



## **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ESTOCAGEM NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE CARVÃO VEGETAL E COQUE DE PETRÓLEO**

CLÁUDIO S. G. JÚNIOR, MARIANA S. COELHO e JÉSSIKA M. SANTOS

Universidade Federal de São João del Rei, Departamento de Engenharia Química  
Campus Alto do Paraopeba – UFSJ/DEQUI/CAP

\*e-mail: itclaudiio@gmail.com; marianasclh@gmail.com; jessikasantos@ufs.edu.br

**RESUMO** - O carvão vegetal e o coque de petróleo são produtos que possuem uma poderosa matriz energética e por esse motivo são utilizados como combustíveis em indústrias que trabalham com fornos para obtenção de produtos de maior valor agregado, tais como cimenteiras e siderúrgicas. Ambos os combustíveis são compostos basicamente de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, cloretos e oxigênio. As condições de armazenagem desses materiais podem ter influência em sua performance quando utilizados como fonte de energia. Este trabalho teve como objetivo estudar a variação das propriedades físico-químicas do carvão vegetal e do coque de petróleo na estocagem, afim de avaliar a interferência do tempo e do modo de estocagem em seus parâmetros de qualidade. Para tal, foram avaliados o comportamento do poder calorífico e da composição química de ambos os combustíveis ao longo de 75 dias de estocagem a céu aberto. Os resultados mostraram que houve redução do poder calorífico e do teor de cinzas devido aos efeitos oxidativos sofridos por esses materiais. Além disso, as análises mostraram que o coque de petróleo apresentou maior perda do seu poder de queima e um maior acúmulo de matéria inorgânica quando comparado ao carvão vegetal.

### **INTRODUÇÃO**

O coque de petróleo (CP) é composto principalmente por carbono, formado a partir da decomposição térmica e polimerização dos hidrocarbonetos presentes no petróleo (MÉNDEZ, 2005). Quando utilizado como combustível sólido, o coque de petróleo é muito empregado em indústrias cimenteiras, siderúrgicas, produtoras de cal e de cerâmica. Por sua alta capacidade de combustão associada a um baixo teor de cinzas, esse componente demonstra ótima capacidade energética já que sua combustão gera baixo teor de resíduos (GAUTO, 2011).

O coque de petróleo é o combustível derivado de petróleo que oferece o menor custo dentre os combustíveis fosseis e minerais que podem ser utilizados para aquecer os fornos de clinquerização da indústria de cimento

(ROLAND, 2016). Entretanto, por ser tratar de um combustível não renovável, o setor tem promovido o uso de combustíveis renováveis e menos poluidores como é o caso do carvão vegetal.

O carvão vegetal (CV), produto da carbonização da madeira, é definido como sendo um material poroso, de fácil combustão e capaz de gerar grandes quantidades de calor, aproximadamente 6800 kcal/kg (BARCELLOS et al., 2004).

As propriedades do combustível utilizado, seja ele coque de petróleo ou carvão vegetal, exercem forte influência na produtividade do forno rotativo de clinquerização ao qual ele é inserido. Teores de matérias voláteis, carbono fixo, teor de cinzas, poder calorífico e teor de umidade são alguns exemplos de propriedades físico-químicas que devem ser quantificadas para garantir uma boa

eficiência energética na etapa de queima (BRITO, 1993).

Uma grande preocupação em relação à aos combustíveis sólidos é a perda de qualidade deles em razão do tempo e tipo de armazenamento. Apesar da armazenagem desses combustíveis ser, geralmente, realizada em galpões cobertos ou em silos fechados que visam a segurança do produto quando se trata de contaminações e controle de riscos ambientais, nem todas as indústrias conseguem manter um rígido controle da qualidade sobre a estocagem, o que poderá interferir nas propriedades do combustível.

Em relação ao teor de umidade superficial do combustível sólido, este deve ser o menor possível, uma vez que a água presente será eliminada na forma de vapor. Como consequência do aumento da umidade, tem-se a perda de intensidade de combustão e o aumento no consumo de combustível, o que impacta diretamente na eficiência e na produtividade do processo (BRITO, 1993).

No que se refere ao poder calorífico, há dois tipos: poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS). O PCI não inclui o calor latente do vapor d'água em seu valor. Se as análises incluírem esse calor latente, referem-se ao PCS. Tanto o carvão vegetal quanto o coque de petróleo quando estocados tendem a sofrer oxidação ao ficarem expostos ao ar livre. A reação ocorre entre o carbono e o oxigênio, caracterizando degradação e perdas no poder calorífico (ASSIS, 2008).

