



BIANCA BORGES SILVA

**RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DE CARBONIZAÇÃO E
CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DE CARVÃO VEGETAL EM
LEUCENAS E EUCALIPTOS PARA USO INDUSTRIAL**

**LAVRAS – MG
2022**

BIANCA BORGES SILVA

**RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DE CARBONIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO
QUALITATIVA DE CARVÃO VEGETAL EM LEUCENAS E EUCALIPTOS PARA
USO INDUSTRIAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

BIANCA BORGES SILVA

**RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DE CARBONIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO
QUALITATIVA DE CARVÃO VEGETAL EM LEUCENAS E EUCALIPTOS PARA
USO INDUSTRIAL**

**GRAVIMETRIC PERFORMANCE OF CARBONIZATION AND QUALITATIVE
CHARACTERIZATION OF CHARCOAL IN LEUCENES AND EUCALYPTUS FOR
INDUSTRIAL USE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 24 de Fevereiro de 2022.

Dr. Rafael Farinassi Mendes – UFLA

Me. Carine Setter – UFLA

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

À minha família, que sempre me incentivaram mesmo diante de tantos desafios. Obrigada pelo apoio e pelo amor! Vocês são minha força e inspiração em todas as conquistas.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Sem sombra de dúvidas, gostaria de agradecer primeiramente a Deus. Somente cheguei a essa etapa da minha vida graças a Ele e seu amor. Obrigada meu Pai, por transformar os obstáculos e dificuldades do caminho em força, confiança e crescimento. A Ele toda vitória!

Agradeço imensamente aos meus pais, Lílian e Juninho, pelo apoio incondicional e refúgio nas horas que mais precisei. Obrigada por confiarem em mim, por serem o combustível que me move e minha inspiração em ser uma pessoa melhor. Ao meu irmão Guilherme, por sempre torcer por mim e me acompanhar durante essa caminhada, obrigada pelo carinho. Meu desejo é te inspirar a voar sempre mais alto e que você também alcance todos os sonhos do seu coração.

À minha avó, Diná, e ao meu avô, Edgar, pelas infinitas orações de proteção e cuidado, sempre rogando à Deus pela segurança nos meus caminhos. Obrigada por tanto amor dedicado a mim. Às minhas madrinhas, por serem meus anjos da guarda na terra, obrigada pela compreensão de sempre, pelos conselhos e pelo carinho e amor. Ao meu padrinho e tio Jadir, que sei que estão celebrando essa conquista comigo, de onde estiverem.

À Universidade Federal de Lavras, por todas oportunidades de crescimento.

Agradeço a todos meus amigos de Lavras, por tornarem essa caminhada mais divertida, mais leve e por torcerem sempre por mim. Em especial, às minhas amigas, Jordana, Mariana e Paula, pela confiança, parceria e carinho em tantos momentos durante esses anos, obrigada por todas experiências que tivemos juntas! Estarei sempre torcendo por todos vocês.

A todos os professores que passaram pela minha trajetória durante a graduação. Obrigada por contribuírem para meu crescimento, pelos conhecimentos e experiências compartilhados. Em especial, aqueles que me acompanharam desde o início, nunca me esquecerei de vocês!

Ao meu orientador Tiago, por se disponibilizar mais uma vez em me ajudar em uma etapa tão importante da graduação. Obrigada pela oportunidade, pela confiança, por estimular o meu desenvolvimento e por todos os ensinamentos. Serei sempre grata, você é um exemplo para mim!

Por fim, agradeço a toda equipe da Gerência de Meio Ambiente da CSN Arcos. Obrigada por toda força e pelos conhecimentos compartilhados! Vocês foram muito importantes para o desenvolvimento desse trabalho.

Obrigada a todos que passaram por minha vida e fizeram diferença nessa etapa!

“Toda pressa que você tem em sua vida, apenas nega a felicidade do momento presente”.

(Sri Sri Ravi Shankar)

RESUMO

O carvão vegetal é obtido a partir da carbonização da biomassa e, em relação aos combustíveis fósseis, como o coque de petróleo, seu uso é considerado mais sustentável. Assim, torna-se interessante considerar o carvão vegetal em alternativa ao coque, o qual nos dias atuais é amplamente utilizado por indústrias cimenteiras. O carvão vegetal pode ser produzido pela conversão termoquímica da biomassa, denominada pirólise lenta, obtendo um combustível com maior teor de carbono e maior densidade energética, em relação à biomassa *in-natura*. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi produzir carvão vegetal a partir de duas espécies florestais, *Leucaena leucocephala* e *Eucalyptus* sp, via pirólise lenta em sistema forno-fornalha, com qualidades energéticas adequadas ao uso em fornos de indústrias cimenteiras, como alternativa a substituição parcial do coque de petróleo. A matéria-prima foi caracterizada quanto à densidade bulk, análise química imediata e poder calorífico superior. A pirólise foi realizada em um sistema tipo forno-fornalha, com tempo de reação de quatro horas a 800°C. Os rendimentos gravimétricos da carbonização foram determinados em relação à madeira seca. O carvão produzido foi qualificado, considerando-se a análise química imediata, poder calorífico superior, densidade energética, consumo específico de madeira e a eficiência energética. Por fim, foi realizado um estudo de viabilidade econômica e simulação da redução da emissão de gases de efeito estufa, analisando diferentes *blends* entre carvão e coque de petróleo. Ambas as espécies florestais apresentaram características atraentes para a produção de carvão vegetal destinado ao uso energético, tais como elevado teor de carbono fixo, baixo teor de cinzas e umidade. O rendimento médio em carvão vegetal para leucena foi de 30,66% e eucalipto 29,3%. O teor de carbono fixo e o poder calorífico superior dos carvões de leucena e eucalipto foram comparativamente similares ao coque de petróleo. Com base nas análises energéticas e econômicas, os melhores *blends* para cada espécie florestal foi o uso de 80% de coque de petróleo e 20% de carvão de eucalipto; e o *blend* constituído por 78% de coque de petróleo, 20% de carvão de eucalipto e 2% de carvão de leucena. O projeto desenvolvido para a carbonização, forno-fornalha, e a substituição parcial do coque de petróleo pelo carvão de leucena e eucalipto, provou ser uma ótima opção para a redução dos gastos anuais, sem a perda do potencial energético. Além disso, todos os *blends* avaliados atenderam as exigências mínimas de operação dos fornos. O rendimento dos carvões de leucena e eucalipto foram próximos de 30%, percentual usualmente alcançado em fornos convencionais.

Palavras-chave: Biomassa. Energia renovável. Coque de petróleo. Pirólise. Carbono.

ABSTRACT

Charcoal is obtained from the carbonization of biomass and, in relation to fossil fuels, such as petroleum coke, its use is considered more sustainable. Thus, it becomes interesting to consider charcoal as an alternative to coke, which is currently widely used by cement industries. Charcoal can be produced by the thermochemical conversion of biomass, called slow pyrolysis, obtaining a fuel with higher carbon content and greater energy density, compared to in-natura biomass. In this context, the objective of this work was to produce charcoal from two forest species, *Leucaena leucocephala* and *Eucalyptus* sp, via slow pyrolysis in a kiln-furnace system, with energy qualities suitable for use in cement industry kilns, as an alternative to partial replacement of petroleum coke. The raw material was characterized in terms of bulk density, immediate chemical analysis and higher calorific value. The pyrolysis was carried out in an oven-furnace system, with a reaction time of four hours at 800°C. The gravimetric yields of carbonization were determined in relation to dry wood. The charcoal produced was qualified, considering the immediate chemical analysis, higher calorific value, energy density, specific consumption of wood and energy efficiency. Finally, an economic feasibility study and simulation of the reduction of greenhouse gas emissions were carried out, analyzing different blends between coal and petroleum coke. Both forest species showed attractive characteristics for the production of charcoal for energy use, such as high fixed carbon content, low ash and moisture content. The average charcoal yield for leucena was 30.66% and eucalyptus 29.3%. The fixed carbon content and higher calorific value of leucaena and eucalyptus coals were comparatively similar to petroleum coke. Based on energy and economic analyses, the best blends for each forest species were the use of 80% petroleum coke and 20% eucalyptus coal; and the blend consisting of 78% petroleum coke, 20% eucalyptus coal and 2% leucena coal. The project developed for carbonization, kiln-furnace, and partial replacement of petroleum coke by leucaena and eucalyptus coal, proved to be a great option for reducing annual costs, without losing energy potential. In addition, all blends evaluated met the minimum requirements for oven operation. The yield of leucaena and eucalyptus charcoal was close to 30%, a percentage usually achieved in conventional ovens.

Keywords: Biomass. Renewable energy. Petroleum coke. Pyrolysis. Carbon.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Consumo específico de clínquer e cimento na indústria cimenteira | 5 |
| Figura 2 – Esquema de fabricação de cimento. | 8 |
| Figura 3 – Esquema do processo de clínquerização no forno rotativo. | 8 |
| Figura 4 – Visão interna de forno rotativo. | 9 |
| Figura 5 – Distribuição dos canais de ar em maçaricos de alta eficiência | 10 |
| Figura 6 - Participação percentual do extrativismo vegetal e da silvicultura no valor da produção primária florestal - Brasil - 1997-2019..... | 13 |
| Figura 7 – Evolução dos produtos da carbonização em função da temperatura..... | 21 |
| Figura 8 – Forno tradicional para produção de carvão vegetal. | 23 |
| Figura 9 – Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal. | 23 |
| Figura 10 – Raio de 80 km em torno do município de Arcos – MG. | 24 |
| Figura 11 – Matérias-primas utilizadas na produção de carvão vegetal (A) madeira de leucena; (B) cavacos de eucalipto. | 26 |
| Figura 12 - Ensaio experimental da análise imediata (A) quantificação do teor de materiais voláteis; (B) determinação do teor de cinzas..... | 27 |
| Figura 13 - Determinação da densidade básica para a madeira de (A) leucena e (B) eucalipto. | 28 |
| Figura 14 – Equipamento utilizado para reação de pirólise | 28 |
| Figura 15 - Determinação da massa de cavacos de eucalipto..... | 29 |
| Figura 16 - Sistema do tipo forno-fornalha (A) cilindro interno preenchido com cavacos de madeira; (B) Área anelar preenchida com biomassa para a ignição; (C) tambor preenchido com material para a queima; (D) ignição do material. | 30 |
| Figura 17 – Carvão de Leucena. | 31 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Consumo de Combustível do Setor Cimenteiro Brasileiro (em 103 tep)..... | 5 |
| Tabela 2 – Principais parâmetros do coque delayed e coque fluido..... | 7 |
| Tabela 3 – Oferta e Demanda de Energia: Carvão Vegetal (ton)..... | 14 |
| Tabela 4 – Área plantada de eucalipto e produção de lenha no raio de 80 km em torno do município de Arcos, Minas Gerais..... | 25 |
| Tabela 5 – Variação dos preços das toneladas de coque e cavaco de Eucalipto | 33 |
| Tabela 6 – Propriedades utilizadas nos fornos rotativos em indústria cimenteira..... | 33 |
| Tabela 7 – Cenário base para consumo de combustível nos fornos | 34 |
| Tabela 8 - Propriedades química e energética das matérias-primas..... | 35 |
| Tabela 9 – Propriedades química e energética dos carvões vegetais. | 37 |
| Tabela 10 – PCS da biomassa e carvão da Leucena e do Eucalipto..... | 39 |
| Tabela 11 – Poder calorífico para os <i>blends</i> de coque de petróleo com carvão de eucalipto | 40 |
| Tabela 12 – Estimativa do consumo anual relativo a cada <i>blend</i> de combustível com carvão de eucalipto..... | 40 |
| Tabela 13 – Estimativa do custo anual relativo a cada <i>blend</i> de combustível com carvão de eucalipto e o custo do cenário base | 41 |
| Tabela 14 – Emissão de CO ₂ pela queima de combustíveis | 41 |
| Tabela 15 – Estimativa do consumo anual relativo a cada <i>blend</i> de combustível com carvão de Leucena e PCS de cada <i>blend</i> | 42 |
| Tabela 16 – Consumo anual e PCS relativos ao <i>blend</i> entre coque, eucalipto e leucena..... | 42 |
| Tabela 17 – Custos anuais relativos ao <i>blend</i> entre coque, eucalipto e leucena..... | 42 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | OBJETIVOS | 3 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 4 |
| 3.1 | UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA..... | 4 |
| 3.1.1 | Coque de Petróleo | 6 |
| 3.1.2 | Queima de combustível no processo produtivo | 7 |
| 3.1.3 | Principais emissões atmosféricas na produção do cimento..... | 10 |
| 3.2 | INICIATIVAS PARA TRANSIÇÃO DA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO | 11 |
| 3.3 | BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA | 12 |
| 3.3.1 | Biomassa de origem florestal | 14 |
| 3.4 | TRANSFORMAÇÃO DA MADEIRA EM CARVÃO VEGETAL | 14 |
| 3.4.1 | Pirólise: conversão termoquímica da biomassa | 15 |
| 3.4.2 | Carvão vegetal..... | 16 |
| 3.4.2.1 | Propriedades químicas do carvão vegetal | 16 |
| 3.4.2.2 | Propriedades físicas do carvão vegetal | 17 |
| 3.5 | PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA | 18 |
| 3.5.1 | Matéria prima | 18 |
| 3.5.1.1 | Leucena | 18 |
| 3.5.1.2 | Eucalipto | 19 |
| 3.5.2 | Fatores operacionais do processo | 20 |
| 3.5.2.1 | Fornos de alvenaria para produção de carvão vegetal | 21 |
| 3.5.2.2 | Sistema tipo forno-fornalha | 22 |
| 3.6 | VANTAGENS DO CARVÃO VEGETAL EM RELAÇÃO AO COQUE..... | 23 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| 4.1 | Seleção da matéria-prima | 24 |
| 4.2 | Coleta da matéria-prima | 25 |
| 4.3 | Caracterização das matérias-primas | 26 |
| 4.3.1 | Análise química imediata das matérias-primas | 26 |
| 4.3.2 | Poder Calorífico Superior (PCS)..... | 27 |
| 4.3.3 | Densidade bulk..... | 27 |
| 4.4 | Configuração do forno experimental | 28 |
| 4.5 | Processo de carbonização das madeiras | 29 |
| 4.6 | Caracterização do carvão vegetal | 31 |
| 4.6.1 | Análise química imediata do carvão vegetal..... | 31 |
| 4.6.2 | Densidade relativa aparente | 31 |
| 4.6.3 | Densidade energética, consumo específico e eficiência energética | 32 |
| 4.7 | Análise viabilidade econômica | 32 |
| 4.8 | Simulação das emissões de CO ₂ | 35 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 35 |
| 5.1 | Caracterização das matérias-primas | 35 |
| 5.2 | Caracterização do carvão vegetal | 37 |
| 5.3 | Ganhos com o processo..... | 39 |
| 5.4 | Análise econômica | 40 |
| 6 | CONCLUSÃO | 44 |
| 7 | REFERÊNCIAS | 46 |

1 INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda mundial por energia, nota-se que a maior fonte geradora da atualidade ainda são os combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral, sendo utilizados em veículos, indústrias e residências. O coque de petróleo, combustível fóssil obtido em refinarias, é um material sólido, poroso, de cor negra (PETROBRAS, 2019), apresentando amplo consumo em diversos setores industriais, como no processo de produção de cimento. No entanto, a queima dos combustíveis fósseis causa graves danos ao meio ambiente e à saúde humana. Esses danos estão relacionados a problemas respiratórios causados pela emissão de poluentes atmosféricos, como o monóxido de carbono, como também problemas ambientais relacionados à emissão de compostos de enxofre e nitrogênio, contribuintes da chuva ácida. Além disso, contribuem com a emissão de gases do efeito estufa (SMETS et al., 2014).

