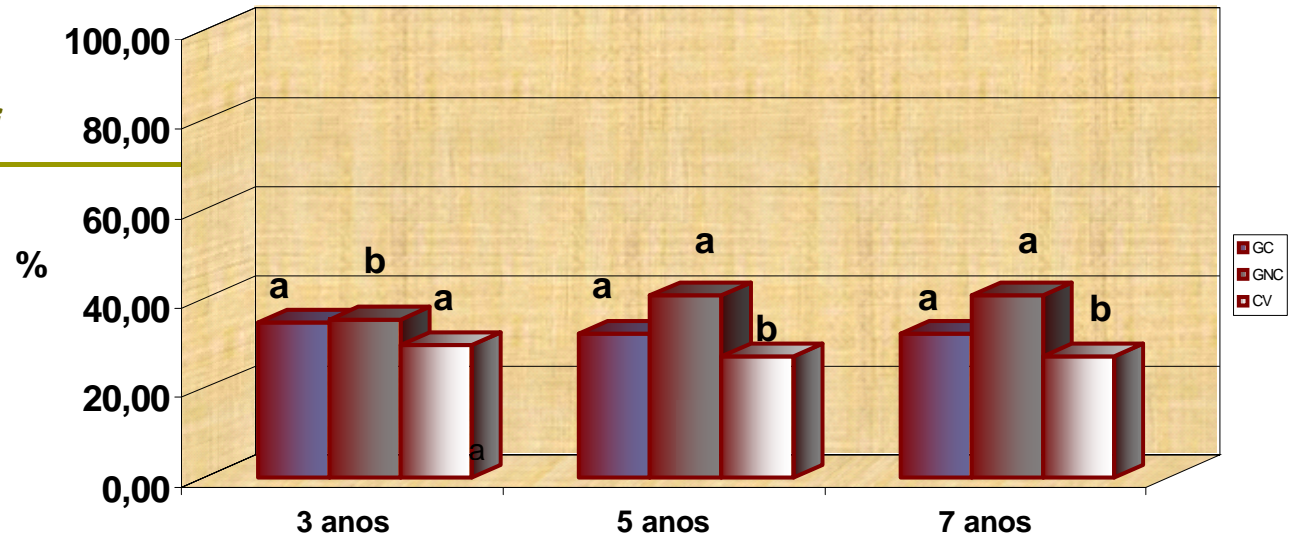
Fonte: Santos e Carneiro, 2010



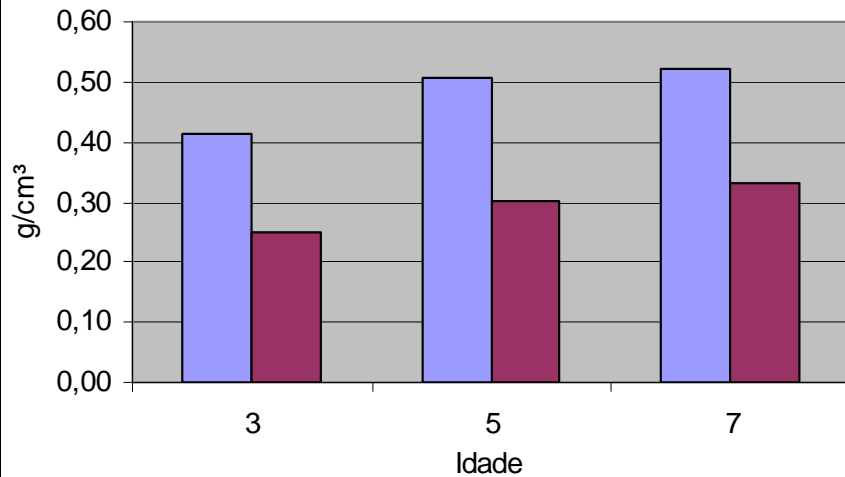
## Rendimento Gravimétrico

### *Eucalyptus benthamii*

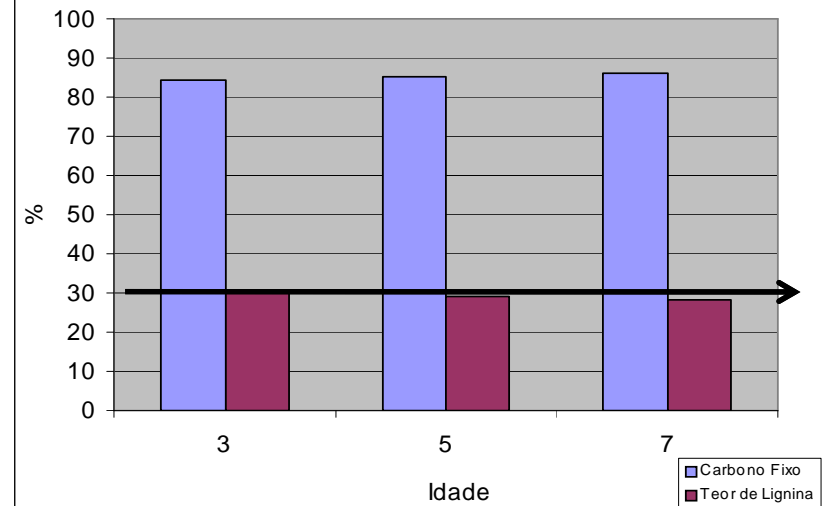
- 3 idades diferentes
- Guarapuava-PR
- sementes
- Geadas severas
- IMA > 40m<sup>3</sup>



### Densidade Madeira x Densidade Carvão



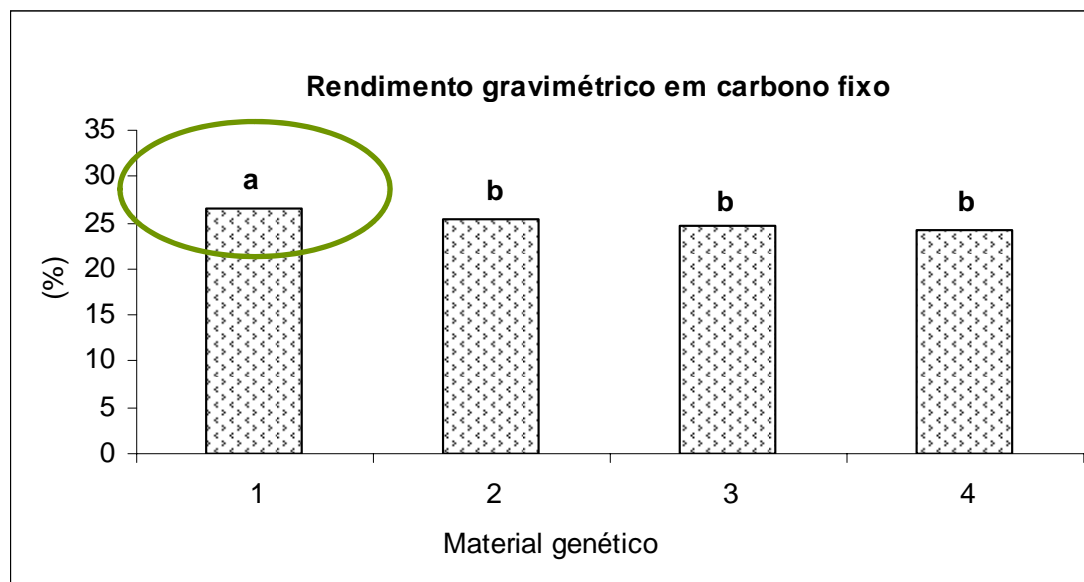
### Carbono Fixo x Teor de Lignina



# Composição elementar

**TABELA 5.** Composição elementar da madeira dos diferentes materiais genéticos de clones de eucalipto.

Material genético	Composição elementar da madeira (%)				
	C	N	H	S	O
1	48,8 a	0,20 a	6,68 a	0,12 a	44,21 b
2	48,04 ab	0,17 ab	6,44 a	0,09 a	45,27 ab
3	47,53 b	0,15 b	6,32 a	0,08 a	45,93 a
4	47,23 b	0,16 ab	6,51 a	0,08 a	46,02 a



Fonte: Santos e Carneiro, 2010

## Teor de umidade da madeira

**Tabela 8 - Influencia da umidade no poder calorífico da madeira**

Umidade (%)	Energia disponível PCU (Kcal/Kg)	Energia para secar (Kcal)	PUI (kcal/Kg) (aproximado)
0	4904,3	-	4904,3
20	3827,7	117,2	3710,5
50	2392,3	291,8	2100,5
80	956,93	466,50	490,43