Um elevado valor de carbono fixo implica em uma menor presença de materiais voláteis, o que gera uma queima mais lenta e o aumento do índice de combustão (ASSIS, 2008).

Os materiais voláteis são compostos principalmente por CO<sub>2</sub>, CO e hidrogênio, enquanto que o teor de cinzas presente no material está relacionado a todos os resíduos dos óxidos minerais após a combustão completa do carvão. Já o teor de carbono fixo é responsável pela formação do aglomerado estático, além de ser o principal indicador de qualidade do carvão vegetal (SÉYE, 1998).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do tempo e do modo de armazenagem nas propriedades físico-

químicas do carvão vegetal e do coque de petróleo utilizados como combustíveis sólidos. Para tal, foram conduzidas análises químicas (poder calorífico, análise imediata e fluorescência de RX) de amostras de ambos os combustíveis ao longo do tempo de estocagem.

## MATERIAL E MÉTODOS

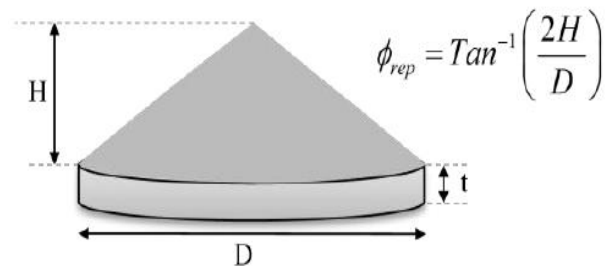
Este estudo foi realizado em parceria com uma empresa cimenteira localizada no estado de Minas Gerais que utiliza tanto coque de petróleo como carvão vegetal em seus fornos rotativos para clínquerização.

Inicialmente os materiais foram recebidos pela empresa e dispostos em pilhas a céu aberto em seu próprio pátio. Para determinação das dimensões das pilhas foram necessários cálculos referentes ao ângulo de repouso e densidade para ambos os materiais.

Após proceder com a estocagem dos combustíveis em pilhas a céu aberto, foi realizado um conjunto de análises com o objetivo de avaliar o efeito do tempo de estocagem em suas propriedades físico-químicas. Foram avaliados o comportamento dos teores de umidade, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, enxofre e também do poder calorífico dos combustíveis ao longo de 75 dias de estocagem.

### Ângulo de repouso ( $\phi_{rep}$ )

O ângulo de repouso de uma pilha refere-se a máxima inclinação a que o material pode estar depositado sem que ocorram deslizamentos. Na Figura 1 é retratado o cálculo para determinação do ângulo de repouso de acordo com Guzmán, 2008.



**Figura 1:** Cálculo do ângulo de repouso (GUZMÁN, 2008).

Para determinação do ângulo de repouso foi utilizado o aparato experimental

representado pela Figura 2. Tal aparato possibilita o controle manual da quantidade de material necessária para formar uma pilha sobre uma placa metálica de 17,5 cm de diâmetro. Tal placa está acoplada a um cilindro, e o aparato possui também uma régua para medição da altura da pilha.



**Figura 2:** Aparato experimental para determinação de ângulo de repouso.

Com o sistema nivelado, depositou-se continuamente material sobre a placa enquanto eram realizadas medidas da altura do material depositado de forma contínua até a estabilidade. Posteriormente, com os dados de diâmetro e altura, o ângulo de repouso pôde ser calculado de acordo com a equação presente na Figura 1.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Definição do ângulo de repouso.

| Material | Altura (cm) | Ângulo de repouso (°) |
|----------|-------------|-----------------------|
| CP       | 8,0         | 42,4                  |
| CV       | 10,5        | 50,2                  |

#### ▪ Separação das Pilhas

Após o cálculo do ângulo de repouso, definiu-se que a altura máxima das pilhas a serem armazenadas no pátio a céu aberto seria de 5 metros. A partir daí foram determinadas as massas, tanto de carvão vegetal como de coque de petróleo, que seriam depositadas em cada pilha, como mostrado na Tabela 2. Salienta-se que para esse cálculo foram utilizados os valores referentes a densidade dos materiais e

porosidade obtidos em laboratório através da técnica de Picnometria.