Assim, a busca por fontes de energia renovável tem se tornado expressiva, e, nesse cenário, os biocombustíveis como a biomassa, se destacam pelo potencial energético. A biomassa lignocelulósica é tida como a matéria-prima renovável mais abundante do mundo para a produção de biocombustíveis, sendo a única fonte de energia renovável que contém carbono (LENG et al., 2018). Além disso, a biomassa fixa gás carbônico atmosférico a partir do processo de fotossíntese das plantas, contribuindo para a captura e redução da emissão desse poluente (FERREIRA, 2014). O Brasil é um país que possui condições favoráveis para a produção da biomassa, como a grande extensão em terras cultiváveis e alta incidência solar em grande parte do seu território. Como exemplo de espécies florestais estudadas para fins energéticos, pode-se citar o cultivo de eucalipto no Brasil, que se tornou referência em produtividade e melhoramento genético para diversos usos, como a otimização para produção de carvão. Já espécies de leucena, que foram introduzidas no território brasileiro para recuperação de áreas degradadas, estão atualmente sendo estudadas para diversificar seu aproveitamento.

Contudo, a energia da biomassa *in-natura* é inferior à energia dos combustíveis fósseis. Dessa forma, para torná-la competitiva com os combustíveis derivados do petróleo é necessário o desenvolvimento de processos tecnológicos que a transforme em bioenergia útil. Dentre esses processos, existem os termoquímicos, como a pirólise lenta, que se destaca por produzir biocombustíveis com alta densidade energética, obtendo o carvão como produto principal (BRIDGWATER, 2012). A pirólise lenta consiste em degradar termicamente o material orgânico na ausência parcial ou total de oxigênio (CHEN et al., 2014). Além disso, é

uma das poucas tecnologias que permite utilizar uma variedade de matérias-primas, ampliando as possibilidades do uso de biomassas. É comum que o carvão vegetal apresente variabilidade em sua qualidade, fator que está associado à grande influência da madeira que lhe deu origem e do sistema de produção. Devido a isso, é importante avaliar as suas propriedades para assim determinar o melhor aproveitamento da madeira extraída das florestas plantadas.

As características da matéria-prima escolhida irão influenciar na qualidade do carvão, sendo importante analisar a densidade da madeira, seu poder calorífico superior, teor de carbono e teor de lignina, parâmetros relacionados à concentração de carbono e eficiência energética da espécie florestal. No que se refere ao processo, atualmente, a produção nacional de carvão vegetal é realizada, majoritariamente, em fornos rudimentares de alvenaria, por pequenos e médios produtores, os quais optam por fornos do tipo “rabo-quente”, superfície e de encosta. Esses fornos apresentam baixo rendimento gravimétrico e emissões não controladas de gases poluentes para o ambiente. Desse modo, é necessário o desenvolvimento de fornos que ofereçam alto rendimento em produção, tecnologias de baixo custo de aquisição, além de recuperarem ou queimarem os gases da carbonização, reduzindo a poluição (CARDOSO et al., 2010). A combustão desses gases pode ser realizada em fornalha, sendo chamado fornos do tipo “forno-fornalha”, evitando que os gases sejam liberados para a atmosfera, proporcionando, ao mesmo tempo, a melhoria do ambiente de trabalho e a obtenção de energia térmica.

A partir da compreensão da relevância do uso do carvão vegetal e dos inconvenientes atrelados ao amplo uso de derivados de petróleo nos fornos industriais, a produção de carvão vegetal eficiente, sustentável e que atendam os parâmetros das especificações exigidas pela indústria cimenteira, torna-se uma alternativa atraente.

2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi produzir carvão vegetal a partir de duas espécies florestais, *Leucaena leucocephala* e *Eucalyptus* sp, via pirólise lenta em sistema forno-fornalha, com qualidades energéticas adequadas ao uso em fornos de indústrias cimenteiras, como alternativa a substituição parcial do coque de petróleo.

Os objetivos específicos foram:

- ❖ Caracterização qualitativa e energética das biomassas através da análise química imediata e poder calorífico superior;
- ❖ Produção de carvão vegetal através do processo termoquímico de carbonização (pirólise) em forno-fornalha;
- ❖ Caracterização qualitativa dos carvões por análise química imediata e obtenção do rendimento gravimétrico de carbonização;
- ❖ Avaliação da aplicabilidade dos carvões nos fornos comparando com a realidade atual da planta estudada, na região de Arcos-MG.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

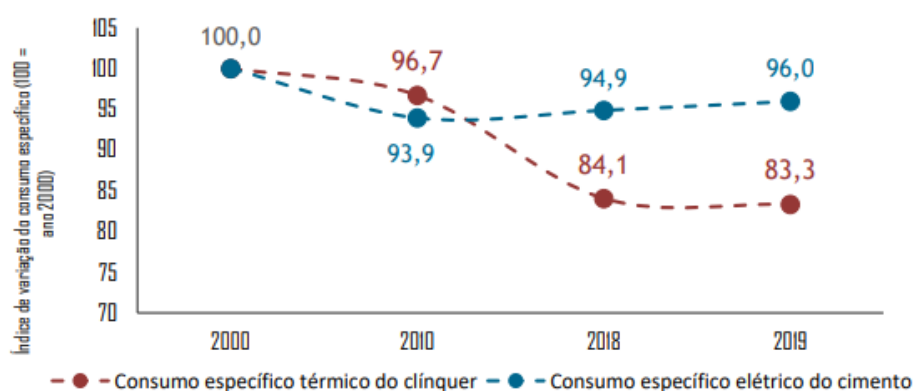
A indústria do cimento é um dos cinco setores mais intensivos em energia do mundo, devido à grande quantidade de energia necessária em seu processo produtivo (VISED0; PECCHIO, 2019). A maior parte do consumo de energia térmica provém da queima de combustíveis utilizados nos fornos para a produção de clínquer, principal produto intermediário do cimento. O histórico da utilização de combustíveis para alimentação dos fornos eram, predominantemente, provindas de fontes não renováveis, como o petróleo e o carvão mineral (ECYCLE, 2017).

A matriz energética da indústria de cimento sofreu mudanças ao longo do tempo. Na década de 70, com a elevação dos preços internacionais do petróleo e a consequente crise energética em que o Brasil se deparava, o Governo Federal começou a buscar soluções ao petróleo e derivados, dos quais o Brasil ainda era muito dependente, para substituí-los por combustíveis nacionais, como a substituição do óleo combustível pelo carvão. Então, em 1979 foi assinado um Protocolo entre o Governo, o Setor de Cimento e o de Extração de Carvão, com a finalidade de criar condições para que fossem reduzidas ao máximo e no mais curto prazo possível o consumo de óleo na indústria do cimento (KIHARA; VISED0, 2014).

A partir disso, diversos compromissos foram assumidos pela indústria cimenteira e levaram à modernização do parque industrial, como a utilização de equipamentos mais eficientes. Além disso, essa evolução também foi marcada pela busca por fontes alternativas de energia e pela utilização de queimadores que processam vários tipos de combustíveis (KIHARA; VISED0, 2014).

A Figura 1 permite analisar, separadamente, os consumos específicos térmico e elétrico associados às produções de clínquer e cimento.

Figura 1 – Consumo específico de clínquer e cimento na indústria cimenteira



Fonte: EPE, 2020.

O consumo de energia elétrica se dá principalmente nas moagens de cimento, e o de combustíveis na produção de clínquer. Considerando o consumo específico térmico do clínquer, observa-se que houve uma redução em 17% ao longo de todo horizonte (EPE, 2020). Em relação ao cimento, a redução do consumo específico são relativas às melhorias realizadas no setor.

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2019), cerca de 85% dos energéticos utilizados pelo setor no Brasil são de origem fóssil, com grande destaque para coque de petróleo. Os 15% restantes, são representados pelos combustíveis alternativos, os quais podem ser subdivididos em resíduos e biomassas.

A Tabela 1, apresenta o consumo de energia no setor de cimento, no Brasil, no período de 2011 a 2020. Nota-se que os combustíveis consumidos pelo setor são provindos majoritariamente de combustíveis fósseis, principalmente, coque de petróleo. Uma pequena parcela também é representada pelos combustíveis oriundos de biomassas, como o carvão vegetal, a lenha e o biodiesel.

Tabela 1 - Consumo de Combustível do Setor Cimenteiro Brasileiro (em 103 tep)

| Fontes | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Gás Natural | 42 | 55 | 31 | 25 | 12 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Carvão Mineral | 98 | 108 | 133 | 123 | 70 | 60 | 64 | 68 | 66 | 65 |
| Lenha | 37 | 81 | 83 | 79 | 70 | 64 | 60 | 61 | 59 | 65 |
| Óleo Diesel | 61 | 66 | 64 | 68 | 56 | 51 | 48 | 50 | 53 | 58 |
| Biodiesel | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Óleo combustível | 20 | 17 | 17 | 14 | 9 | 5 | 5 | 4 | 7 | 8 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Eletricidade | 614 | 660 | 673 | 681 | 612 | 548 | 516 | 506 | 523 | 529 |
| Carvão Vegetal | 179 | 142 | 128 | 122 | 109 | 99 | 94 | 95 | 91 | 101 |
| Coque de Petróleo | 3211 | 3249 | 3356 | 3374 | 3077 | 2670 | 2525 | 2491 | 2563 | 2845 |
| Outras não especificadas | 427 | 440 | 458 | 460 | 417 | 366 | 345 | 350 | 336 | 373 |
| Total | 4691 | 4822 | 4947 | 4948 | 4434 | 3873 | 3664 | 3634 | 3707 | 4055 |

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2021.

3.1.1 Coque de Petróleo

O coque verde de petróleo (CVP), do inglês *petcoke* ou *green coke*, é um combustível sólido obtido em refinarias, a partir do processamento de frações do petróleo nas unidades de coqueamento retardado. O coque é um material poroso, de cor negra e se apresenta na forma de grânulos, sendo muitas vezes semelhante ao carvão mineral.

Sua composição é basicamente carbono e hidrocarbonetos residuais do processamento de petróleo. Dependendo do tipo de petróleo que foi processado outros compostos como enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais, podem ocorrer em diferentes quantidades no combustível (PETROBRAS, 2019).

O motivo do coque de petróleo ser muito utilizado se deve ao seu elevado poder calorífico associado ao baixo custo de aquisição, comparado a outros combustíveis fósseis, e a garantia de abastecimento (ECYCLE, 2017). Segundo Paula (2009), o coque de petróleo é caracterizado pelo elevado poder calorífico, alto teor de carbono e baixos teores de cinzas.

O coque pode ser separado em três qualidades possíveis:

- Coque Alto Enxofre – Originado no Golfo do México e nos Estados Unidos, com especificação técnica de enxofre acima de 6%; é mais recomendado para a indústria cimenteira, e, geralmente, possui menor preço de comercialização.
- Coque Médio Enxofre – produzido na Venezuela e possui especificação técnica de enxofre entre 4,5% à 5,5%.
- Coque de Baixo Enxofre – Produzido no Brasil pela Petrobras, atendendo tanto o mercado interno quanto externo. A especificação técnica de enxofre é menor que 1,0% (GLAUCIO, 2016).

O coque nacional produzido pela Petrobras, compõe uma minoria do coque utilizado nas cimenteiras. Portanto, a maior parcela do coque de petróleo utilizado no setor cimenteiro brasileiro é representado pelas grandes refinarias do Golfo do México e da Venezuela. Outro

fator a ser considerado para esse combustível está relacionado ao seu custo, que, por se tratar de uma “commodity”, tem o seu preço indexado em dólar americano no mercado mundial (GLAUCIO, 2016).

Resumidamente, como vantagens o coque apresenta baixo custo, elevado poder calorífico, e, no processo, a adição de cinzas é dispensável. Por outro lado, o coque possui baixo teor de voláteis, o que dificulta a ignição, e alta presença de enxofre, características desfavoráveis aos materiais combustíveis, devido a emissão de óxidos de enxofre (SO_x).

As propriedades físico-química e energética dos coques tipo *delayed* e fluido, utilizados em fornos de cimenteiras, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais parâmetros do coque *delayed* e coque fluido.

| Parâmetro | Coque <i>delayed</i> | Coque fluido |
|------------------------|-----------------------------|---------------------|
| PCI (Kcal/Kg) | 8600 | 7800 |
| %C | 88 – 90 | 87 – 88 |
| %H | 3,9 – 4,5 | 2 - 3 |
| Razão C/H | 21 | 35 |
| % S | 2 – 6 | 5 – 8 |
| Cinzas (%) | 0,5 – 1,5 | 2 – 8 |
| Voláteis (%) | 10 – 15 | 5 – 10 |
| Granulometria (mm) | 0 – 50 | 0 – 8 |
| Umidade (%) | 7 – 10 | 5 – 10 |
| Temperatura de ignição | 220 – 250 | 230 – 250 |
| Hard Grove (HGI) | 90 - 100 | 10 – 30 |

Fonte: CSN, 2016.

3.1.2 Queima de combustível no processo produtivo

O esquema geral da fabricação de cimento é mostrado na Figura 2, contemplando desde a etapa de extração das matérias-primas até o armazenamento do produto final.

Figura 2 – Esquema de fabricação de cimento.



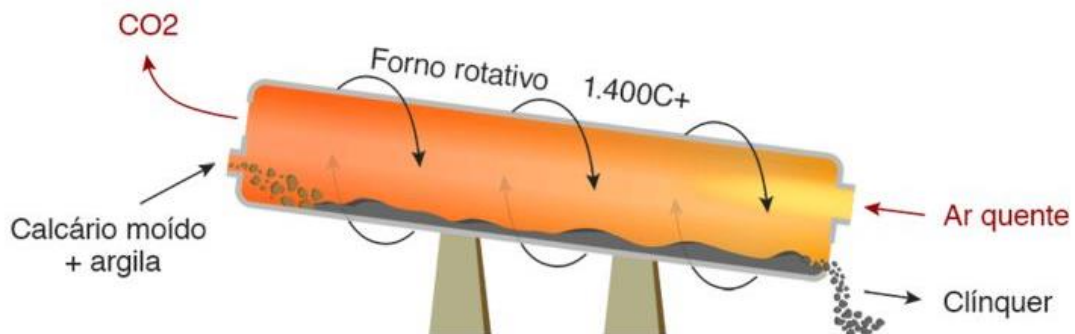
Fonte: VISEDO; PECCHIO, 2019.

