

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
JÚLIA DELGADO MOURA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE O PODER CALORÍFICO E A FORMAÇÃO DE
CINZAS DO COQUE DE PETRÓLEO UTILIZADO COMO COMBUSTÍVEL NO
PROCESSO DE CALCINAÇÃO**

FORMIGA – MG
2018

JÚLIA DELGADO MOURA DE OLIVEIRA

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE O PODER CALORÍFICO E A FORMAÇÃO DE
CINZAS DO COQUE DE PETRÓLEO UTILIZADO COMO COMBUSTÍVEL NO
PROCESSO DE CALCINAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química do UNIFOR-MG, como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química.
Orientador: Prof. Neylor Makalister Ribeiro
Vieira.

FORMIGA – MG

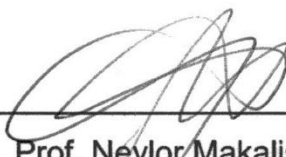
2018

Júlia Delgado Moura de Oliveira

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE O PODER CALORÍFICO E A FORMAÇÃO DE
CINZAS DO COQUE DE PETRÓLEO UTILIZADO COMO COMBUSTÍVEL NO
PROCESSO DE CALCINAÇÃO

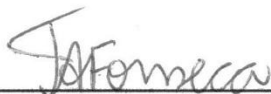
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química do UNIFOR-MG, como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Neylor Makalister Ribeiro Vieira

Orientador



Profa. Ma. Tania Aparecida de Oliveira Fonseca

UNIFOR-MG



Profa. Ma. Christiane Pereira Rocha Sousa

UNIFOR-MG

Formiga, 12 de novembro de 2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UNIFOR-MG

O48 Oliveira, Júlia Delgado Moura de.

Estudo da relação entre o poder calorífico e a formação de cinzas do coque de petróleo utilizado como combustível no processo de calcinação / Júlia Delgado Moura de Oliveira. – 2018.

42 f.

Orientador: Neylor Makalister Ribeiro Vieira.
Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Cinzas. 2. Poder calorífico. 3. Coque de petróleo. I. Título.

CDD 665.53

Catálogo elaborado na fonte pela bibliotecária
Regina Célia Reis Ribeiro – CRB 6-1362

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é uma marca muito importante em minha vida acadêmica. Muitos conhecimentos foram adquiridos para realização do mesmo.

Agradeço primeiramente a Deus por essa conquista, por colocar em meu coração um sonho e agora estar permitindo a realização dele. Ele que sempre me iluminou, protegeu e guiou, o que não foi diferente durante os cinco anos de faculdade e mais ainda nesse último para conclusão desse trabalho. A Nossa Senhora Aparecida pelas intercessões e bênçãos derramadas sobre mim.

Agradeço minha Vó Cida, por confiar em mim, me dar toda credibilidade e por me ajudar tornar esse sonho real, seu amor e carinho foram essências.

Agradeço aos meus pais Ricardo e Luciana, por acreditarem em mim, quando nem eu mais acreditava, por me encorajarem a enfrentar as dificuldades que apareceram, e pelo amor incondicional.

Ao meu irmão Lucas, por todos conselhos, sem seu amor, carinho e apoio seria muito mais difícil.

Aos meus familiares por acreditarem em mim e entenderem minha ausência em diversos momentos que não pude comparecer, por estar me dedicando a faculdade.

Minhas primas, o amor, incentivo e carinho de todas vocês foram muito importantes para mim. Em especial a Lívia, que sempre me socorreu nos trabalhos, quando as madrugadas eram curtas para realização deles.

Aos meus amigos por estarem sempre comigo, o apoio de vocês fez toda diferença.

As amigadas que fiz na faculdade e levarei por toda vida. Júlia Giordani do início ao fim me salvando. Isabella Borges, Marcela Luísa, Francielly, Maryene, todas as meninas que estiveram comigo. E todos amigos que fiz aqui desde 2014.

Agradeço ao meu orientador Neylor, por não medir esforços para que esse trabalho fosse concluído da melhor forma possível, toda gratidão a você.

A coordenação do curso de Engenharia Química. Christiane por estar sempre disposta a resolver nossos problemas, nos aconselhar e sempre mostrar a importância do nosso aprendizado e agora, sempre falando da importância do estágio e preocupada com nosso futuro. A coordenadora adjunta Tânia, por toda sua paciência, dedicação, carinho e ensinamento.

Ao professor Aladir que não mediu esforços para me ajudar nas análises estáticas e na discussão das mesmas, foi essencial para o desfecho desse trabalho. Agradeço todos os professores que participaram da minha vida, todos contribuíram para minha formação.