**Tabela 2:** Densidades e massas obtidas para formação das pilhas.

| Material | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Massa (t) |
|----------|--------------------------------|-----------|
| CP       | 686,6                          | 107,5     |
| CV       | 396,3                          | 36,0      |

Após tais definições e com o auxílio de uma pá carregadeira, os materiais foram dispostos em pilhas em formato cônico no pátio de estocagem da empresa.

#### Amostragem

Com o intuito de avaliar se, além do tempo, a posição dos sólidos na pilha influencia como suas propriedades podem ser alteradas ao longo do período de estocagem, foram retiradas amostras de material de 3 diferentes posições: superfície, centro e topo da pilha, como mostrado na Figura 3.



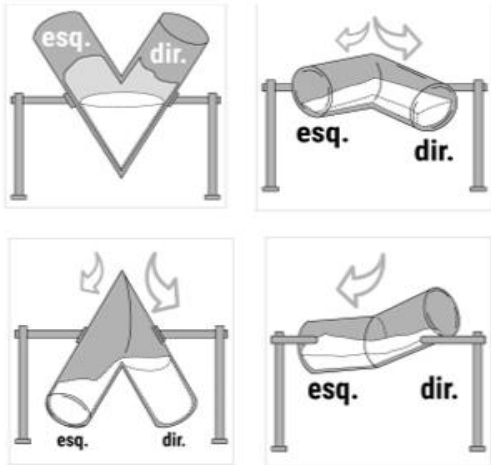
**Figura 3:** Esboço dos pontos de amostragem (topo, centro e superfície).

As retiradas de material ocorreram em uma periodicidade de 15 em 15 dias, sendo retiradas 3 amostras de cada região por vez. Os materiais coletados foram submetidos a homogeneização e posterior análises físico-químicas.

#### Homogeneização

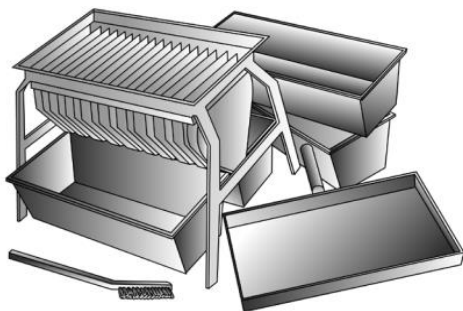
Para promover a homogeneização das 3 amostras referentes a uma mesma região da pilha, isto é, superfície, centro e topo, foi

utilizado um homogeneizador em V modelo MOTION V-100. Os homogeneizadores em V giram de maneira repetida e aleatória, sob um eixo horizontal, levando as partículas a se movimentarem de forma aleatória no interior dos cilindros. Ao eliminar pontos cegos, os materiais se misturam por completo, garantindo-se assim uma total homogeneização das amostras. O movimento realizado pelo homogeneizador é apresentado na Figura 4.



**Figura 4:** Esboço do funcionamento do Homogeneizador V-100.

Após a etapa de homogeneização, foi necessário realizar a redução das amostras, de modo a mantê-las representativas. Para isso, foram utilizados quarteadores do tipo Jones NETLAB+TV Modelo 16 planos separados por 13 mm conforme ilustrado na Figura 5.



**Figura 5:** Esboço de um Quarteador do tipo Jones.

Esse equipamento é constituído por uma série de calhas inclinadas, ora para um lado ora para o outro. Quanto maior o número de calhas mais confiáveis são as amostras obtidas. As calhas devem ser de aço inoxidável, com uma

inclinação  $> 45^\circ$  e não devem possuir ângulos vivos. O número de calhas deve ser par e todas devem ter a mesma largura, maior que  $2d + 5$  mm ( $d$ =diâmetro da maior partícula) (LUZ, 1982).

### Teor de Umidade Superficial

A umidade superficial dos materiais em estudo foi determinada seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 8389/1984. Pesou-se 10 g de cada amostra submetida a análise e estas foram colocadas em recipientes de porcelana que posteriormente foram submetidos a uma etapa de secagem em estufa sem circulação de ar e temperatura controlada em aproximadamente  $105^\circ\text{C}$ , durante 30 minutos.

Foi utilizada uma estufa de secagem QUIMIS Modelo Q317B12 para determinação do teor de umidade, em base úmida, das amostras. Após a desidratação do material na estufa, retirou-se os recipientes de porcelana do equipamento e esperou que esfriasse em dessecador por aproximadamente 15 minutos. A determinação do teor de umidade se deu por meio da Equação (1).

$$U (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U: umidade em %.