As etapas 6 e 7 da figura acima, pré-calcinação e produção de clínquer no forno rotativo, representam as etapas que demandam maior consumo de combustível no processo. Essa demanda está relacionada à necessidade do fornecimento de calor e energia às matérias-primas, para que as reações químicas ocorram de forma eficiente.

Portanto, as emissões de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), estão atreladas à queima de combustível, cerca de 30% a 40% das emissões de gases totais. O restante das emissões de CO_2 , cerca de 60% a 70%, é inerente ao processo e estão relacionadas à reação de clinquerização que ocorre no forno rotativo (VISEDO; PECCHIO, 2019).

Um esquema do processo de produção pode ser visto na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Esquema do processo de clinquerização no forno rotativo.



Fonte:BBC, 2018.

O equipamento que é utilizado para alimentar o sistema do forno com o combustível para o processo de queima é denominado de queimador ou maçarico (Figura 4). Constitui-se em um dos componentes mais críticos do forno e tem a importante função de gerar uma chama estável e otimizar a operação do forno (CSN, 2016). O queimador deve ser capaz de queimar gás natural, óleo combustível, carvão e coque de petróleo ou qualquer mistura dos mesmos, assegurando ao mesmo tempo uma combustão completa e utilizar o mínimo possível de ar primário.

Figura 4 – Visão interna de forno rotativo.

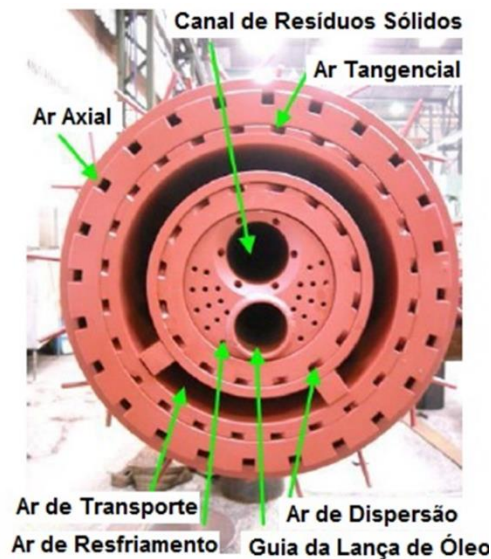


Fonte: CSN, 2016.

Em todos processos de combustão, as etapas de ignição, reação química e dispersão dos produtos são muito rápidas, já a etapa entre combustível e comburente é relativamente lenta. Assim, a “eficácia” do processo de combustão é controlada pela qualidade do processo da mistura entre o de combustão e combustível, e, logo, o queimador precisa ser projetado para misturar os fluxos de ar e combustível eficientemente.

O combustível, por exemplo o coque de petróleo, é inserido no forno pela câmara radial, conforme mostra a Figura 5, na porção denominada Ar de Transporte. Ar primário e secundário são injetados através do queimador, sendo o ar primário o ar suprido diretamente no sistema de combustão, assumindo correntes de ar axial, radial, de transporte e de dispersão, conforme Figura 5. O ar secundário é o ar proveniente do reaproveitamento de gases do resfriador.

Figura 5 – Distribuição dos canais de ar em maçaricos de alta eficiência



Fonte: CSN, 2016.

3.1.3 Principais emissões atmosféricas na produção do cimento

Segundo a Resolução CONAMA 05/1989, poluentes atmosféricos são qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A discussão sobre questões climáticas se torna cada vez mais expressiva e relevante na indústria do cimento, dado que é um dos setores mais intensivos em emissão de carbono do segmento industrial (EPE, 2020). Globalmente, as suas emissões de gás carbônico representam cerca de 7% das emissões totais.

No Brasil, segundo o Inventário Nacional de Gases do Efeito Estufa, a indústria do cimento possui uma das menores intensidades carbônicas, cerca de um terço da média mundial (~2,6%) devido as ações de melhoria que vem sendo implementadas. Desde 1990 até os dias atuais, a indústria brasileira está à frente na posição entre os países/regiões com menor emissão específica por tonelada de cimento, produzida no mundo (SNIC, 2019).

No período de 1990 e 2018, o setor conseguiu reduzir em 16% suas emissões de carbono, de 700 kg CO₂/t cimento para 590 kg CO₂/t cimento, contra a média mundial de 634

kg CO₂/t cimento. Essa redução, acompanhou o cenário crescente da produção de cimento, cuja produção aumentou, aproximadamente, 200% (SNIC, 2019).

Além da emissão de dióxido de carbono, outros efeitos negativos decorrem da queima de combustíveis fósseis, como a contaminação dos mananciais, poluição do ar devido a poeiras fugitivas (partículas extremamente finas) e a geração de gases tóxicos – SO_x, principalmente (PETROBRAS, 2019). Os óxidos de enxofre (SO_x), são responsáveis pela chuva ácida, pois quando reagem com água formam o ácido sulfuroso e o ácido sulfúrico (RAMOS, 2015).

Durante a combustão são formados óxidos de nitrogênio (NO_x) nos fornos rotativos, no qual há a formação de NO térmico a partir do nitrogênio atmosférico. Nesse caso, o nitrogênio atmosférico reage com o oxigênio, em temperaturas elevadas (acima de 1500°C), e com o nitrogênio contido no combustível, em temperaturas relativamente menores (SILVA, SIGNORETTI, 2006). O NO térmico e o NO do combustível são os mecanismos de formação de NO_x mais relevantes nos fornos da indústria de fabricação de cimento. (SIGNORETTI, 2008).

3.2 INICIATIVAS PARA TRANSIÇÃO DA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO

Conceitos e tendências relacionados a economia circular, precificação de carbono, mitigação de CO₂ e, mais recentemente, investimentos em ESG (ambiental, social e governança, em inglês) estão sendo amplamente discutidos e as empresas precisam se adaptar a esses fatores para que se tornem mais competitivas.

Com a finalidade de acelerar a transição do setor de cimentos para uma economia de baixo carbono, a indústria brasileira, em parceria com a Agência Internacional de Energia (IEA), a Corporação Financeira Internacional (IFC) do Banco Mundial e com o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) – além de diversas universidades brasileiras e centros tecnológicos nacionais e internacionais – lançaram, em 2019, um estudo denominado Roadmap Tecnológico do Cimento.

Esse projeto analisa e propõe uma série de medidas de redução de emissões a médio e longo prazos para a indústria brasileira, apresentando metas desafiadoras para o futuro, tais como evitar a emissão de cerca de 420 milhões de toneladas de CO₂ até 2050. Entre as principais iniciativas para atingir esse objetivo estão o aumento do uso de adições e substitutos de clínquer de 32% para 48%, e a substituição de 23% para 55% do uso de combustíveis fósseis para combustíveis alternativos (PENNA, 2021).

A substituição dos combustíveis tem sido uma importante ferramenta do setor para redução das emissões de CO₂, caracterizado pela busca de energéticos com menores fatores de emissão que os combustíveis convencionais. Nesse contexto, na indústria cimenteira já são utilizados *blends* entre combustíveis fósseis, como o coque de petróleo e carvão mineral, e combustíveis alternativos, como coprocessamento de resíduos e utilização de biomassas.

Unidades industriais de produção de cimento na região de Arcos, Minas Gerais, têm utilizado *blends* como combustível, processando em seus fornos uma mistura de coque de petróleo e moinha de carvão vegetal. Estima-se que até 2050 o uso de biomassas no *blend* de combustíveis será de 11% (GCCA, 2021).

3.3 BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA

É considerada uma fonte de energia renovável aquela que está disponível de forma contínua ao longo do tempo, sendo, portanto, uma fonte abundante de recursos energéticos. No ano de 2019, as fontes renováveis, no Brasil, totalizaram 46,2% da matriz energética nacional, se destacando entre as mais elevadas do mundo. Desse total, 26,8% correspondem a participação de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal (EPE, 2019).

Portanto, o uso da biomassa como matéria-prima para a produção de energia, ocupa lugar de destaque na matriz energética brasileira entre as fontes renováveis. Tanto no mercado nacional quanto internacional, essa matéria-prima é tida como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e redução da dependência de combustíveis fósseis (ANEEL, 2008).

A biomassa é todo recurso proveniente de matéria orgânica e que pode ser utilizado para fins energéticos por meio de processos físicos, biológicos, térmicos e mecânicos (ANEEL, 2018). Ela pode ser classificada como biomassa energética florestal, seus produtos, subprodutos e resíduos; biomassa energética da agropecuária, os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; além de rejeitos urbanos (EPE, 2021).

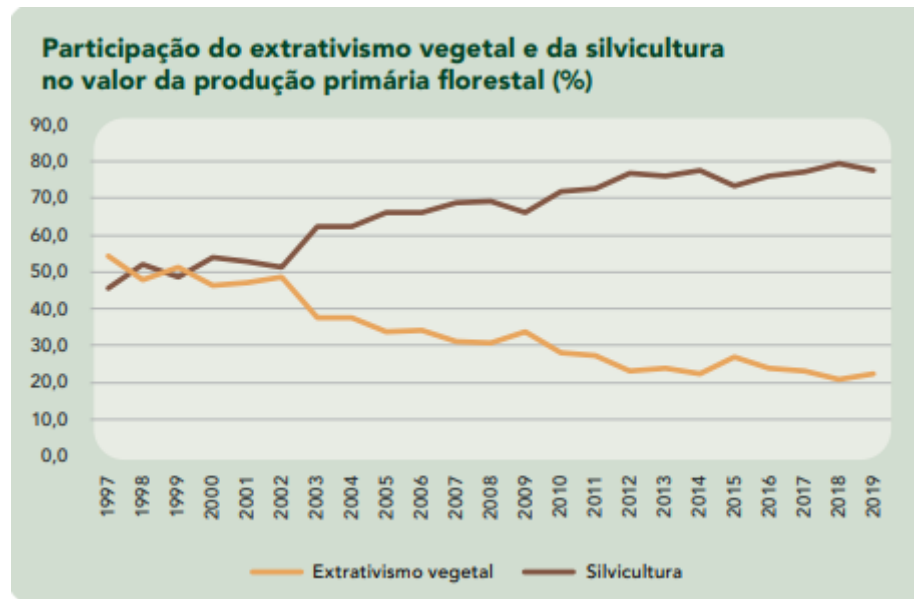
Por meio do processo de fotossíntese, as plantas convertem o dióxido de carbono (CO₂) em carboidratos, água e oxigênio, produzindo energia química a partir da luz solar. A energia contida na biomassa pode ser liberada e transformada em outras fontes de energia por meio de diversas rotas tecnológicas (ŞENSÖZ; ANGIN, 2008). Parte do gás carbônico emitido durante a conversão termoquímica da biomassa é aproveitado novamente no processo

de fotossíntese dos seres vivos clorofilados, não contribuindo expressivamente, portanto, para o acúmulo de CO₂ na atmosfera.

A bioenergia é apontada como uma das alternativas mais promissoras para o futuro energético sustentável, considerando que a utilização de áreas para tais fins devem ocorrer em áreas que respeitem a preservação das florestas nativas, e que estejam de acordo a legislação de proteção ao meio ambiente (PNE, 2020).

O Brasil é um país beneficiado pelas suas condições de solo e clima, que permitem o desenvolvimento de diversas fontes de biomassa. Em 2019, os produtos florestais, no Brasil, movimentaram R\$ 20 bilhões, dos quais R\$ 15,5 bilhões foram provenientes da silvicultura e R\$ 4,4 bilhões da extração vegetal. A evolução desses setores está representada na Figura 6. Até 2002, quando a produção de carvão vegetal utilizava cerca de 50% de madeira de origem nativa, esse percentual vem se reduzindo continuamente (IBGE, 2019). Esse dado revela a tendência à diminuição do uso de madeira nativa para a produção de carvão vegetal.

Figura 6 - Participação percentual do extrativismo vegetal e da silvicultura no valor da produção primária florestal - Brasil - 1997-2019



Fonte: IBGE, 2019.

O Brasil, tradicionalmente, aproveita energeticamente a lenha, o bagaço da cana-de-açúcar e as lixívias. Além dessas, está se tornando comum o uso de outras biomassas alternativas disponíveis para o aproveitamento energético, como resíduos da cana-de-açúcar (palhas e pontas, vinhaça e torta de filtro), resíduos da indústria madeireira (cavaco), palhas das culturas de soja e milho, cascas de arroz, café e resíduos de coco (PNE, 2020).

O potencial energético dos produtos obtidos a partir da biomassa está relacionado com a matéria-prima utilizada e com a tecnologia empregada no processamento para a obtenção dos energéticos (ANEEL, 2008).

3.3.1 Biomassa de origem florestal

Todo e qualquer produto ou subproduto dos recursos florestais pode ser considerado biomassa de origem florestal. Podem ser resíduos da coleta da madeira, como galhos finos, resíduos do processamento em forma de cavaco, serragem, cascas e aparas (CORTEZ et al, 2008; REIS et al, 2017).

Em 2019, estima-se que a área de floresta plantada no Brasil era de 9,98 milhões de hectares. Desse total, 7,6 milhões de hectares são áreas de eucalipto, o que representa 76,3% do total do país. Considerando eucalipto e pinus, a área de cobertura de florestas plantadas para fins comerciais atinge 96,1%.

A área de floresta plantada no estado de Minas Gerais atinge cerca de 2 milhões de ha, o que representa ~20% do território total de florestas plantadas no Brasil. Desse total, as florestas de eucalipto representam a maior parte (SNIF, 2020).

3.4 TRANSFORMAÇÃO DA MADEIRA EM CARVÃO VEGETAL

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no mundo, representando cerca de um terço da produção mundial (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SIVILCULTURA – SBS, 2015). A produção de carvão no Brasil, em 2020, foi de 6,2 milhões de toneladas, e, desse total, 4,45 milhões de toneladas foram consumidos pela indústria siderúrgica, como é mostrado na Tabela 3. Além da indústria de ferro-gusa e aço, os setores industriais de cimento, ferro-liga e química também fazem parte do grupo de consumidores de carvão vegetal.

Tabela 3 – Oferta e Demanda de Energia: Carvão Vegetal (ton).

| Fluxo | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Produção | 7636 | 7310 | 6615 | 6507 | 6444 | 5545 | 5738 | 6020 | 6197 | 6216 |
| Consumo | 6500 | 6190 | 5630 | 5.476 | 5430 | 4.624 | 4877 | 5125 | 5307 | 5333 |
| Cimento | 276 | 220 | 198 | 188 | 169 | 154 | 145 | 147 | 141 | 157 |
| Ferro-gusa | 5405 | 5168 | 4677 | 4585 | 4625 | 3854 | 4058 | 4293 | 4489 | 4448 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| e aço | | | | | | | | | | |
| Ferro-ligas | 788 | 772 | 726 | 675 | 608 | 590 | 648 | 659 | 652 | 702 |
| Química | 31 | 30 | 29 | 28 | 28 | 26 | 26 | 26 | 25 | 26 |

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2021.