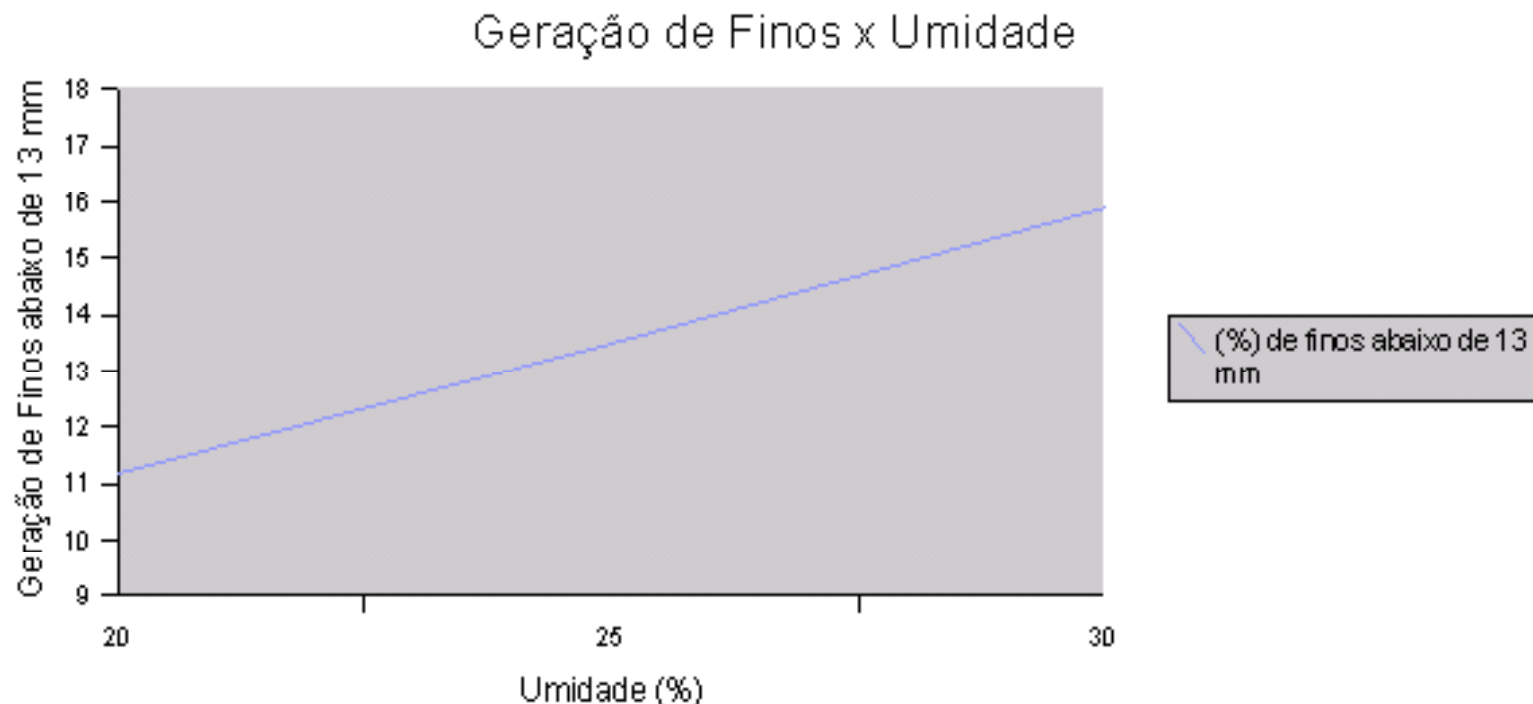
Umidade da lenha < 30%

Tempo de secagem: > 90 dias

Dimensão, espécie, época do ano e outros

## ***Características do carvão produzido com madeira úmida***

- **carvão friável e quebradiço**
- **elevação do teor de fino durante o manuseio e transporte**
- **fendilhamento no carvão, devido aumento da pressão de vapor por ocasião da transformação da madeira em carvão vegetal**
- **menor rendimento gravimétrico; reduz tempo de carbonização e número de fornos**



## INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA PEÇA

Por razões de qualidade do carvão produzido, o diâmetro ideal para carbonização está entre 10 e 20 cm.

Diâmetros > 20 cm - carvão muito quebradiço, dificultar o manuseio da peça.  
Diâmetros < 10 cm - dificultam o arranjo das peças dentro do forno, aumenta o tempo de enchimento, aumento do custo da mão-de-obra.