RESUMO

A cal virgem pode ser aplicada como insumo e matéria-prima nos mais diversos processos produtivos, os fornos de calcinação são os responsáveis por realizar a calcinação do calcário (CaCO_3) e transformá-lo em óxido de cálcio. Estes fornos de calcinação variam de equipamentos mais simples até fornos robustos de alta tecnologia, estes equipamentos utilizam os mais diversos tipos de combustíveis como fonte de energia. O coque verde de petróleo é o combustível utilizado por uma indústria fabricante de cal, da região Centro-Oeste de Minas, ele é o combustível mais utilizado nos fornos de calcinação devido ao seu alto poder calorífico inferior e a pequena formação de resíduos. O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica que contém informações aprofundadas sobre o processo de fabricação da cal e sobre os combustíveis utilizados em seus fornos de calcinação, principalmente o coque verde de petróleo, e o estudo de caso que correlaciona a formação de cinzas com o poder calorífico inferior do coque de petróleo, através da análise de regressão. Os resultados obtidos comprovam a hipótese de que quanto menor for o poder calorífico do coque de petróleo maior será a formação de cinzas. Além disso a pesquisa também teve como objetivo analisar o poder calorífico da amostra do coque de petróleo de dois diferentes fornecedores, demonstrando que não existiram diferenças significativas entre os valores apresentado por elas, através da realização do teste de hipótese.

Palavras-chave: Cinzas. Poder calorífico. Coque de petróleo.

ABSTRACT

The virgin lime can be applied as an input and raw material in the most diverse production processes, the calcination kilns are responsible for calcining the limestone (CaCO_3) and transforming it into calcium oxide. These calcination kilns range from simpler equipment to robust, high-tech kilns that use different types of fuel as a source of energy. Green coke is the fuel used by a lime industry in the Midwest of Minas Gerais. It is the most used fuel in the kilns of calcination due to its high calorific value and low formation of residues. The present work presents a literature review that contains detailed information on the lime manufacturing process and on the fuels used in its calcination furnaces, mainly petroleum coke. And the case study that correlates the ash formation with the lowest calorific value of petroleum coke, through the regression analysis and the correlation graph of the same. The results obtained were based on the hypothesis that the lower the calorific value of petroleum coke, the greater the ash formation. In addition, the research also aimed to analyze the calorific value of the petroleum coke sample from two different suppliers, demonstrating that there were no significant differences between the values presented by them, through the hypothesis test.

Keywords: Ash. Calorific value. Petroleum coke

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cal calcinada.....	18
Figura 2- Fluxograma da produção do coque.....	20
Figura 3- Qualidade do Coque Verde de Petróleo no Mercado Internacional	21
Figura 4 - Amostra do coque verde de petróleo	25
Figura 5 - Moinho pulverizador.....	25
Figura 6 - Dessecador	26
Figura 7- Balança analítica contendo cadinho com a amostra de coque	27
Figura 8 - Calorímetro PARR 6400.....	28
Figura 9 - Forno mufla.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Gerais do Coque Verde de Petróleo.....	21
Tabela 2 - Cronograma para controle de coleta de amostras	26
Tabela 3 - Análise de PCI dos fornecedores.....	31
Tabela 4 - Teste T realizado nas amostras de PCI Reduc e Replan.....	33
Tabela 5 - Teste T da diferença do PCI Reduc e Replan.....	33
Tabela 6 - Valores utilizados do PCI e teor de cinzas do coque verde de petróleo e análise de regressão linear	34

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	12
2.1.	Objetivo geral.....	12
2.2.	Objetivos específicos.....	12
3.	JUSTIFICATIVA	13
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1.	Energia	14
4.2.	Desenvolvimento sustentável x desenvolvimento econômico	15
4.3.	Cal virgem	16
4.3.1.	Processo de calcinação do calcário	17
4.3.2.	Utilizações da cal.....	18
4.4.	Combustíveis para o processo produtivo da cal	19
4.4.1.	Coque de petróleo como combustível no processo de calcinação	20
4.5.	Poder calorífico dos combustíveis	22
4.6.	Inferência estatística	22
4.6.1.	Teste de hipótese	22
4.6.2.	Análise de regressão.....	23
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1.	Escolha e coleta das amostras	24
5.1.1.	Materiais utilizados na coleta e preparo das amostras	25
5.1.2.	Métodos utilizados na coleta e preparo das amostras.....	26
5.2.	Procedimentos experimentais.....	27
5.2.1.	Determinação do poder calorífico inferior (PCI)	27
5.2.1.1.	Materiais utilizados.....	27
5.2.1.2.	Procedimento experimental.....	28
5.2.2.	Determinação do teor de cinzas.....	28
5.2.2.1.	Materiais utilizados.....	29
5.2.2.2.	Procedimento experimental.....	29
5.3.	Realização das análises estatísticas	30
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1.	Comparações dos valores obtidos na análise do PCI de dois fornecedores.....	31

6.2.	Resultados da determinação do PCI e do teor de cinzas do coque verde de petróleo	33
6.2.1.	Análise de regressão dos valores obtidos	37
7.	CONCLUSÃO.....	39
	REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

O óxido de cálcio, mais chamado de cal virgem, é resultado da decomposição térmica dos calcários, em fornos de calcinação. Esta cal pode ser utilizada como matéria-prima e insumo em diversos setores industriais e por isso é um produto de extrema importância industrial tanto no Brasil como em outros países.