$m_1$ : massa do recipiente + massa da amostra antes da secagem (g).

$m_2$ : massa do recipiente + massa da amostra desidratada em estufa (g).

$m$ : massa da amostra úmida (g).

### Moagem

Após passar pelas etapas de quarteamento e secagem, os materiais foram sujeitos à pulverização em moinho de painelas. Para tal, utilizou-se um moinho vibratório modelo Herzog e uma painela de carbeto de tungstênio para pré-moer as 3 amostras. Das 20 g de cada material, 14 g foram pré-moídas no tempo de 60 segundos, identificadas e reservadas para análise do poder calorífico superior e inferior, materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas. As 6 g restantes foram pré-moídas juntamente com um comprimido de

ácido acetil salicílico por 120 segundos. Ao final da moagem, estas amostras foram prensadas em uma prensa hidráulica a fim de obter pastilhas para análise via Fluorescência de Raios X.

### Poder Calorífico

O poder calorífico superior do carvão vegetal e do coque de petróleo foi determinado de acordo com a norma ABNT NBR 11956 utilizando uma bomba calorimétrica adiabática do calorímetro modelo IKA C-200. Os cálculos foram efetuados automaticamente pelo calorímetro, após a introdução dos dados de massa da amostra (g). O poder calorífico inferior do material analisado também foi calculado pelo equipamento, após a estimativa do percentual de hidrogênio na amostra.

### Teor de Cinzas

A determinação do teor de cinzas presente nas amostras de carvão vegetal e coque de petróleo foram realizadas de acordo com a norma ABNT NBR 9092 utilizando um forno mufla modelo QUIMIS Q318S25T à temperatura de 950 °C. Os cálculos dos percentuais dos teores de cinzas presentes nos materiais foram realizados usando a Equação (2).

$$\%Cinzas = \frac{(P_1 - P_2)}{m} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$m$ : massa tomada para o ensaio (g)

$P_1$ : massa da amostra + massa do cadinho tarado em g.

$P_2$ : massa do cadinho + massa da amostra após a etapa de calcinação em Mufla a 950°C, em g.

### Teor de Materiais Voláteis

Para determinação do teor de voláteis das amostras, foi considerada a norma NBR MB 1942.

Para este procedimento, pesou-se 1 g do material pré-moído em um cadinho de platina calcinado e anotou-se a tara (cadinho + material) que foi nomeada de  $P_1$ . Em seguida, o cadinho tampado foi transferido para uma mufla a uma temperatura de 950°C, mantendo a

porta aberta durante 2 minutos. Após este tempo, fechou-se a porta e aguardou-se por mais 5 minutos para retirada. Ao retirar o cadinho esperou-se o resfriamento em dessecador para posteriormente realizar a pesagem,  $P_2$ . Os cálculos para a porcentagem de materiais voláteis presentes nas amostras foram realizados a partir da Equação 3.

$$Materiais\ Voláteis = (P_1 - P_2) \times 100 \quad (3)$$

### Teor de Carbono Fixo

Para a determinação do teor de carbono fixo foi utilizada a norma ABNT NBR 9102.

Este procedimento ocorre na sequência do procedimento para determinação de materiais voláteis. Após realizar a pesagem  $P_2$ , retornou-se o cadinho para mufla até a completa eliminação do carbono, que pode ser analisada visualmente após o desaparecimento da cor escura característica do coque e do carvão.

Novamente, ao retirar o cadinho esperou-se o resfriamento no dessecador para posteriormente realizar a pesagem,  $P_3$ . A determinação do teor de carbono fixo se deu pela Equação 4.

$$Carbono\ Fixo = (P_2 - P_3) \times 100 \quad (4)$$

### Teor de Enxofre

Uma das maiores limitações ao uso do coque de petróleo é devido ao seu teor de enxofre e consequente liberação de SOx na atmosfera a partir da queima.

A indústria cimenteira possui uma peculiaridade de seu processo ser termodinamicamente favorável a absorção do enxofre presente no coque em seus produtos sem perda de qualidade. Mas como esse estudo tem um objetivo maior de avaliar a perda de qualidade de combustíveis estocados a céu aberto, sendo estes destinados a indústria cimenteira ou não, avaliou-se também o comportamento do teor de enxofre presente nos combustíveis ao longo do tempo de estocagem a partir da técnica de espectrometria de Fluorescência de Raios X.