**Ganho > 15% de massa enforada → 2,0% de economia no custo do carvão.**

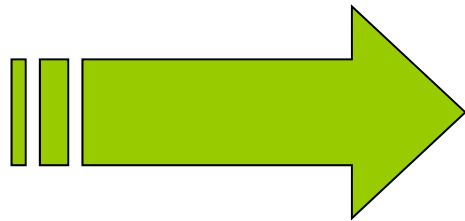
**Comprimento:**

**Função do tamanho do forno**

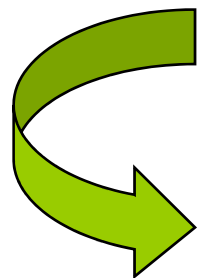
**Não afeta significativamente o tempo de carbonização**

## OUTRAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

---



- ✿ RELAÇÃO CERNE/ALBURNO
- ✿ PARÂMETROS ANATÔMICOS
- ✿ CRISTALINIDADE DA CELULOSE



SECAGEM DA MADEIRA  
RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO  
CARBONO FIXO  
FRIABILIDADE

## Ganhos com a melhoria da qualidade da madeira

---

- ✿ **Redução na áreas plantadas**
- ✿ **Redução no consumo de madeira**
- ✿ **Eficiência de conversão energética**
- ✿ **Redução de emissões nos processos de conversão**
- ✿ **Redução nos custos**
- ✿ **Melhorias na qualidade do carvão**



*Agradecimentos:*

UFV

DEF

SIF

PÓLO DE EXCELENCIA EM FLORESTA

FAPEMIG

SECTES

EMBRAPA





---

***OBRIGADA!***  
***cassiacarneiro@ufv.br***

## Madeira necessária para suprir a indústria de Ferro Gusa

---

Produção de Gusa a carvão vegetal = 12 milhões de toneladas / ano

Carvão Vegetal Necessário = 8,5 milhões de toneladas / ano

Madeira por ton de carvão = **3,6 toneladas = 6 metros cúbicos**

Total de Madeira Necessária = 50 milhões de metros cúbicos / ano

Total de Área de Corte Necessária = 200 mil de hectares / ano

Total de Floresta Plantada disponível = 20 milhões de metros cúbicos / ano

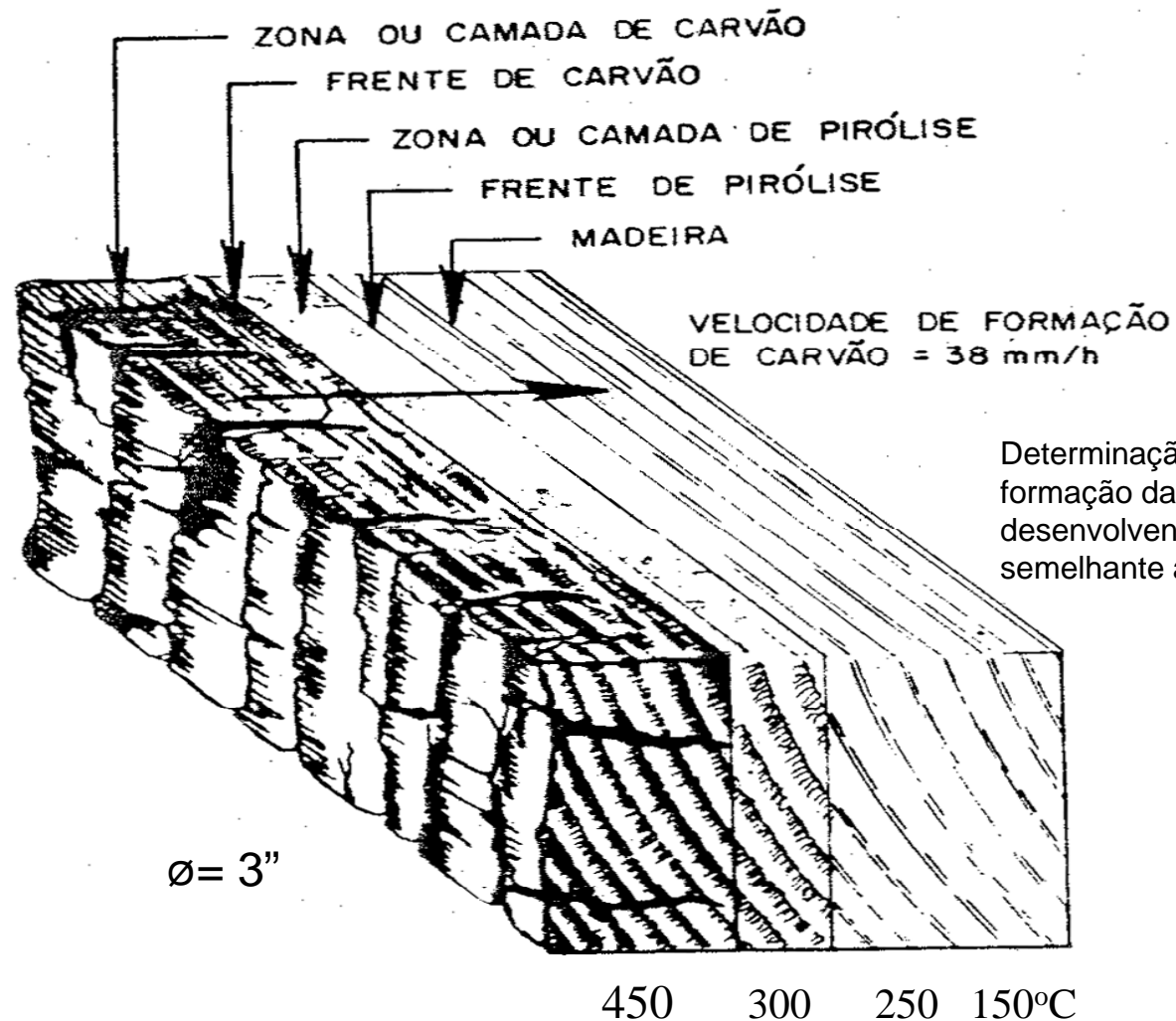
Déficit de Madeira = 30 milhões de metros cúbicos / ano