Devido aos investimentos em tecnologias existentes e a disponibilidade de matrizes energéticas há possibilidade de diversificar as fontes energéticas, utilizadas como combustíveis em processos industriais. A calcinação do calcário em fornos industriais de calcinação para a produção da cal virgem está entre os processos mais conhecidos e difundidos no meio industrial.

Estes fornos de calcinação podem utilizar gás natural, carvão mineral e vegetal, coque verde de petróleo, lenha e óleo combustível, como fonte energética para o seu funcionamento sendo que o coque verde de petróleo, obtido através do refino do petróleo, é o mais utilizado, pois, apresenta alta capacidade energética e baixa formação de cinzas.

A característica principal que torna o coque verde de petróleo muito utilizado em processos de calcinação é o poder calorífico que o mesmo possui. Este poder calorífico pode ser entendido como a quantidade de energia em forma de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa. O coque verde de petróleo com alto poder calorífico, associado ao baixo teor de cinzas, é um combustível que gera poucos resíduos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo de avaliar a relação entre o poder calorífico e a formação de cinzas do coque de petróleo utilizado como combustível no processo produtivo da cal virgem. Além de comparar os valores obtidos na análise do PCI de dois fornecedores distintos.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar análise do poder calorífico inferior (PCI) no coque de petróleo utilizado como combustível no processo de calcinação;
- Realizar análise de cinzas no coque de petróleo utilizado como combustível no processo de calcinação;
- Comparar os valores obtidos do PCI do coque petróleo de diferentes fornecedores;
- Analisar a relação entre o poder calorífico e a formação das cinzas no coque de petróleo utilizado como combustível no processo de calcinação através da construção de correlação matemática;
- Descrever sobre o processo de calcinação e os combustíveis utilizados no mesmo;
- Avaliar as características do coque de petróleo utilizado no processo de calcinação;

3. JUSTIFICATIVA

As indústrias calcinadoras utilizam diversos combustíveis em seus fornos de calcinação, sendo o coque de petróleo o mais utilizado de todos eles. A grande utilização deste combustível está ligada ao seu alto poder calorífico e a baixa geração de resíduos.

Na região Centro-Oeste de Minas Gerais está localizado as maiores indústrias calcinadoras do país, que utilizam tecnologias de ponta em seus processos produtivos. Para a realização da pesquisa existiu a oportunidade de realizar análises no combustível, coque verde de petróleo utilizado no forno de calcinação de uma dessas grandes indústrias.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Diversas substâncias são utilizadas como combustíveis, como é o caso do carvão mineral, do coque de petróleo, gasolina, álcool, gás natural entre outros. Os fornos de calcinação é um destes equipamentos que necessita de uma fonte de calor (combustível) para operar.

O coque é um combustível fóssil derivado do petróleo, de cor negra e forma aproximadamente granular, é um resíduo com alto teor de carbono, produzido através do craqueamento do petróleo, e é um dos combustíveis mais utilizados em fornos de calcinação.

4.1. Energia

Vecchia (2010), afirma que, a base da vida é a energia, sem ela não existiria nenhuma forma de vida no Planeta. O grau de desenvolvimento de uma nação pode ser medido através da sua demanda energética, devido ao fato desta ser um índice muito representativo. Desde a Revolução Industrial, os países tinham suas economias medidas pelas suas disponibilidades de recursos energéticos, além do desenvolvimento social e econômico.

De acordo com o mesmo autor a energia foi sendo descoberta aos poucos e conforme a necessidade do homem. A primeira e mais primitiva forma de energia é a proveniente da força humana, produzida pelos músculos. Em seguida o homem passou a utilizar o fogo, há cerca de 100 mil anos atrás. Em 5.000 a.C. o homem começou a utilizar a força animal para puxar arado, para semear. Veio também a escravidão, onde o homem tirava proveito da força humana. Em 1769 James Watt desenvolveu a máquina a vapor, alimentada por carvão. Então iniciou-se a era industrial.

A energia pode mudar sua forma, mas nunca sua quantidade. As formas de energia podem ser classificadas em: luminosa, química, nuclear, térmica, elétrica e mecânica.

A energia química pode ser representada por combustíveis fósseis e alimentos. A energia térmica é percebida através de um corpo aquecido. O espectro de luz representa a energia luminosa. A energia nuclear é encontrada no núcleo atômico.