As pastilhas preparadas a partir das amostras de carvão vegetal e de coque de

petróleo foram analisadas em um espectrômetro de fluorescência de Raios X modelo Zetium Cement edition da Malvern Panalitical.

Foi utilizado o software XRF Analyzer Pro para aplicação dos métodos analíticos para a análise dos elementos presentes nas amostras.

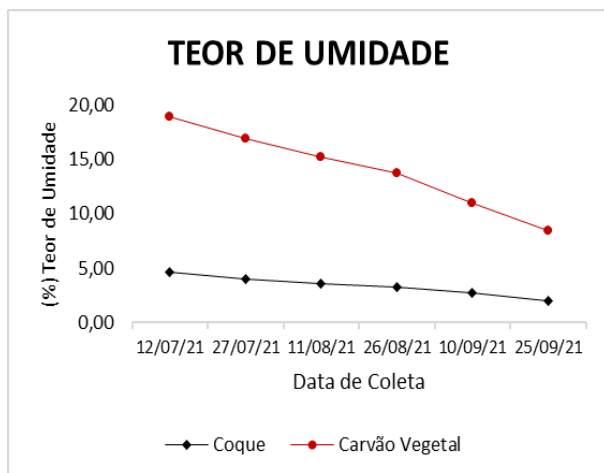
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Teor de Umidade Superficial

O teor de umidade presente nos combustíveis sólidos está diretamente relacionado com a eficiência energética da combustão. O aumento da umidade, faz com que o próprio combustível consuma parte do calor do meio para liberação da umidade na forma de vapor, o que, consequentemente, causa menor eficiência energética.

A Figura 6 traz os resultados referentes ao comportamento do teor médio de umidade da pilha de coque e da pilha de carvão vegetal em função do tempo de estocagem.

Ao analisar os resultados obtidos, nota-se que houve uma queda nos teores de umidade ao longo do período de análise, e este fato está relacionado às condições climáticas do período que promoveram a secagem natural dos materiais dispostos no pátio.



**Figura 6:** Comportamento do teor médio de umidade dos combustíveis em função do tempo de estocagem

Já ao observar os resultados apresentados na Tabela 3, é possível verificar como se deu essa diminuição em função da

localização dos materiais na pilha. Nota-se que a região topo apresentou os menores teores de umidade por estar mais exposta ao sol que os demais pontos.

**Tabela 3:** Resultados da análise de Umidade em cada ponto.

| Data     | Superfície |      | Centro |      | Topo |      |
|----------|------------|------|--------|------|------|------|
|          | CP         | CV   | CP     | CV   | CP   | CV   |
| 12/07/21 | 4,8        | 18,9 | 4,9    | 19,2 | 4,1  | 18,7 |
| 27/07/21 | 4,0        | 16,7 | 4,3    | 17,9 | 3,8  | 16,1 |
| 11/08/21 | 3,3        | 15,3 | 4,2    | 15,0 | 3,4  | 15,2 |
| 26/08/21 | 3,1        | 13,9 | 4,1    | 12,9 | 2,8  | 14,4 |
| 10/09/21 | 2,7        | 9,0  | 3,2    | 11,1 | 2,3  | 13,0 |
| 25/09/21 | 2,1        | 8,2  | 2,8    | 9,2  | 1,2  | 7,9  |

### Teor de Cinzas

O comportamento médio do teor de cinzas presente nos materiais estudados é mostrado na Figura 7. Tais resultados se referem a média das repostas obtidas ao se analisar as amostras referentes ao topo, centro e superfície das pilhas de carvão e de coque.