O carvão vegetal é obtido por meio da carbonização da madeira, aquecendo-a em temperaturas superiores a 200°C em meio controlado de oxigênio, com o controle do tempo e da temperatura do processo (SANTOS, 2010). No processo de carbonização, ocorre um conjunto de reações químicas, que promovem alterações nos componentes da madeira, aumentando o teor de carbono fixo e o poder calorífico (OLIVEIRA et al., 2015).

3.4.1 Pirólise: conversão termoquímica da biomassa

A pirólise é um processo caracterizado pela degradação térmica da biomassa na ausência de oxigênio ou em quantidades limitadas deste, originando três fases: carvão vegetal, gás não condensável, e uma fase líquida (bio-óleo). O objetivo principal do processo de pirólise é obter produtos que possuam densidade energética superior à biomassa (DEMIRBAS e ARIN, 2002; KIMURA, 2009).

São dadas diferentes denominações para a pirólise, dependendo das condições utilizadas no processo. Na pirólise lenta, ou carbonização, são empregadas baixas temperaturas, geralmente entre 400-500°C, e longos tempos de residência dos vapores, o que favorece a produção de carvão vegetal (fase sólida). Na pirólise rápida são empregadas temperaturas moderadas e pequenos tempos de residência, favorecendo a produção de líquidos (BRIDGWATER e MANIATIS 2004).

No processo de pirólise lenta, menor taxa de aquecimento (~10°C/min) e maior tempo de residência do vapor promovem um ambiente adequado e tempo suficiente para a remoção dos vapores que são gerados durante reações secundárias, resultando na formação principalmente do produto sólido rico em carbono (TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016).

A produção de carvão vegetal, portanto, é favorecida no processo de pirólise lenta, o qual consiste, basicamente, em concentrar carbono e eliminar oxigênio, aumentando a energia do produto. A madeira, contém aproximadamente 49% de carbono e 44% de oxigênio e, após a carbonização, esses valores reduzem para 82% e 13,7%, respectivamente (SANTOS, 2010).

O processo térmico de pirólise consiste em romper as ligações carbono-carbono (C-C) e formar ligações carbono-hidrogênio (C-H), ou seja, é um processo de oxidação-redução,

onde parte do material lignocelulósico é reduzido a carbono e parte é oxidada e hidrolisada, originando carboidratos, fenóis, cetonas, ácidos carboxílicos, aldeídos e álcoois (ROCHA; PÉREZ; CORTEZ, 2004). O processo é extremamente complexo, abrangendo uma série de reações que ocorrem paralelamente e em série, abrangendo desidratação, despolimerização, isomeração, aromatização, descarboxilação e carbonização (COLLARD; BLIN, 2014).

Em geral, a pirólise do material lignocelulósico compreende três etapas principais: remoção da umidade, decomposição primária, onde há degradação dos polímeros menos estáveis e reações secundárias que ocorrem em virtude do aumento de temperatura, no qual se inicia a degradação dos constituintes mais refratários e a liberação de materiais voláteis do produto sólido (FISHER et al., 2002).

3.4.2 Carvão vegetal

O produto sólido produzido pela pirólise lenta é conhecido como carvão e consiste numa estrutura porosa rica em carbono (CREAMER; GAO; ZHANG, 2014; ISLAM et al., 2016). É um produto de origem renovável e, em relação aos combustíveis fósseis, como o coque de petróleo, seu uso é considerado mais sustentável (Antal Júnior et al., 2003).

Durante o processo de pirólise ocorre a liberação da umidade e compostos voláteis da biomassa, sendo produzido o material poroso que retém os compostos aromáticos e grupos funcionais químicos (YUAN et al., 2017). Embora o elemento principal do carvão seja o carbono, quantidades de hidrogênio, oxigênio, cinzas e resquícios de nitrogênio e enxofre também estão presentes em sua estrutura química (LIU et al., 2015). Segundo Angin et al. (2013), a qualidade do carvão para uso industrial e doméstico é avaliado por suas características físico-químicas, como material volátil, teor carbono fixo, teor de cinzas e poder calorífico.

3.4.2.1 Propriedades químicas do carvão vegetal

Sendo as três frações distintas que compõem o carvão vegetal: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, a análise imediata pode ser utilizada para investigar as suas propriedades químicas, a partir da determinação da porcentagem de cada uma dessas frações, em base seca (OLIVEIRA, 2012).

O carbono é o principal elemento combustível existente na biomassa, e no carvão vegetal a sua medida é avaliada indiretamente pelo teor de carbono fixo. O rendimento em carbono fixo expressa uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e

densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de hemiceluloses, além de ser uma função direta do rendimento gravimétrico. O teor de carbono fixo representa a fração de carbono disponível para a combustão, relacionando-se à qualidade do combustível. Quantidades elevadas, entre 15 a 25%, de carbono fixo no material lignocelulósico, são desejáveis pois promovem queima mais lenta do produto sólido aumentando a eficiência (EROL; HAYKIRI-ACMA; KÜÇÜKBAYRAK, 2010; TODARO et al., 2015).

Os materiais voláteis são constituídos principalmente de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos. Altos teores de voláteis no carvão levam a produção de fumaça acima do desejável, além de reduzir a eficiência energética do carvão (COSTA, 2016).

As cinzas são os resíduos de óxidos minerais resultantes da combustão completa do carvão vegetal. Altas concentrações de cinzas podem ocasionar a redução da taxa de queima, além de incrustações, corrosão dos reatores e formação de escória.

O poder calorífico do carvão vegetal é de aproximadamente 7100 kcal/kg, podendo variar para mais ou para menos conforme o teor de carbono fixo, teor de lignina, teor de cinzas e umidade. Além disso, o poder calorífico é fortemente afetado pela temperatura final de carbonização (SANTOS, 2010).

3.4.2.2 Propriedades físicas do carvão vegetal

A qualidade do carvão vegetal é grandemente influenciada pelas análises das suas propriedades físicas. Dentre elas encontram-se a umidade, a densidade e a porosidade.

Alto teor de umidade influencia na capacidade energética do carvão vegetal, sendo inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a umidade do carvão, menor é o seu poder calorífico. Além disso, a umidade diminui o rendimento gravimétrico, pois parte do material lenhoso é queimado para retirada da água na forma de vapor (ROUSSET et al., 2011).

A densidade do carvão vegetal é um aspecto diretamente relacionado com o rendimento e produtividade do alto forno (BRITO, 1993). Uma maior densidade do carvão representa uma carga maior dentro do alto forno, o que indicará um maior tempo de residência, resultando em uma redução do consumo específico de carvão.

De acordo com Barcellos (2007) o carvão vegetal é um material bastante poroso, podendo apresentar de 70 – 80% de porosidade. Matos e Rios (1982) alegam que uma porosidade apropriada favorece o aumento da permeabilidade e melhora a circulação dos gases no interior do alto forno.

3.5 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

O carvão vegetal apresenta heterogeneidade em suas características físicas e químicas, visto que é um produto dependente da madeira de origem e dos fatores operacionais do processo.

3.5.1 Matéria prima

As propriedades da madeira irão afetar diretamente o processo de carbonização e a qualidade do carvão vegetal. Dentre essas propriedades, destacam-se: a umidade, a densidade básica e o poder calorífico.

A densidade básica é definida como o principal índice de qualidade da madeira e é uma propriedade física significativa para a produção de carvão vegetal. Brito (1993) ressalta que, quanto maior a densidade básica da madeira, maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido, para um determinado volume.

A madeira recém-abatida apresenta uma quantidade considerável de água, geralmente, acima de 30%. No processo de carbonização, a umidade reduz o poder calorífico e o rendimento gravimétrico, pois parte do material lenhoso é queimado para retirada da água na forma de vapor (ROUSSET et al., 2011).

O poder calorífico da madeira pode ser definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível (BRAND, 2010).

3.5.1.1 Leucena

O gênero *Leucaena* tem sua origem no México, América Central e sul dos EUA, e, de acordo com a Academia Nacional de Ciências dos EUA (NAS, 1997), as civilizações pré-colombianas disseminaram o gênero pelo mar do Caribe e ao redor do Golfo do México. A espécie mais conhecida do gênero, por suas características e importantes usos em países tropicais, é a *Leucaena leucocephala*.

A leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) R. de Wit) é uma espécie exótica, leguminosa, pertencente à família Mimosaceae, de porte arbóreo-arbustiva, podendo alcançar uma altura de 20 m e diâmetro a altura do peito (DAP) de 30 cm, com ampla diversidade de uso, sendo uma opção de plantio em regiões tropicais.

Segundo Vilela e Pedreira (1976), não se sabe quando houve a introdução da espécie no Brasil, porém o relato mais antigo de introdução data de novembro de 1940, no estado de São Paulo. No Brasil, é possível encontrar *L. leucocephala* em quase todos os estados, porém as maiores ocorrências estão nas regiões Sul e Sudeste, e, principalmente, em áreas de Caatinga no Nordeste, sendo registradas presença da espécie nos sete estados da região. (LEÃO et. al., 2011).

A leucena é uma das espécies invasoras mais frequentes em ilhas oceânicas no mundo, isso se justifica devido a sua capacidade de expansão em condições mais favoráveis (principalmente, em relação à pluviometria), e, em virtude da grande quantidade de sementes produzidas anualmente pelas plantas e pela sua facilidade de germinação. É uma planta rústica capaz de rebrotar com facilidade mesmo após diversos cortes sucessivos (DRUMOND; RIBASKI, 2010).

A espécie se estabelece após perturbações antrópicas, sendo muito encontrada em áreas degradadas, cultivos agrícolas, pastagens, margens de rodovias e como invasoras de bordas de remanescentes florestais e margens de cursos hídricos (INSTITUTO HÓRUS, 2009). Os cultivos de leucena, no Brasil, são realizados com a finalidade de recuperação ambiental e, especialmente, como planta forrageira.

No município de Arcos em Minas Gerais, a introdução da espécie ocorreu na década de 80, a qual se deu por medidas iniciais para a recuperação de áreas degradadas por atividades de mineração. Atualmente, existem maciços inteiros ocupados pela espécie e a presença da mesma em áreas de regeneração numa Estação Ecológica (UC de Proteção Integral) administrada pelo Instituto Estadual de Florestas- IEF, além da presença nas margens de rodovias, lotes e áreas verdes urbanas e propriedades rurais.

De modo geral, as variedades empregadas no Brasil apresentam poder calorífico variando entre 4200 e 4600 kcal.kg⁻¹, densidade aparente entre 0,55 e 0,70 g.cm⁻³, rendimento de carvão de 34,7% em relação à madeira seca, 81% de carbono fixo e 1,5% de conteúdo de cinzas (FRANCO; SOUTO, 1986; DRUMOND; RIBASKI, 2010).

3.5.1.2 Eucalipto

A clonagem de materiais genéticos das espécies do gênero *Eucalyptus*, obtido por meio da seleção de indivíduos superiores, possibilitou a transferência do ganho genético e alavancou os resultados do setor florestal. O uso de clones em grandes e pequenos projetos florestais torna menos heterogênea a matéria-prima, aumenta a produtividade, reduz custos e agrega resistências a fatores bióticos e abióticos.

A planta é cultivada para diversos fins, como papel, celulose, lenha, carvão, aglomerado, serraria, óleos essenciais para indústrias farmacêuticas, produção de mel, ornamentação, entre outros (NILMARA, 2022).

As espécies mais utilizadas no momento, em função das características de suas madeiras, são: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* e *Eucalyptus dunnii* (região sul do Brasil) (PENTEADO, 2019).

O Brasil passou a ser referência em monocultura de eucalipto a partir da década de 1990, e, dentre os 26 estados brasileiros, Minas Gerais possui a maior área de eucalipto plantada. No total, existem aproximadamente 700 espécies distintas, divididas em árvores naturais, híbridos e clones de eucalipto. No estado de Minas Gerais, o eucalipto é utilizado com maior frequência nas siderúrgicas, madeireiras, indústrias de celulose e papel (BORGES et al., 2018).

De acordo com estudos realizados, as propriedades das diferentes espécies e clones de eucaliptos, como densidade básica, teor de carbono fixo e compostos voláteis, variam entre si.

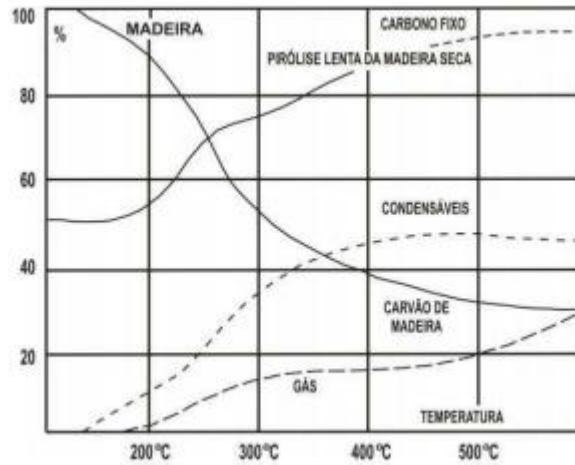
De acordo com MOUTINHO et al. (2017), o rendimento gravimétrico dos clones estudados em seu trabalho apresentaram valores próximos de 35%, sendo que *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus pellita* apresentaram menores valores, em torno de 30%, enquanto os híbridos do gênero *Corymbia* apresentaram valores em torno de 40%. PEREIRA et al. (2013) encontraram rendimento gravimétrico próximos a 35% para diferentes clones de *Eucalyptus*, com máxima temperatura de 450 °C e velocidade de carbonização de 1,67 °C/min.

3.5.2 Fatores operacionais do processo

A temperatura que a madeira é submetida influencia as reações químicas ocorridas durante o processo de pirólise. A faixa ideal da temperatura de carbonização está entre 300°C-500°C. Nesse intervalo, ocorre perda de massa, sendo que a 300°C é produzido um carvão mais denso que aquele produzido a 500°C, devido à liberação de voláteis. Entre 500°C e 700°C, além da perda de massa, ocorrem contrações nas dimensões do carvão vegetal (ISBAEX, 2014).

A Figura 7, mostra a evolução dos produtos de pirólise conforme o aumento da temperatura.

Figura 7 – Evolução dos produtos da carbonização em função da temperatura.



Fonte: MEZERETTE E VERGNET, 1994.