Total de Área disponível = 80 mil de hectares / ano

Déficit de Floresta Plantada = 120 mil hectares / ano

**Se melhorar o processo e qualidade da madeira pode-se reduzir esse déficit para 68 mil hectares / ano**

# Modelo de Carbonização de Holmes



Determinação da velocidade de formação da camada de carvão, desenvolvendo um modelo semelhante ao de Kanury

**Propagação da frente de carbonização**

TABELA 1 Etapas do processo de pirólise da madeira, em faixas de temperatura.

Referência	Etapas (faixa de temperatura e fenômenos de reação)				
Martins (1980)	<b>100°-200°C</b> <u>Endotérmica</u>	<b>170°-270°C</b> <u>Endotérmica</u>	<b>270°-280°C</b> <u>Exotérmica</u>	<b>280°-400°C</b> <u>Exotérmica</u>	
	Secagem H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O; CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> CHO, CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H, e alcatrão	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O; H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ; CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> CH O, CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H, e alcatrão	Hidrocarbonetos; H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	
Trugilho & Silva (2001)	<200°C	<b>200°-280 °C</b>	<b>280°-500°C</b>	>500°C	
	Secagem da madeira	<u>Endotérmica</u> ácido acético, metanol, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e outros	<u>Exotérmicas:</u> gases CO, CH <sub>4</sub> , etc., e alcatrões	Liberação de pequenas quantidades de voláteis, em especial H <sub>2</sub> .	
Raad (2004)	<100°C	<b>105°-200°C</b>	<b>200°-270°C</b>	>270°C	
	Secagem (liberação das ligações higroscópicas)	H <sub>2</sub> O (vapor) Ocorre pirólise somente em períodos muito longos.	<u>Endotérmica</u> ácido acético, metanol, H <sub>2</sub> O, e CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	<u>Exotérmica</u> CO, CH <sub>4</sub> , alcatrão, pequenas quantidades de voláteis, em especial H <sub>2</sub>	
Syred et al. (2006)	<b>20°-100°C</b>	<b>100°C</b>	<b>110°-270°C</b>	<b>270°-290°C</b>	>270°C
	Liberação de vapor d'água absorção de energia	Temperatura se mantém até que toda umidade seja retirada	Início pirólise, liberando CO, CO <sub>2</sub> , metanol e ácido acético	Início de reações endotérmicas	Reações espontâneas (exotérmicas)