**Figura 7:** Comportamento do teor de cinzas em função do tempo de estocagem

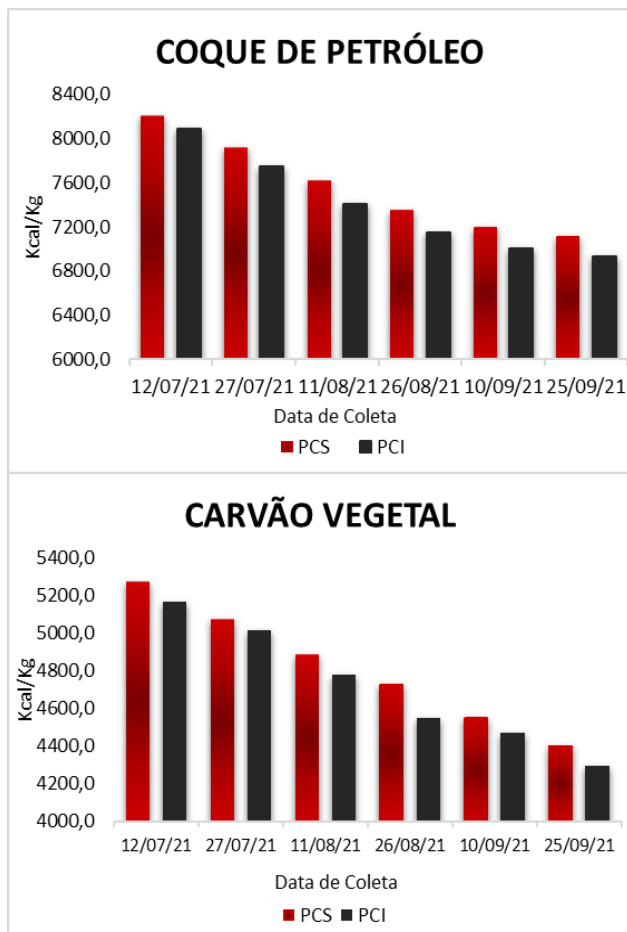
Observando os resultados mostrados na Figura 7 nota-se o aumento do teor médio de cinzas presente em ambos os materiais. Para o coque de petróleo houve um aumento de aproximadamente 35% a cada amostragem e para o carvão vegetal um aumento médio de 13%. Os valores obtidos mostram que o tempo em que as pilhas ficaram armazenadas a céu aberto desencadeou a concentração do teor de



cinzas presente nas amostras. Esse aumento pode ser resultado de processos oxidativos dos materiais e também de substâncias estranhas provenientes do próprio ambiente em que o produto ficou armazenado.

### Poder Calorífico

Já os resultados referentes ao comportamento do poder calorífico superior (PCS) e do poder calorífico inferior (PCI) de cada material são mostrados na Figura 8, na qual é possível observar que ambos os combustíveis perderam poder de queima ao longo do tempo de estocagem. Para o coque de petróleo houve uma perda de aproximadamente 15,6% durante os testes e para o carvão vegetal 18,8%.



**Figura 8:** Comportamento do Poder Calorífico dos combustíveis em função do tempo de estocagem.

A diminuição dos valores de PCS e o PCI estão diretamente ligados ao processo de oxidação que os materiais sofreram durante seu

tempo de estocagem, observados na Figura 7. Entrada de correntes de ar nas pilhas juntamente com a ação de fatores climáticos contribuíram para que o poder de queima desses combustíveis diminuísse.

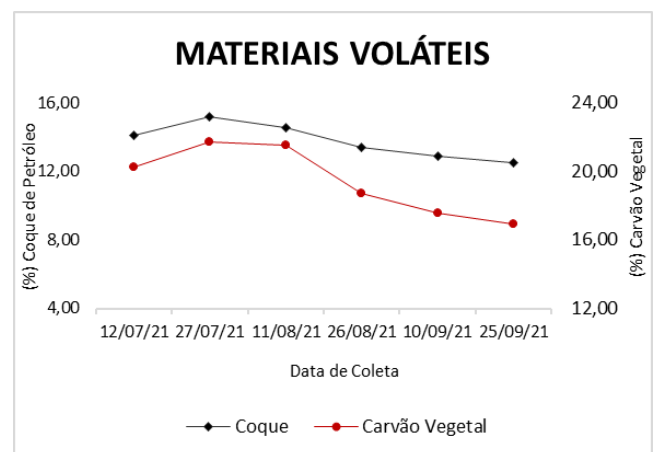
### Teor de Materiais Voláteis

A partir desta análise é possível identificar a quantidade de material volátil liberado a partir de uma amostra de carvão e de coque quando submetidos ao aquecimento. Em resumo, quanto maior o teor de voláteis, maior será a facilidade de ignição.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nas análises das amostras por região da pilha, isto é, superfície, centro e topo. Já a Figura 9 apresenta o comportamento médio observado para cada pilha de material.