A taxa de aquecimento exerce grande influência no processo, ao nível de rendimento e características dos produtos. Se a carbonização ocorre com aumento drástico de temperatura, as reações químicas favorecem a formação de gases e líquidos (fração volátil). Entretanto, se o aquecimento ocorrer de forma gradual, a tendência será a formação de frações sólidas - carvão vegetal (LUENGO et al., 2008).

3.5.2.1 Fornos de alvenaria para produção de carvão vegetal

A produção brasileira de carvão vegetal continua, mesmo com avanços tecnológicos nos sistemas de conversão de madeira em carvão, ocorrendo em fornos rudimentares de alvenaria. Os pequenos e médios produtores, geralmente, optam por fornos de baixa capacidade volumétrica, nas configurações dos tipos “rabo-quente”, superfície e de encosta (OLIVEIRA, 2012). As formas e tamanhos distintos fazem com que o processo seja irregular, apresentando baixo rendimento gravimétrico, ausência de instrumentos de medição das variáveis do processo e emissões não controladas de gases poluentes para o ambiente.

Os fornos “rabo-quente” são os modelos mais simples e mais difundidos entre os pequenos produtores. Esses fornos são de baixo custo e fácil manuseio, possibilitando que um único trabalhador opere dez fornos, realizando atividades de carregamento, controle da carbonização, descarga, deposição na praça e limpeza da área (MINETTE, 2007). O progresso da carbonização é avaliado pela coloração dos gases liberados através dos orifícios, e o controle ocorre pelo fechamento progressivo das entradas de ar. Assim, a temperatura interna do forno não é controlada adequadamente, o que prejudica a qualidade do carvão vegetal e leva à produção com baixo rendimento gravimétrico, variando de 20 a 28%.

Os fornos de encosta é construído aproveitando os desníveis naturais do terreno, em que a borda do mesmo assume a função de parede do forno, reduzindo a quantidade de material utilizado na construção. Segundo Baer Filho (2008), os fornos de encosta atingem 32% de rendimento em carvão vegetal. O rendimento é elevado pois parte do forno está em contato direto com o solo, possibilitando menores perdas térmicas, o que aumenta a eficiência de carbonização. No entanto, aumenta o ciclo de produção devido o resfriamento ocorrer de forma mais lenta.

Os fornos de superfície são semelhantes aos fornos tipo “rabo-quente”, apresentando como inovação uma chaminé lateral com tiragem central dos gases gerados durante a carbonização da madeira. Devido suas características de construção, os fornos de superfície apresentam melhores condições para propagação da carbonização, que ocorre de maneira mais homogênea. Possui, geralmente, uma câmara de combustão que fornece calor à madeira através da queima de outros materiais lignocelulósicos. O calor gerado é direcionado para o interior do forno através de ductos. De acordo com CARNEIRO et al. (2014), o forno de superfície apresenta rendimento gravimétrico variável de 28% a 34%.

O alvo de grandes empresas do ramo de energia florestal, atualmente, são os fornos retangulares, caracterizados pela elevada capacidade, além de operação de carregamento e descarregamento mecanizadas (CARDOSO, 2010). Além disso, essa configuração permite a recuperação ou queima dos gases gerados durante a carbonização.

3.5.2.2 Sistema tipo forno-fornalha

Os fornos-fornalha são sistemas de baixo custo para o produtor de carvão e com baixos impactos ambientais. Geralmente são compostos por quatro fornos circulares de superfície, conectados por dutos a uma fornalha central, de alvenaria. No interior dos fornos ocorre o processo de secagem e a carbonização da madeira, os dutos conduzem os gases da reação para a fornalha. Por fim, a fornalha apresenta como objetivo principal a combustão dos gases metano e dióxido de carbono, gerados na reação de carbonização da madeira, convertendo-os em gás carbônico, calor e água. Esse sistema apresenta, em média, redução de quase 90% das emissões de gás metano e monóxido de carbono, na atmosfera (FAULLER, 2019).

A Figura 8 ilustra um forno tradicional, com os gases emitidos diretamente na atmosfera. Já a Figura 9, um forno projetado na configuração forno-fornalha.

Figura 8 – Forno tradicional para produção de carvão vegetal.



Fonte: Globo Rural, 2021.

Figura 9 – Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal.



Fonte: Globo Rural, 2021.

3.6 VANTAGENS DO CARVÃO VEGETAL EM RELAÇÃO AO COQUE

A utilização do carvão vegetal para fins energéticos apresenta diversas vantagens em comparação ao coque:

- a) Tecnicamente, a qualidade química do carvão vegetal é superior, apresentando teor de cinzas 10 vezes inferior ao coque;
- b) Ambientalmente, o carvão vegetal não apresenta poluição por enxofre (SO_x) e possui um balanço negativo de CO₂;
- c) Economicamente, a utilização do coque implica na dependência do mercado externo, pela necessidade contínua de importação, devido à baixa qualidade do carvão mineral originado das reservas nacionais;

A relação do volume das espécies florestais nas principais cidades do entorno, pode ser vista na Tabela 4. A espécie com maior quantidade em área de floresta plantada são os eucaliptos. Com base nisso, o uso da espécie florestal *Eucalyptus* sp. foi selecionada para o estudo.

Tabela 4 – Área plantada de eucalipto e produção de lenha no raio de 80 km em torno do município de Arcos, Minas Gerais.

| Município (MG) | Floresta plantada (ha) | Lenha produzida (m³) |
|------------------------|-------------------------------|--|
| Arcos | 3250 | 1750 |
| Formiga | 5350 | 80200 |
| Pains | 1060 | 6500 |
| Lagoa da Prata | 410 | 8330 |
| Santo Antônio do Monte | 2870 | 51300 |
| Pedra do Indaiá | 1450 | 33250 |
| Piumhi | 1680 | 3600 |
| Bambuí | 3500 | 52000 |
| Campo Belo | 800 | 23000 |
| Luz | 2350 | 24550 |
| Cristais | 1500 | 20500 |
| Bom Despacho | 11500 | 23750 |
| Total | 35720 | 304980 |

Fonte: IBGE Cidades (2020).

4.2 Coleta da matéria-prima

A madeira de leucena foi fornecida pela indústria cimenteira, localizada em Arcos - Minas Gerais. Já, os cavacos de eucalipto foram fornecidos por uma empresa do setor de biomassas, instalada nas cidades de Luz – MG e Lagoa da Prata – MG, que atuam na região do Centro-Oeste mineiro.

As matérias-primas utilizadas para a produção de carvão estão representadas na Figura 11.

Figura 11 – Matérias-primas utilizadas na produção de carvão vegetal (A) madeira de leucena; (B) cavacos de eucalipto.



Fonte: Da autora (2022).

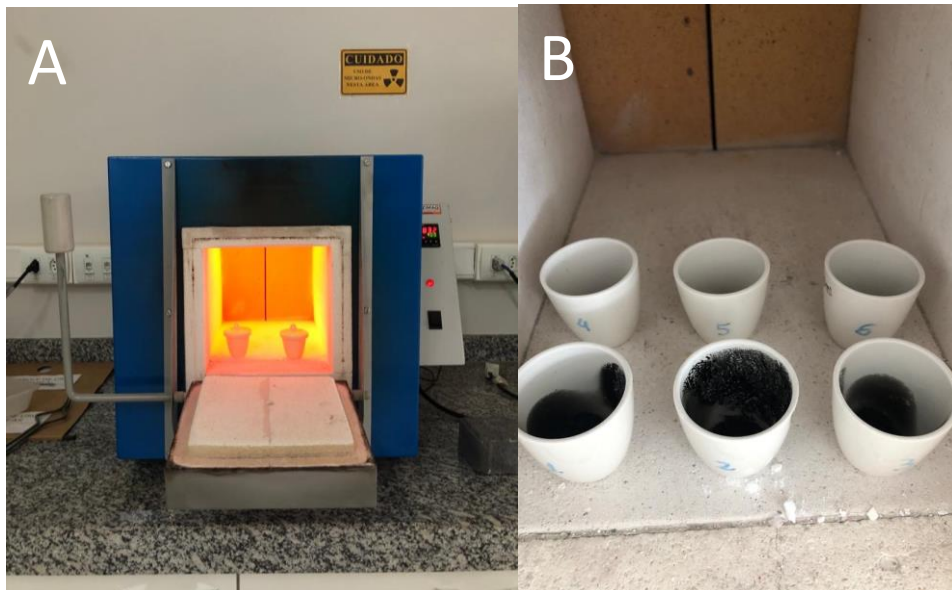
4.3 Caracterização das matérias-primas

Para a caracterização química imediata e determinação do poder calorífico superior dos materiais, foi utilizado o material passante pela peneira granulométrica de 40 *mesh* (0,42 mm) e retido na peneira de 60 *mesh* (0,25 mm). Os ensaios foram realizados em triplicata.

4.3.1 Análise química imediata das matérias-primas

Por meio da análise química imediata foi quantificado os teores de umidade (TU), teor de materiais voláteis (MV), teor de cinzas (TC) e teor de carbono fixo (CF), de acordo com a norma ASTM D1762-84 (American Society for Testing Materials) (ASTM, 2013). A análise imediata foi realizada no Laboratório de Operações e Sistemas Térmicos da Universidade Federal de Lavras. O ensaio realizado para a determinação do teor de materiais voláteis e das cinzas está representado na Figura 12.

Figura 12 - Ensaio experimental da análise imediata (A) quantificação do teor de materiais voláteis; (B) determinação do teor de cinzas.



Fonte: Da autora (2022).

4.3.2 Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico superior (PCS) da leucena e do eucalipto foram estimados a partir dos dados obtidos na análise imediata, utilizando a equação proposta por Yin (2011), Equação 1.

$$PCS = 0,1905 * MV + 0,2521 * CF \quad (1)$$

Em que: PCS é o poder calorífico superior estimado, em MJ/Kg; MV é o teor de materiais voláteis em %; e CF é o teor de carbono fixo, em %.

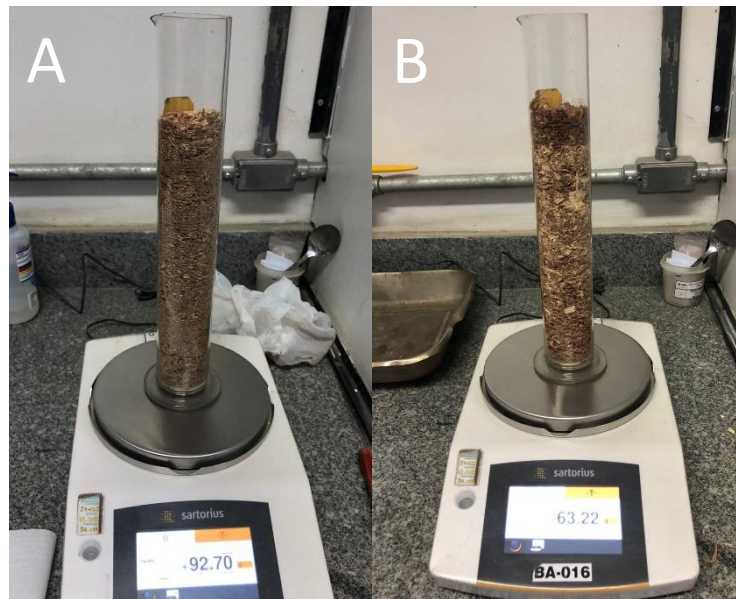
4.3.3 Densidade bulk

A definição da densidade bulk ou volumétrica é dada pela relação entre a massa de partículas de biomassa e o seu respectivo volume ocupado, utilizando a Equação 2.

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{bulk}} \quad (2)$$

A densidade bulk foi determinada utilizando a serragem de ambas biomassas. Os materiais foram secos em estufa ($105 \pm 2^\circ\text{C}$). As densidades da leucena e do eucalipto foram obtidas a partir da massa e volume que ocupado numa proveta graduada (500 mL), conforme a Figura 13.

Figura 13 - Determinação da densidade básica para a madeira de (A) leucena e (B) eucalipto.



Fonte: Da autora (2022).

4.4 Configuração do forno experimental

Para realizar a carbonização da matéria prima foi projetado e desenvolvido um tambor, com o objetivo de simular um sistema forno-fornalha. O forno consiste em dois tambores cilíndricos concêntricos e uma chaminé na extremidade superior, conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Equipamento utilizado para reação de pirólise



Fonte: Da autora (2022).

O cilindro interno possui uma tampa e é inserido de forma concêntrica dentro do tambor externo. O tambor interno foi desenvolvido de modo que permanecesse todo fechado,

com exceção de três furos pequenos em seu fundo, para liberação dos gases da reação. Já, o cilindro externo possui quatro aberturas laterais em sua base e várias aberturas na circunferência do topo. As aberturas laterais do tambor externo tem como objetivo permitir a ignição, controle da carbonização da madeira e entrada de oxigênio.

O forno foi projetado dessa forma, para que, dentro do cilindro interno, fosse garantido um ambiente com baixa concentração de oxigênio, o que favorece a concentração de carbono e aumento da energia, configuração característica para a reação de pirólise ocorrer. Essa configuração permite que o sistema realize a carbonização total do material de interesse, sem contato com o ar.

Os gases produzidos na reação, dentro do tambor interno, se deslocam dos pequenos furos localizados no fundo para a região anular entre o tambor interno e externo, que simula a fornalha queimando os gases da reação. Os gases queimados na região anular são exauridos pela chaminé, em forma de vapor.

4.5 Processo de carbonização das madeiras

Para cada ensaio experimental de carbonização, os cavacos de cada espécie florestal (leucena e eucalipto) foram pesados e inseridos no cilindro interno do tambor, conforme Figura 15.

Figura 15 - Determinação da massa de cavacos de eucalipto.



Fonte: Da autora (2022).

O cilindro interno foi fechado com uma tampa e inserido de forma concêntrica no cilindro externo.

Conforme visto na Figura 16, a região anular, entre o recipiente interno e externo, é a região na qual ocorre a queima dos resíduos lignocelulósicos, com o objetivo de gerar calor e aquecer o material dentro do cilindro interno. Outra função da zona anelar é a queima dos gases de carbonização.

Figura 16 - Sistema do tipo forno-fornalha (A) cilindro interno preenchido com cavacos de madeira; (B) Área anelar preenchida com biomassa para a ignição; (C) tambor preenchido com material para a queima; (D) ignição do material.



Fonte: Da autora (2022)

A ignição dos materiais foi feita pela superfície e pelas aberturas laterais do tambor. A reação durou, aproximadamente, 4 horas e a temperatura foi monitorada com auxílio do termopar.

Durante a queima dos gases na região anular dos tambores, foram obtidas temperaturas até 800°C. Essa temperatura é suficiente para a combustão completa do alcatrão, do licor pirolenhoso, dos fenóis e dos gases CO e CH₄, transformando-os em CO₂ e H₂O, conforme atestado por Cardoso (2010).

Após a queima total das madeiras presentes na região anular, o processo foi finalizado e, após o resfriamento do equipamento os carvões foram coletados.

O produto final pode ser visto na Figura 17, exemplificado pelo carvão de leucena.

Figura 17 – Carvão de Leucena.



Fonte: Da autora (2022).

4.6 Caracterização do carvão vegetal

Para a caracterização química imediata e determinação do poder calorífico superior do carvão, foi utilizado o material passante pela peneira granulométrica de 40 *mesh* (0,42 mm) e retido na peneira de 60 *mesh* (0,25 mm). Os ensaios foram realizados em triplicata.

4.6.1 Análise química imediata do carvão vegetal

A caracterização da composição química imediata e do poder calorífico superior dos carvões foram realizadas de forma análoga a da matéria-prima.

4.6.2 Densidade relativa aparente

A determinação da densidade aparente do carvão vegetal foi realizada através da técnica de picnometria líquida. O fluido utilizado foi o éter de petróleo ($\rho = 645 \text{ kg/m}^3$). Inicialmente foi medida a massa do picnômetro vazio (m_p), após ter sido colocado em uma estufa a 105°C e resfriado em um dessecador. Em seguida, colocou-se éter de petróleo, até o menisco e a massa (m_{p+a}) e a temperatura foram medidas a fim de se identificar o volume do

picnômetro (V_{p+a}). Após esses procedimentos, o fluido foi retirado do picnômetro e ele foi levado novamente à estufa para que ocorresse a secagem. Depois de esfriado no dessecador, adicionou-se uma fina camada de carvão ao picnômetro e essa massa foi medida (m_{p+sol}). Foi adicionada uma quantidade de éter de petróleo suficiente para completar a metade do volume do picnômetro e então foi levado a uma manta aquecedora para que a agitação térmica expulsasse as bolhas. Em seguida a suspensão esfriou e o carvão se decantou. Após a decantação do carvão, completou-se o volume do picnômetro com éter e ele foi pesado ($m_{p+a+sol}$), sendo a temperatura também medida. A massa de éter adicionada foi obtida pela diferença entre a massa do picnômetro com éter e carvão, e a massa do picnômetro com carvão. Conhecendo-se a temperatura, encontrou-se o volume de éter adicionado, através de sua densidade. A diferença entre o volume total e o volume de éter adicionado fornece o volume de carvão, e como a massa deles foi medida, determinou-se a densidade aparentes do carvão (ρ_{ap}), conforme Equação 3.

$$\rho_{ap} = \frac{\rho_a(m_{sol})}{m_{p+a}+m_{sol}+m_{p+a+sol}} \quad (3)$$

4.6.3 Densidade energética, consumo específico e eficiência energética

As estimativas de eficiência energética da carbonização (EE), consumo específico de madeira (CE) e densidade energética (DE) foram determinadas conforme as Equações (4), (5) e (6).

$$EE = RGC*(PCS \text{ carvão} / PCS \text{ madeira}) \quad (4)$$

$$CE = 1/ (DB*(RGC / 100)) \quad (5)$$

$$DE = PCS \text{ carvão}*DRA \quad (6)$$

Em que: RGC = rendimento gravimétrico de carvão vegetal (%); PCS carvão e PCS madeira = poder calorífico do carvão e madeira (cal.g^{-1}); DB = densidade básica da madeira (t.m^{-3}); DRA = densidade relativa aparente do carvão vegetal (g.cm^{-3}).

4.7 Análise viabilidade econômica

A viabilidade econômica da implantação deste projeto foi analisada através de uma breve comparação entre os preços de compra do coque de petróleo e os cavacos de madeira.

Para analisar a compra de coque, foram utilizados dados de importação de acordo com o balanço feito pela Secex (2022), visto que este combustível é majoritariamente importado de outros países. Portanto, para essa análise, foi considerada somente a média do preço FOB US\$/tonelada, no período de 2020 a 2022, conforme Tabela 5, e um câmbio médio para o dólar comercial de R\$5,00/US\$.

De acordo com especialistas da área, o preço médio dos cavacos de eucalipto é volátil e é fortemente influenciado pelo preço da madeira, preço de combustível, fretes e mão de obra, variando entre R\$180/tonelada a R\$300/tonelada, no período de 2020 a 2022.

Tabela 5 – Variação dos preços das toneladas de coque e cavaco de Eucalipto

| | Preço FOB (US\$/ton) * | | | Preço (R\$/ton) | | |
|---------------------|------------------------|--------|--------|-----------------|------|------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Coque | 247,81 | 263,44 | 413,20 | - | - | - |
| Cavaco de Eucalipto | - | - | - | 180 | 300 | - |

Fonte: *SECEX (2022).

Foram selecionados quatro perfis de misturas de combustível para analisar a redução anual de consumo do combustível fóssil e a minimização de gastos anuais, a partir dos *blends*

- 95% coque de petróleo e 5% carvão eucalipto;
- 90% coque de petróleo e 10% carvão eucalipto;
- 85% coque de petróleo e 15% carvão eucalipto e
- 80% coque de petróleo e 20% carvão eucalipto.

O cenário atual da indústria estudada mostra o uso, em média, de 9% mensal de moinha de carvão. Além disso, o *roadmap* 2050 para o uso de biomassas na indústria cimenteira é um valor de 11%, o que torna interessante o estudo dos *blends* de 15% e 20% de carvão.

O parâmetro base analisado foi o poder calorífico superior, pois os *blends* devem atender as condições especificadas pelo forno estudado. O combustível alimentado nos fornos da indústria cimenteira em Arcos – MG é composto por um *blend* de coque de petróleo (alto teor de enxofre) e moinha de carvão vegetal. As características de alimentação são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades utilizadas nos fornos rotativos em indústria cimenteira.

| | |
|---|-------------------|
| PCS combustível fornos | 8930-9830 kcal/kg |
| Alimentação combustível no pré calcinador | 5 a 6 ton/h |

| Alimentação combustível nos fornos | 3 a 4 ton/h |
|-------------------------------------|-------------|
| Petcoque (propriedades) | |
| Materiais Voláteis (%) | 10 – 15 |
| Umidade (%) | 7 -10 |
| Cinzas (%) | 0,5 - 1,5 |
| Carbono fixo (%) | 88 - 90 |
| Enxofre (%) | 2 - 6 |
| Hidrogênio (%) | 3,9 – 4,5 |
| Poder Calorífico Inferior (kcal/kg) | 8600 |
| Poder Calorífico Superior (kcal/kg) | 10900 |
| Granulometria passante (mm) | 0 – 50 |

Fonte: CSN, 2016

Em seguida, foram analisados os consumos e custos totais anuais para cada *blend* proposto. A Tabela 7 abaixo mostra o consumo estimado dos combustíveis para os anos de 2020 e 2021, obtidos a partir de estimativas dos dados da indústria cimenteira estudada.

Observa-se que o consumo de moinha de carvão vegetal é ínfimo em 2020 (representando 2% do consumo total), e em 2021 esse consumo aumenta para 9%, o que mostra o interesse da indústria em utilizar maior quantidade de fontes renováveis em seus fornos.

Tabela 7 – Cenário base para consumo de combustível nos fornos

| | 2020 | 2021 |
|------------------------------------|---------|---------|
| Consumo anual coque (t) | 205.500 | 222.733 |
| Consumo anual moinha de carvão (t) | 4.143 | 22.500 |
| Total (t) | 209.643 | 245.233 |

Fonte: Da autora (2022).

No cenário base escolhido, considerou-se o volume total de combustíveis consumidos em 2021, em toneladas, utilizando somente coque de petróleo, excluindo o uso atual de fontes alternativas no forno. Portanto, os cenários propostos para cada *blend*, foram calculados a partir do cenário base.

Assim, comparou-se os custos do cenário base com os custos associados ao *blends* propostos, analisando redução em consumo de combustível, assim como a redução de custos relacionados à compra de coque.

Já para as leucenas, a análise econômica realizada foi semelhante à análise realizada para o eucalipto, com exceção à preocupação com o fornecimento de madeira, visto que a floresta da região é restrita a aproximadamente 240 hectares, e o crescimento de uma nova floresta se dará a 4 ou 5 anos decorrentes do primeiro corte.

Considerando que o volume de Leucena é próximo a 80 m³/hectare, o volume disponível para uso seria em torno de 19200 m³. Sendo assim, foi proposto um *blend* que atenderia a disponibilidade mensal para carbonização de Leucenas, variando no uso de 1,5%, 1,8% e 2%.

4.8 Simulação das emissões de CO₂

Para realizar a simulação das emissões de CO₂, foi utilizado o protocolo de cálculo proposto pela Associação Global de Concreto e Cimento (GCCA, 2020), no qual o indicador analisado é dado em kg CO₂ específico/tonelada cimento equivalente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização das matérias-primas

Os resultados das análises química imediata e poder calorífico superior das espécies florestais leucena e eucalipto, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades química e energética das matérias-primas.

| Propriedades | Leucena | Eucalipto |
|-------------------------------------|---------------|---------------|
| Umidade (%) | 3,81 (0,040) | 15,37 (0,404) |
| Teor de voláteis (%) | 80,23 (0,194) | 78,62 (0,995) |
| Teor de cinzas (%) | 0,85 (0,077) | 0,52 (0,302) |
| Carbono fixo (%) | 18,92 (0,218) | 20,86 (0,695) |
| PCS estimado (kcal/kg) | 4785 (5,75) | 4790 (5,750) |
| Densidade bulk (kg/m ³) | 126,44 | 185,40 |

Valor entre parênteses se refere ao desvio padrão

Fonte: Da autora (2022).

Madeiras com potencial uso energético, em geral, devem apresentar elevada densidade básica, alto teor de lignina e poder calorífico e baixo teor de cinzas (SIQUEIRA et al., 2020).

A densidade a granel da espécie leucena não pode ser comparada com a literatura, devido à ausência de estudos realizados para essa propriedade. Porém, sabe-se que a densidade a granel é menor que a densidade básica da madeira, e, no Brasil, a variedade de espécies de *Leucaena leucocephala* apresentam valores de 550-700 kg/m³ (SILVA et al. 2017). Já, para o eucalipto, o valor de densidade a granel encontrado foi elevado, próximo ao encontrado por GRANDE (2012), o qual realizou estudos em diferentes frações de eucalipto e obteve valores entre 140 kg/m³ e 185 kg/m³. Elevados valores de densidade da matéria-prima fornecerá um carvão mais denso e com menor consumo específico no reator. Essa propriedade influencia diretamente a densidade relativa aparente do carvão, que está relacionada ao seu estoque energético de carbono.

O elevado poder calorífico superior da leucena (4785 kcal/kg) está próximo aos valores encontrados por CHEN et al. (2015), 3580-4780 kcal/kg. Valores próximos foram encontrados por Hansted et al. (2016) (4442 kcal/kg). O resultado de poder calorífico superior para o eucalipto foi de 4790 kcal/kg, valores próximos ao relatado por Protásio (2020), que encontrou valores variando entre 4553-4703 kcal/kg. Elevado poder calorífico da matéria-prima, possivelmente, influenciará em elevado poder calorífico do carvão vegetal.

Para Brito e Barrichello (1982), a madeira geralmente deve apresentar um valor de voláteis entre 75% a 85%, portanto, o valor encontrado para ambas as espécies se encontram dentro do esperado. GARCÍA et al. (2013) apontam que quanto maior a razão entre o conteúdo de material volátil e carbono fixo, maior a reatividade do combustível, característica favorável ao processo.

Para o teor de carbono fixo, espera-se um faixa entre 15% e 25%, e os elevados valores encontrados para ambas as espécies são satisfatórios. Essa fração de carbono fixo no material lignocelulósico é desejável pois irá promover queima mais lenta do produto sólido, aumentando a eficiência (EROL; HAYKIRI-ACMA; KÜÇÜKBAYRAK, 2010; TODARO et al., 2015).

O teor de cinzas obtido para a espécie de leucena foi um resultado satisfatório, visto que Hansted et al. (2016) em sua caracterização encontrou um valor de 2,15%. Já, para o eucalipto, o teor de cinzas encontrado foi próximo à faixa estabelecida por PROTÁSIO (2016) para madeira de eucalipto, sendo relatado valores inferiores a 0,5%. As cinzas são caracterizadas por restos inorgânicos que não sofrem o processo de combustão (VARGAS-MORENO et al., 2012) e, por isso, não são desejáveis para finalidades energéticas. Além disso, segundo Khan et al. (2009), altos teores de cinzas reduzem o poder calorífico do material. Em razão do baixo teor de cinzas presentes na madeira de eucalipto e leucena,

possivelmente, o teor de cinzas presentes no carvão vegetal oriundos dessas madeiras serão baixos, características desejáveis para o processo de combustão.

Em relação à umidade, o baixo valor 3,81% obtido para a espécie leucena mostra-se favorável, visto que, dentre as vantagens, a baixa umidade evita a degradação do material por microrganismos durante o transporte. De acordo com CARVALHO (2004), a faixa encontrada para espécies florestais, em geral, é de 5% a 15%, em massa. Portanto, o valor encontrado para a espécie eucalipto está próximo ao valor recomendado.

5.2 Caracterização do carvão vegetal

Os resultados das propriedades químicas e energéticas obtidos a partir da caracterização dos carvões de leucena e eucalipto, estão demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades química e energética dos carvões vegetais.

| Propriedades | Carvão leucena | Carvão eucalipto |
|---|-----------------------|-------------------------|
| Umidade (%) | 2,80 (0,197) | 1,94 (0,481) |
| Teor de voláteis (%) | 8,34 (1,120) | 12,71 (0,439) |
| Teor de cinzas (%) | 3,55 (0,262) | 1,53 (0,418) |
| Carbono fixo (%) | 88,12 (1,317) | 85,76 (0,854) |
| PCS estimado (kcal/kg) | 5685 (29,76) | 5742 (31,56) |
| DRA (kg/m ³) | 345 (23) | 323 (11) |
| Densidade Energética (kcal/m ³) | 1961387 | 1854620 |
| Consumo Específico (m ³ /kg) | 0,42 | 0,49 |
| Eficiência Energética (%) | 36,43 | 34,80 |
| Rendimento Gravimétrico (%) | 30,66 | 29,30 |

Valor entre parênteses se refere ao desvio padrão

Fonte: Da autora (2022).

Em resumo, ambos os carvões vegetais apresentaram ótimas propriedades químicas e energéticas para o uso bioenergético.

A densidade relativa aparente do carvão de leucena foi de 345 kg/m³, por outro lado o carvão de eucalipto apresentou densidade relativa aparente de 323 kg/m³. Os valores encontrados nesse trabalho estão próximos das médias encontradas para carvão vegetal oriundo de madeira de leucena (390 kg/m³) (SILVA et al. 2018) e de eucalipto (363 kg/m³) (SILVA, 2019). A densidade do carvão vegetal é um aspecto diretamente relacionado com o

rendimento e produtividade do alto forno (BRITO, 1993), pois quanto maior a densidade do carvão, maior será a carga dentro do forno.