**Tabela 4:** Teor de Materiais Voláteis por posição em função do tempo de estocagem.

| Data     | Superfície |      | Centro |      | Topo |      |
|----------|------------|------|--------|------|------|------|
|          | CP         | CV   | CP     | CV   | CP   | CV   |
| 12/07/21 | 13,8       | 21,3 | 15,2   | 21   | 13,1 | 18,4 |
| 27/07/21 | 14,7       | 20,2 | 16,5   | 23,5 | 14,3 | 21,4 |
| 11/08/21 | 14,4       | 22,7 | 15,8   | 22,1 | 13,5 | 19,7 |
| 26/08/21 | 13,1       | 19,5 | 14,6   | 19,0 | 12,4 | 17,6 |
| 10/09/21 | 12,5       | 18,3 | 14,1   | 18,1 | 12,1 | 16,3 |
| 25/09/21 | 12,0       | 17,7 | 13,8   | 17,3 | 11,7 | 15,8 |



**Figura 9:** Comportamento do teor de voláteis dos combustíveis ao longo do tempo de estocagem.

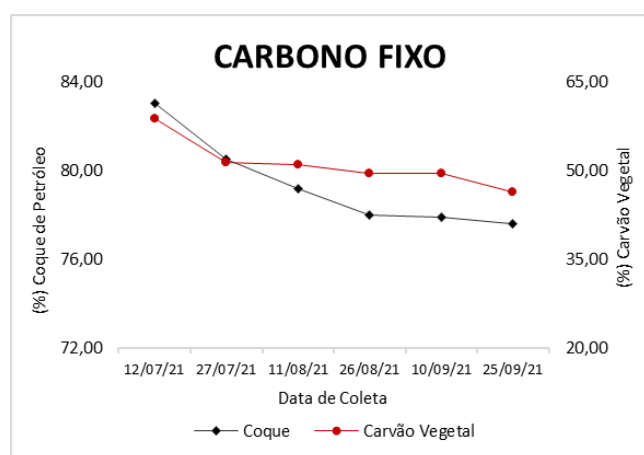
A partir da análise dos resultados apresentados é possível notar que houve o decaimento do teor de materiais voláteis de ambos os materiais, indicando que no decorrer do tempo houve a diminuição do poder de ignição dos mesmos.

### Carbono Fixo

Os resultados referentes ao teor de Carbono Fixo presente nos combustíveis são mostrados na Tabela 5, que apresenta os resultados em função da posição do material da pilha, e na Figura 10, que traz o comportamento médio de toda a pilha.

**Tabela 5** - Teor de Carbono Fixo por posição em função do tempo de estocagem.

| Data     | Superfície |      | Centro |      | Topo |      |
|----------|------------|------|--------|------|------|------|
|          | CP         | CV   | CP     | CV   | CP   | CV   |
| 12/07/21 | 83,0       | 57,2 | 82,9   | 60,2 | 83,2 | 59,3 |
| 27/07/21 | 81,8       | 52,1 | 80,6   | 50,5 | 79,2 | 51,8 |
| 11/08/21 | 79,7       | 50,9 | 79,0   | 49,7 | 78,9 | 52,6 |
| 26/08/21 | 78,2       | 52,0 | 79,9   | 48,0 | 75,9 | 49,0 |
| 10/09/21 | 77,8       | 50,4 | 79,3   | 50,2 | 76,7 | 48,2 |
| 25/09/21 | 77,6       | 47,9 | 78,9   | 46,1 | 76,4 | 45,2 |



**Figura 10:** Comportamento médio do teor de carbono fixo ao longo do tempo de estocagem.

Ao analisar os resultados obtidos nota-se um decaimento mais brusco do teor de carbono fixo em ambos os materiais nas primeiras semanas do ensaio, seguido por um

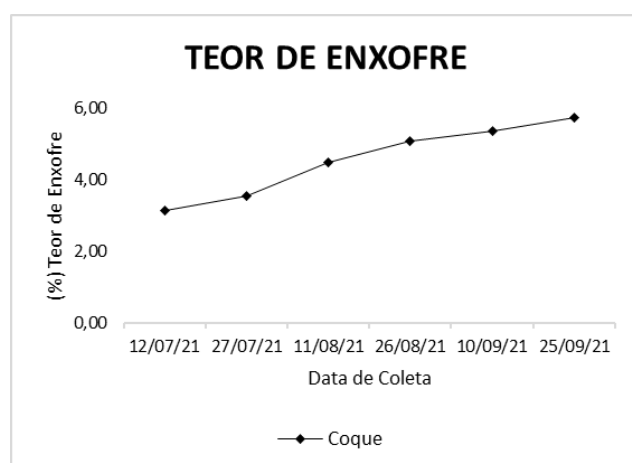
período de certa estabilidade. Ao longo de todo o período, o coque de petróleo apresentou redução média de 11% no teor de carbono fixo, enquanto que o carvão vegetal apresentou uma redução média de 22% novamente evidenciando a perda de qualidade dos combustíveis ao longo do tempo de estocagem.