O poder calorífico superior do carvão de leucena foi de 5685 kcal/kg, enquanto que para o carvão de eucalipto foi obtido 5742 kcal/kg. A faixa ideal de poder calorífico superior para processamento no forno está entre 8930-9830 kcal/kg. Portanto, torna-se interessante substituir parcialmente o uso de coque, a partir de *blends* entre os carvões vegetais e o coque de petróleo, que possui elevado poder calorífico superior (10900 kcal/kg). Comparando os resultados com os encontrados por outros autores, SILVA et al. (2018) obtiveram 6977 kcal/kg para o carvão de leucena, enquanto que SILVA (2019) obteve em seu estudo, aproximadamente 7380 kcal/kg.

A faixa ideal de materiais voláteis para os combustíveis serem processados no forno está entre 10% e 45% (CSN, 2015). Portanto, o carvão derivado de eucalipto (12,71%) está dentro da faixa recomendada, por outro lado o carvão vegetal de leucena apresentou valores abaixo do recomendado (8,34%).

O valor apresentado neste estudo para os teores de carbono fixo são relevantes e favoráveis (88% para leucena e 86% para eucalipto), visto que a faixa de teor de carbono fixo do coque de petróleo se encontra entre 88-90%. Apresentar valores elevados para essa propriedade é favorável pois indica maior qualidade do combustível, maior estabilidade térmica e tempo de queima mais lenta do carvão, causando uma maior eficiência.

O teor de umidade do carvão derivado de leucena obtido foi de 2,80%. Já, a umidade obtida para carvão de eucalipto obtido foi de 1,94%, em conformidade com os valores encontrados por SILVA (2019) e Antal e Mok (1990), 1,70% e 2,20%, para espécies de eucalipto. Elevados valores em umidade dificultam a combustão do carvão, enquanto que baixo valor de umidade contribui para elevar o poder calorífico.

O teor de cinzas deve ser entre 1% a 3%, para ser considerado um material de boa performance. Portanto, os valores encontrados para o carvão de leucena (3,55%) e para o carvão de eucalipto (1,53%) estão próximos da faixa estabelecida. Elevado teor de cinzas podem ocasionar a redução da taxa de queima, além de incrustações e corrosão dos reatores, tornando os resultados obtidos favoráveis.

Em relação ao rendimento gravimétrico, foi obtido um valor de 30,66% para o carvão derivado de leucena e 29,3% para o carvão de eucalipto. Esses resultados são interessantes por dois principais fatores. Valores superiores a 30% são encontrados na literatura (ZANUNCIO et al., 2014; LOUREIRO et al., 2019) e desejados para o rendimento em carvão. Além disso, mesmo com a temperatura de pirólise alta (800°C), foram obtidos

rendimentos dentro do que, geralmente, é relatado para temperaturas mais brandas (~450°C). Conforme explicado por OLIVEIRA et al. (2010), o rendimento gravimétrico em carvão vegetal sofre influência da temperatura e do tempo de carbonização, sendo que maiores temperaturas empregadas resultam em menores rendimentos e maior teor de carbono fixo. MACHADO et al. (2014) encontraram valores para o rendimento de carvões de leucena entre 27% e 30%, em temperaturas de 400°C e 600°C. Já, para o eucalipto, SILVA (2019) utilizou temperaturas de carbonização entre 380°C e 480°C, obtendo valores de rendimentos entre 30% e 35%.

Os parâmetros de carbonização, a temperatura de 800°C e tempo de residência de 4 horas e, ainda, o processo de carbonização no sistema forno-fornalha, permitiram obter eficiência energética de 36,43% para a leucena e 34,80% para o eucalipto.

A densidade energética relaciona-se diretamente com a energia contida em um determinado volume de madeira. O valor observado para a densidade energética da leucena (1961387 kcal/m³) encontra-se próximo aos valores relatados por SILVA (2018) (2721030 kcal/m³). Enquanto que, para o carvão de eucalipto, foi obtido o valor de 1854620 kcal/m³.

Quanto maior o consumo específico de madeira (m³) para produzir uma tonelada de carvão, menos eficiente é o material genético. O consumo específico obtido para o carvão de leucena foi de 0,42 m³/kg e, para o carvão de eucalipto foi de 0,48 m³/kg. LOUREIRO (2021) encontrou para diferentes clones de eucalipto, uma média geral de 0,55 m³/kg.

5.3 Ganhos com o processo

O elevado poder calorífico dos carvões comprovaram as vantagens da transformação da madeira em carvão vegetal, como o aumento do poder calorífico do material. A Tabela 10 demonstra os ganhos energéticos com a transformação da madeira em carvão, por meio do processo de carbonização.

Tabela 10 – PCS da biomassa e carvão da Leucena e do Eucalipto

| | PCS biomassa (kcal/kg) | PCS carvão (kcal/kg) | TCF biomassa (%) | TCF carvão (%) |
|-----------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Leucena | 4785 | 5685 | 18,92 (0,218) | 88,12 (1,317) |
| Eucalipto | 4790 | 5742 | 20,86 (0,695) | 85,76 (0,854) |

Fonte: Da autora (2022).

Observa-se que com a conversão térmica da madeira em carvão o poder calorífico superior teve aumento percentual de 18,80%, para a leucena e de 19,87%, para o eucalipto. Para o teor de carbono fixo o aumento observado foi ainda maior; o teor de carbono fixo do carvão de leucena aumentou cerca de 371,64%, enquanto que o carvão de eucalipto teve o aumento percentual de 311,12%, em relação as respectivas matérias-primas. A partir desses resultados, pode-se afirmar que o processo foi eficaz no aumento energético do material.

Considerando a finalidade de substituição ao coque de petróleo em forno rotativo da indústria cimenteira, as biomassas estudadas apresentaram propriedades químicas e energéticas favoráveis para a sua utilização como matéria-prima para a produção de carvão.

5.4 Análise econômica

Os resultados obtidos para o poder calorífico relacionado a cada *blend* proposto, podem ser analisados abaixo, na Tabela 11.

Tabela 11 – Poder calorífico para os *blends* de coque de petróleo com carvão de eucalipto

| | 95% + 5% | 90% + 10% | 85% + 15% | 80% + 20% |
|---------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| PCS (kcal/kg) | 10648 | 10389 | 10131 | 9873 |

Fonte: Da autora (2022).

Baseando-se no consumo anual de combustíveis do ano de 2021, pode-se fazer uma estimativa da quantidade necessária de coque e carvão para cada cenário, conforme Tabela 12. Para a estimativa do consumo anual relativo de cada *blend* foram utilizadas as informações sobre o consumo anual de eucalipto, considerando o rendimento de carvão vegetal obtido nesse estudo (29,3%).

Tabela 12 – Estimativa do consumo anual relativo a cada *blend* de combustível com carvão de eucalipto.

| | 95% + 5% | 90% + 10% | 85% + 15% | 80% + 20% |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Consumo anual coque (t) | 232.971 | 220.710 | 208.448 | 196.186 |
| Consumo anual de carvão (t) | 12.262 | 24.523 | 36.784 | 49.046 |
| Consumo anual cavacos de eucalipto (t) | 41.849 | 83.697 | 125.546 | 167.395 |

Fonte: Da autora (2022).

Observa-se na Tabela 13 o gasto anual estimado, utilizando os preços/tonelada das matérias-primas no ano de 2021.

Tabela 13 – Estimativa do custo anual relativo a cada *blend* de combustível com carvão de eucalipto e o custo do cenário base

| | Cenário base | 95% + 5% | 90% + 10% | 85% + 15% | 80% + 20% |
|-------------------------|---------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Custo total anual (R\$) | 323.021.019,23 | 319.424.563,05 | 315.828.106,87 | 312.231.650,70 | 308.635.194,51 |

Fonte: Da autora (2022).

Do cenário mais conservador (95% + 5%) ao mais inovador (80%+20%), foi obtida uma redução de 3,38% no custo total anual.

Comparando ao cenário base em 2021, os custos com combustível foram minimizados respectivamente em 1,11%, 2,23%, 3,34% até 4,45%, reduzindo os gastos em aproximadamente R\$14.385.800,00 ao ano, no cenário de 80% coque de petróleo e 20% carvão de eucalipto.

Por fim, foi feita uma simulação da redução de emissão de CO₂ com a utilização do carvão de eucalipto, e podem ser observadas na Tabela 14 a seguir. Para a simulação de redução de emissões, no cenário base foram considerados somente o uso de coque, relativo ao total de combustíveis consumidos em 2021.

Tabela 14 – Emissão de CO₂ pela queima de combustíveis

| | Cenário base | 95% + 5% | 90% + 10% | 85% + 15% | 80% + 20% |
|--|---------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| CO ₂ específico por tonelada de cimento (kg CO ₂ /t cim eq.) | 637 | 625 | 613 | 601 | 589 |

Fonte: Da autora (2022).

Observa-se redução das emissões, obtendo uma redução de 7,53% no cenário mais inovador, 80% + 20%.

A Tabela 15 mostra o resultado da simulação do PCS do combustível entre coque de petróleo e carvão vegetal de leucena, apresentando valores compatíveis com o demandado para uso no forno, e próximos ao PCS do coque (10906 kcal/kg).

Tabela 15 – Estimativa do consumo anual relativo a cada *blend* de combustível com carvão de Leucena e PCS de cada *blend*

| | 98,5% + 1,5% | 98,2% + 1,8% | 98% + 2% |
|---|---------------------|---------------------|-----------------|
| Consumo anual coque (t) | 241.555 | 240.819 | 240.328 |
| Consumo anual Leucena (t) | 11.998 | 14.397 | 15.996 |
| Consumo anual Leucena (m ³) | 15.277 | 18.332 | 20.370 |
| PCS <i>blend</i> (kcal/kg) | 10828 | 10812 | 10801 |

Fonte: Da autora (2022).

Analisando o consumo anual de leucena em m³, nota-se que a utilização de 2% da biomassa ao ano ultrapassaria o volume disponível de floresta. Portanto, considerando a análise, o projeto viável seria utilizar 1,8% de carvão de leucena, reduzindo o consumo de coque e os gastos, devido à disponibilidade sem custos de compra de madeira.

Visto que, com a prática de manejo conduzido a matéria-prima estará disponível periodicamente para corte de 5 em 5 anos, foi pensado em um *blend* entre leucena, eucalipto e coque de petróleo. Esse cenário poderia ocorrer a cada 5 anos, utilizando 78% coque, 20% eucalipto e 2% leucena.

Os PCS calculados e os consumos são mostrados nas Tabelas 16. Já na Tabela 17, são mostrados os custos relativos.

Tabela 16 – Consumo anual e PCS relativos ao *blend* entre coque, eucalipto e leucena

| | 78% + 20% + 2% |
|------------------------------------|-----------------------|
| Consumo anual coque (t) | 191.281 |
| Consumo anual carvão Eucalipto (t) | 49.472 |
| Consumo anual cavaco Eucalipto (t) | 168.850 |
| Consumo anual carvão Leucena (t) | 4.478 |
| Consumo anual cavaco Leucena (t) | 14.606* |
| PCS <i>blend</i> (kcal/kg) | 9.769 |

*Referente a 18.600 m³ de cavaco de Leucena consumidos até o mês de outubro.

Tabela 17 – Custos anuais relativos ao *blend* entre coque, eucalipto e leucena

| | Custo (R\$) |
|-----------|--------------------|
| Coque | 251.956.395,00 |
| Eucalipto | 50.654.934,00 |
| Leucena | - |

| | |
|-------|----------------|
| Total | 302.611.329,08 |
|-------|----------------|

Sendo assim, essa proposta reduziria o consumo de coque em 22%, além de reduzir 6,32% do custo com compra de combustíveis – aproximadamente R\$20.400.000,00. Ainda, a utilização desse *blend* como combustível emitiria 585 kg CO₂/ton cim eq, alcançando uma redução de 8,16% em relação ao cenário base.

6 CONCLUSÃO

As espécies florestais, leucena e eucalipto, na região de estudo atenderam tanto em volume quanto perenidade, a demanda mensal e anual dos fornos, em torno de 20.000 e 245.000 toneladas de combustíveis, respectivamente.

Ambas biomassas florestais, apresentaram resultados satisfatórios para a produção de carvão com propriedades energéticas atraentes para o uso em indústrias cimenteiras, como elevado poder calorífico superior, alto teor de materiais voláteis, e baixo teor de cinzas.

O projeto desenvolvido para a carbonização, forno-fornalha, provou ser um sistema capaz de atingir consideráveis ganhos energéticos e em rendimento com a conversão da madeira em carvão. O rendimento dos carvões de leucena e eucalipto foram próximos de 30%, percentual usualmente alcançado em fornos convencionais. Os carvões apresentaram características favoráveis em relação ao teor de carbono fixo, próximos aos valores geralmente encontrados para o coque de petróleo.

A substituição parcial do coque de petróleo pelo carvão de leucena e eucalipto, provou ser uma ótima opção para a redução dos gastos anuais, sem a perda do potencial energético. Além disso, todos os *blends* avaliados atenderam as exigências mínimas de operação dos fornos.

Com base nas análises energéticas e econômicas, os melhores *blends* para cada espécie florestal foi o uso de 80% de coque de petróleo e 20% de carvão de eucalipto; e 98,2% de coque de petróleo e 1,8% de carvão de leucena.

O *blend* constituído por 78% de coque de petróleo, 20% de carvão de eucalipto e 2% de carvão de leucena, provou ser a melhor opção para a substituição parcial nos fornos das indústrias cimenteiras, pelo fato de atender a qualidade energética exigida para o uso industrial atreladas as suas vantagens econômicas e ambientais.

Para obter resultados mais consonantes com a realidade, uma análise de viabilidade econômica detalhada do projeto poderia ser feita, considerando fatores como projeto de instalação do forno para reação termoquímica e transporte de matéria-prima, ficando como sugestão para trabalhos futuros. Além disso, para melhoria do processo de carbonização e torná-lo ainda mais sustentável, uma sugestão é a implantação de um conector para reaproveitamento dos gases liberados pela chaminé, para aquecimento do próprio forno, secagem de lenha ou para produção de energia elétrica.

Finalmente, os resultados obtidos nesse trabalho foram satisfatórios, com todos os objetivos concluídos, desde a seleção da biomassa viável, à produção de carvão, até a análise de sua aplicação real, encontrando características do combustível factíveis a sua utilização em plantas de indústrias cimenteiras, reduzindo o consumo de derivados do petróleo, alcançando economia de receita e redução de emissão de gases poluentes na atmosfera.

7 REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Biomassa**. 2018. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acesso em: 15 set. 2021.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica**, 3ª ed. Parte II – **Fontes Renováveis**. 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 15 set. 2021.
- ANTAL JÚNIOR, M. J.; MOK, W. S. L. **Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass**. *Energy e Fuels*, Budapest, v.4, n.3, p.221-225, 1990.
- ANTAL JÚNIOR, M. J.; GRONLI, M. **The art, science, and technology of charcoal production**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Washington, v. 42, n. 8, p. 1619-1640, Mar. 2003.
- Assistência Técnica Petrobras. **Coque Verde de Petróleo: Informações Técnicas**, 2019. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciaticnica/public/downloads/Coque-Infomacoes-Tecnicas.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2021.
- ASTM. **D1762-84, Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**, ASTM, 2013.
- BAER FILHO, R. **Aspectos econômicos, ambientais e técnicos de três tecnologias para produção de carvão vegetal**. 2008. Monografia (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. Tese (Doutorado) apresentada a Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG. 2007.
- BOTREL, M. C. G. et al. **Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus**. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.
- Borges et al. **Mapeamento do Eucalipto no Estado de Minas Gerais Utilizando o Sensor Modis**. *Espaço Aberto*, PPGG - UFRJ, Rio de Janeiro, V. 8, N.1, p. 53-70, 2018.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- BRIDGWATER A.V.; MANIATIS, K. **The production of Biofuels by the Thermochemical Processing of Biomass**. Archer MD, Barber J. *Molecular to Global Photosynthesis*. IC Press, p.521-612, 2004.
- BRIDGWATER, A.V. **Review of fast pyrolysis of biomass and products upgrading**. *Biomass and Bioenergy*, v.38, p.68-94, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IPEF, 1993. 6 p. (Circular técnica, 181).
- BUENO, N; BEZERRA, F. **Processo de clinquerização CSN**. Companhia Siderúrgica Nacional – Arcos, MG, 2016.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. 150 p. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia.** Brasília, 2015.

CHAIB, J. G. **Produção de biochar por pirólise de resíduos verdes de um horto e avaliação do seu potencial no crescimento de lactuca sativa.** Dissertação (Mestrado em Energias Sustentáveis), Instituto Superior do Porto, 2019.

CHEN, D.; ZHOU, J.; ZHANG, Q. **Effects of heating rate on slow pyrolysis behavior, kinetic parameters and products properties of moso bamboo.** Bioresource Technology, v. 169, p. 313– 319, out. 2014.

CREAMER, A. E.; GAO, B.; ZHANG, M. **Carbon dioxide capture using biochar produced from sugarcane bagasse and hickory wood.** Chemical Engineering Journal, v. 249, p. 174– 179, ago. 2014.

COLLARD, F.-X.; BLIN, J. **A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 38, p. 594–608, out. 2014.

CONAMA, **Resolução nº 491 de 19 de novembro de 2018.** Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603> Acesso em: 14 set. 2021.

Confederação Nacional da Indústria, Associação Brasileira de Cimento Portland, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento** – Brasília: CNI, 2017.

CORTEZ, L. A. B.; GOMEZ, E. O.; LORA, E. E. S. **Biomassa para Energia.** 1. ed. Campinas: UNICAMP, 2008.

COSTA, L.J. **Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones de Corymbia.** 2016. 90p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras. Programa de PósGraduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Lavras, MG. 2016.

DEMIRBAS, A.; ARIN, G. **An overview of biomass pyrolysis.** Energy Sources, v. 24, p. 471- 482, 2002.

DRUMOND, M. A.; RIBASKI, J. **Leucena (Leucaena leucocephala): leguminosa de uso múltiplo para o semiárido brasileiro.** Comunicado Técnico, Petrolina, n. 142, p. 1-8, 2010

ECYCLE. **Como ocorre o processo de produção do cimento e quais são seus impactos ambientais?** Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/como-ocorre-o-processo-de-producao-do-cimento-e-quais-sao-seus-impactos-ambientais/>> Acesso em: 07 set. 2021.

Penteado, Joel - Embrapa. **Perguntas e Respostas**, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 19/11/2021.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020** – Rio de Janeiro: EPE, 2021.

Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 16 set. 2021.

Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020.

Empresa de Pesquisa Energética, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, Agência Internacional de Energia. **Atlas da Eficiência Energética: Relatório de Indicadores 2020**. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf>. Acesso em: 06 set. 2021.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S. **Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data**. *Renewable Energy*, v. 35, n. 1, p. 170–173, jan. 2010.

FAULLER, H. **ICA implanta sistema de fornos-fornalha de produção sustentável de carvão vegetal**. 2019. Disponível em: < <https://www.ica.ufmg.br/?noticias=ica-implanta-sistema-de-fornos-fornalha-de-producao-sustentavel-de-carvao-vegetal>>. Acesso em: 01 out. 2021.

FISHER, T. et al. **Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 62, n. 2, p. 331–349, fev. 2002.

FERREIRA, N. DE L. **Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo**. 2014. 121p. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

FRANCO, A. A.; SOUTO, S. M. **Leucaena leucocephala – uma leguminosa com múltiplas utilidades para os trópicos**. *Comunicado Técnico*, Brasília, n. 2, p. 1-7, 1986.

FRANCESCONI, L. **O Estado e o papel estratégico da indústria do cimento no Brasil**. 1996. 153f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

GLAUCIO, R. O. **Análise da cadeia de suprimentos do coque de petróleo na indústria cimenteira brasileira**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Global Cement and Concrete Association. **Concrete Future – The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete**. Disponível em: < <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>> Acesso em 20 de set. 2021.

Global Cement and Concrete Association. **Internet Manual**. Disponível em <<https://www.cement-co2-protocol.org/en/>> Acesso em 22 de set. 2021.

Globo Rural. **Sistema de fornos permite a produção de carvão vegetal de maneira sustentável**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/globo-rural/noticia/2021/10/03/sistema-de-fornos-permite-a-producao-de-carvao-vegetal-de-maneira-sustentavel.ghtml>> Acesso em 30 de nov. 2021.

GRANDE, J. P; **Dimensões de cavacos industriais de eucalipto e relações com polpação, resistência e morfologia de fibras na polpa**. Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura: 2019**, v.34, p. 8. Rio de Janeiro: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2019_v34_informativo.pdf>. Acesso em: 23 set. 2021.

INSTITUTO HÓRUS – Instituto Hórus de Desenvolvimento e Conservação Ambiental, Florianópolis – SC. **Base de dados de espécies exóticas invasoras do Brasil**. Disponível em: <http://bd.institutohorus.org.br/www..> Acesso em: 26 set. 2021.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico**. 2014, 58p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2014.

ISLAM, M. A. et al. **A thermogravimetric analysis of the combustion kinetics of karanja (Pongamia pinnata) fruit hulls char**. Bioresource Technology, v. 200, p. 335–341, jan. 2016.

KIHARA, Y.; VISEDO G. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). 23 maio 2014. Disponível em: <<https://abcp.org.br/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil/>>. Acesso em: 06 set. 2021

KIMURA, L. M. **Uma contribuição à pirólise de biomassa: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa**. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

LEÃO, T.C.C.; ALMEIDA, W. R. de; DECHOUM, M. de S.; ZILLER, S.R. **Espécies exóticas invasoras no nordeste do Brasil: contextualização, manejo e políticas públicas**. CEPAN e Instituto Hórus. 2011. 99p.

LENG, E. et al. **In situ structural changes of crystalline and amorphous cellulose during slow pyrolysis at low temperatures**. Fuel, v. 216, p. 313–321, mar. 2018.

LIMA, Q. F. **Homogeneização da farinha: estudo de caso na indústria de cimento Mizu-Barauna/RN**. Universidade Federal Rural do Semi-árido. Mossoró, 2018.

LIMA, E.A.; SILVA, H. D.; MAGALHÃES, W. L. E.; LAVORANTI, O. J. **Caracterização individual de árvores de Eucalyptus benthamii para uso energético**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa, Colombo, n. 35, 2007. 26 p.

LIU, N. et al. **Characterization of biochars derived from agriculture wastes and their adsorptive removal of atrazine from aqueous solution: A comparative study.** *Bioresource Technology*, v. 198, p. 55–62, dez. 2015.

LUENGO, C.A.; FELFFI, F.E.F.; BEZZON, G. **Pirólise e Torrefação de Biomassa.** Biomassa para Energia. Organização: Luis Augusto Barbosa Cortez – Campinas/SP: ed. UNICAMP, 2008.

Lucy, R. **Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba.** BBC, 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em: 08 set. 2021.

MARTINS, H. **Madeira como fonte de energia.** In: PENEDO, W. R. (Ed.). *Uso da madeira para fins energéticos.* Belo Horizonte: CETEC, v. 1, p. 9-26, 1980.

MATOS, M.; RIOS, C. A. **Reatividade do carvão vegetal.** In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Produção e utilização de carvão vegetal.* Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 91-112.

MEZERETTE, C.; VERGNET, L.F. **La voie thermochimique,** In: *Guide Biomasse Energie,* 1a edição, l'IEPF, Canadá, p. 144-200, 1994.

MINETTE, L. J.; PIMENTA, A. S.; FARIA, M. M.; SOUZA, A. P.; SILVIA E. P.; FIEDLER, N. C. **Avaliação da carga de trabalho físico e análise biomecânica de trabalhadores da carbonização em fornos tipo “rabo-quente”.** 2007. *Revista Árvore,* Viçosa-MG, v.31, n.5, p.853-858, 2007.

MORALI, U.; YAVUZEL, N.; ŞENSÖZ, S. **Pyrolysis of hornbeam (Carpinus betulus L.) sawdust: Characterization of bio-oil and bio-char.** *Bioresource Technology*, v. 221, p. 682– 685, dez. 2016.

MOTOYAMA, S. **Tecnologia e industrialização no Brasil: uma perspectiva histórica.** São Paulo: Unesp/Ceeteps, 1994.

Moutinho V. P. H. et al. **Characterization and statistical correlation between charcoal's physical and mechanical properties of eucalyptus and corymbia clone.** *Ciência Florestal,* Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 1095-1103, jul.-set., 2017.

NEVES, F. **Combustão.** Companhia Siderúrgica Nacional – Arcos, MG, 2016.

NILMARA, C. - AgroPós. **Eucalipto no Brasil.** Disponível em: <https://agropos.com.br/eucalipto-no-brasil/>. Acesso em: 19/11/2021.

OLIVEIRA, A. F.; BAVARESCO, A.; PESSUTI, C. A. A.; MIYASHIRO, C. S.; FRANK, J. **Análise da Qualidade do Carvão para Consumo Doméstico de Quatro Municípios do Estado do Paraná.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis,* v.4, p. 102-111, 2015.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell.** *Scientia Forestalis,* Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

- OLIVEIRA, A.C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 74p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- PAULA, L. G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Coprocessamento de Misturas de Resíduos**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Itajubá, MG.
- Penna, P. C. **Sustentabilidade e inovação: questão de competitividade**. ABCP, 2021. Disponível em: <<https://abcp.org.br/sustentabilidade-e-inovacao-questao-de-competitividade/>>. Acesso em: 14 set. 2021.
- PEREIRA et al. **Influence of chemical composition of eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties**. *Bioresource Technology*, Essex, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. da C.; YOSHIDA, M. I. **Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus spp**. *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.
- ROSAS, J. G. et al. **Assessment of sustainable biochar production for carbon abatement from vineyard residues**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 113, p. 239–247, maio 2015.
- RAMOS, M. D. **Estudo da formação e emissão de poluentes na atmosfera originários do coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento**. 2015. 125 p. Tese de Doutorado (Pós Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá-Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2015.
- SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 159p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Lavras: UFLA, 2010.
- SANTOS, S. F. O. M. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. Tese (Doutorado em Ensino de Ciência e Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.
- ŞENSÖZ, S.; ANGIN, D. **Pyrolysis of safflower (*Charthamus tinctorius* L.) seed press cake: Part 1. The effects of pyrolysis parameters on the product yields**. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 13, p. 5492–5497, set. 2008.
- SIGNORETTI, V.T. **Controle das emissões de NOx, SOx e metais pesados quando se utilizam combustíveis alternativos e de alto teor de enxofre na indústria de cimento**. 2008. 105p. Tese de Doutorado – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- SILVA, R. J. da; SIGNORETTI, V. T. **Formação de NOx em fornos rotativos de produção de clínquer da indústria do cimento**. Itajubá, 12 p, dez. 2006.
- SILVA, R. J. (1991), “**O Processo de Combustão em Fornos Rotativos**”, ABCM, São Paulo, Dezembro, pp 89-92.

SILVA, H. L. L. et al. **Características Dendrométricas, Físicas e Químicas da Myracrodruon urundeuva e da Leucaena leucocephala.** Floresta e Ambiente, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

SILVA, L; OLIVERA, E; CALEGARI, L; PIMENTA, M; PIMENTA, A; DANTAS, M. **Características energéticas do carvão vegetal de aroeira (Myracrodruon urundeuva Allemão) e leucena (Leucaena leucocephala (Lam.) R. de Wit.** *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 412-419, jan.- mar., 2018

SILVA, F. T. M; **Valorização da madeira Eucalyptus sp. via pirólise [recurso eletrônico]: caracterização e rendimentos dos produtos.** Tese (Doutorado) Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.** São Paulo, 2019, 44 p. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf>. Acesso em: 06 set. 2021.

SIQUEIRA, T. C. A.; SILVA, I. Z.; RUBIO, A. J.; BERGAMASCO, R.; GASPAROTTO, F.; PACCOLA, E. A. S.; YAMAGUCHI, N. U. **Sugarcane Bagasse as an Efficient Biosorbent for Methylene Blue Removal: Kinetics, Isotherms and Thermodynamics.** *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 526, p. 1-13, 2020.

SMETS, K.; SCHREURS, S.; CARLEER, R.; YPERMAN, J. **Valorization of raspberry seed cake by flash and slow pyrolysis: Product yield and characterization of the liquid and solid fraction.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 107, p. 289–297, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.03.014>

SNIC. **Dados do setor**, 2021. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

SNIF - Serviço Nacional de Informações Florestais. **Boletim SNIF**, 1ª ed. Brasília: 2020. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim_SNIF_ed1_2020_vfinal.pdf. Acesso em: 16 set. 2021.

SYRED, C.; GRIFFITHS, A.J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. **A clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP).** *Fuel*, v.85, p.1566-1578, 2006.

TODARO, L. et al. **Thermal treatment modifies the calorific value and ash content in some wood species.** *Fuel*, v. 140, p. 1–3, jan. 2015.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. **Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 55, p. 467–481, mar. 2016.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. **Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (Himenea courbaril L.).** *Scientia Agraria*, Curitiba, v. 2, n. ½, p.45 – 53, 2001.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses.** 2. ed. Lavras, 2016.

VILELA, E.; PEDREIRA, J.V.S. **Efeitos de Densidades de Semeadura e Níveis de Adubação Nitrogenada no Estabelecimento de *Leucaena leucocephala* Lam. de Wit.** Boletim Indústria Animal, Nova Odessa – SP. 1976.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050.** Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p.

YUAN, X. et al. **Cattle manure pyrolysis process: Kinetic and thermodynamic analysis with isoconversional methods.** Renewable Energy, v. 107, p. 489–496, jul. 2017.