### Teor de Enxofre

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos nas análises de Fluorescência de Raios X para teor de enxofre no coque de petróleo em função do tempo e da posição do material na pilha e na Figura 11 é apresentado o comportamento médio do teor de enxofre presente no coque de petróleo ao longo do tempo de armazenamento.

**Tabela 6:** Resultados das análises do Teor de Enxofre no coque de petróleo em função do tempo e da posição.

| Data       | Superfície | Centro | Topo |
|------------|------------|--------|------|
| 12/07/2021 | 3,2        | 3,4    | 2,8  |
| 27/07/2021 | 3,7        | 3,8    | 3,1  |
| 11/08/2021 | 4,7        | 4,6    | 4,2  |
| 26/08/2021 | 5,3        | 5,0    | 5,0  |
| 10/09/2021 | 5,4        | 5,5    | 5,2  |
| 25/09/2021 | 5,9        | 5,8    | 5,5  |



**Figura 11:** Comportamento médio do teor de enxofre presente no coque de petróleo ao longo do tempo de estocagem.



Já os resultados referentes ao teor de enxofre presente no carvão vegetal foram muito baixos, como era de se esperar devido à natureza desse combustível, e por esse motivo não houve motivo para se analisar seu comportamento ao longo do tempo.

Analisando os resultados apresentados na Figura 11 nota-se o aumento do teor de enxofre no coque de petróleo ao longo do tempo de estocagem. Tal aumento se deve às alterações sofridas em sua composição ao longo do tempo, como por exemplo, a redução no seu teor de carbono fixo.

Este resultado se torna preocupante quando relacionado ao uso deste combustível em processos nos quais ocorre a liberação de SO<sub>x</sub> na atmosfera. Segundo Roland (2016) a queima de 1 tonelada de coque de petróleo contendo 7% de enxofre, libera cerca de 140 kg de SO<sub>2</sub> na atmosfera.

Tal resultado, juntamente com todas as análises apresentadas neste trabalho salientam a importância de se realizar a estocagem de combustíveis em pátios e silos fechados. A permanência destes materiais em locais suscetíveis às condições climáticas por longos períodos exerce grande influência na qualidade dos combustíveis sólidos e consequente na eficiência energética dos processos nos quais eles serão utilizados.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesse estudo pode-se concluir que o armazenamento de combustíveis sólidos a céu aberto é prejudicial à qualidade dos mesmos, mesmo em curtos períodos de tempo.

Em poucos dias já foi possível observar a redução do teor de materiais voláteis e redução do poder calorífico de ambos os combustíveis analisados, fatores estes diretamente ligados à eficiência energética do processo de queima.

Tal queda pode ser correlacionada com processo de oxidação sofrido pelo material, devido à sua exposição às condições climáticas e ambientais.

Outro fator preocupante foi o aumento da concentração do teor de enxofre no coque de petróleo em detrimento da perda de matéria orgânica, uma vez que sua queima pode liberar

óxidos de enxofre na atmosfera, causando a poluição do ar.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS, C. F. C. Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte. 2008. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- BARCELLOS, D. C.; PIMENTA, A.S.; SILVA, J.S.; COUTO, L.C– Desempenho de um Forno de Carbonização Semi Contínuo Tipo Container para Produção de Carvão Vegetal. RENABIO – BIOMASSA & ENERGIA. v.1, n.2, p. 183-189, 2004.
- BRITO, J. O. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. 1993. 6 p. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 1993.
- GAUTO, M. A. Petróleo S.A: exploração, produção, refino e derivados. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011.
- GUZMÁN, D. P. (2008). Ângulo de fricción crítico y ángulo de reposo de la arena del Guamo. Revista Épsilon Nº 11, 7-20.
- LUZ, A.B., POSSA, M.V. Amostragem para processamento mineral. Rio de Janeiro: CETEM, 1982. (CT-41).
- MÉNDEZ, M. O. A. Síntese de materiais carbonosos ativados a partir do coque de petróleo. Dissertação - Faculdade de Engenharia Química. Campinas. São Paulo, 2005
- ROLAND, G.R.O. Análise da cadeia de suprimentos do coque de petróleo na Indústria cimenteira brasileira. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia de Produção, 2016.
- SÉYE, O. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. 1998. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.