Energia produzida por usinas elétricas ou por pilhas é denominada energia elétrica. O movimento de um corpo caracteriza-se como energia mecânica.

Existem dois tipos de energia, são elas, energia renovável e energia não renovável.

A energia renovável é considerada fonte primária de energia. São aquelas que a natureza é capaz de repor em suas condições naturais. Já a energia não renovável é aquela em que, em suas condições naturais, a natureza é incapaz de repor em curto tempo.

4.2. Desenvolvimento sustentável x desenvolvimento econômico

Segundo Vecchia (2010), desenvolvimento sustentável é a manutenção e garantia dos estoques da natureza e da reposição por processos naturais. Visa o equilíbrio e a capacidade regenerativa da natureza. Enquanto o desenvolvimento econômico é responsável pela modernização crescente nos últimos séculos, que proporcionou ao homem conforto e melhor qualidade de vida, mas em contrapartida trouxe degradações ecológicas e problemas sociais e econômicos globais.

De acordo com Reis, Fadigas e Carvalho (2012) além da contribuição para superação dos presentes problemas o desenvolvimento sustentável tem como objetivo também garantir a vida, de modo a proteger e manter os sistemas naturais. O que implica em uma necessidade de realizar grandes mudanças nos sistemas produtivos e cultura humana presentes atualmente e na forma de utilizar recursos naturais essenciais.

O impacto ambiental é um indicador de desigualdade social, visto que o consumo excessivo dos recursos energéticos disponíveis na natureza é utilizado por uma minoria privilegiada, enquanto a pobreza de uma maioria populacional não tem acesso, ou não utiliza, desenfreadamente tais recursos.

A modernização e desenvolvimento tecnológico fizeram com que o homem perdesse o contato com a natureza e fosse viver em grandes centros, fazendo-o assim perder o seu equilíbrio entre desenvolvimento e preservar o meio natural que lhe foi oferecido.

Vecchia (2010) afirma que energia, meio ambiente e desenvolvimento econômico estão muito ligados um ao outro. Nas últimas duas décadas, segundo estudos realizados pela Energy Information Administration (EIA), órgão estadual dos

Estados Unidos sobre estatísticas energéticas, o consumo energético mundial aumentou 25%. Tendo em vista que maior parte desse crescimento se deu em países menos desenvolvidos. A estimativa é aumentar tal consumo até 100% nas próximas duas décadas, esse aumento ocorrerá pelos países em desenvolvimento. Várias organizações foram criadas para a preservação dos recursos naturais.

Reis, Fadigas e Carvalho (2012) dizem que as discussões globais de sustentabilidade iniciaram na década de 70 e existem ainda muitas discussões sobre o assunto, tendo cada vez mais participação.

Cavalcanti (1994), cita em sua obra que o desenvolvimento sustentável se dá ao atender as necessidades atuais sem comprometer as necessidades das gerações futuras. Com isso determina ações a serem seguidas, tais como, preservação da biodiversidade e dos ecossistemas, diminuir o consumo e o desenvolvimento de tecnologias que façam uso de energia renovável, aumentar a produção industrial em países pouco desenvolvidos através de combustíveis ecológicos, assim como a adaptação atual.

4.3. Cal virgem

Conforme a Norma Brasileira (NBR) 6471 (ABNT,1998), a cal virgem é o produto decorrente do processo de calcinação, onde existe a combinação do óxido de cálcio com óxido de magnésio.

Como dito a cal é um produto da calcinação, o que dá origem a esse produto é o calcário, que pode ser encontrado na natureza em dois tipos: calcário calcítico (CaCO_3) e calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Abreu (1965), afirma que o calcário é carbonato de cálcio natural que está distribuído em grande quantidade na crosta da Terra. É encontrado em extensas e espessas camadas e lentes alternadas nas formações, devido ao seu período geológico de formação.

Segundo Guimarães (2002), a história da cal vem desde a Idade da Pedra. Algumas ruínas descobertas, na Pirâmide de Shersi, Tibet, o seu solo argiloso foi neutralizado com uso da cal. Outro fato foi no Egito, nas Pirâmides de Quéops e Quéfrem, onde foi encontrada cal nas juntas dos blocos de calcário e granito além das vedações das câmaras.

Em outra obra, Guimarães (1998), fala que existe indicadores da utilização da cal por todo processo da história humana. Cita sua utilização na construção de estradas na Inglaterra, em 120 d.C., além de estar presente na construção da Muralhas da China, em 228 a.C. França, Inglaterra e Alemanha que impulsionaram a indústria de cal, nos séculos XIX e XX. Até meados do século passado o Brasil era atrasado no ramo industrial, porém a partir desse período o país começou a competir igualmente com as demais indústrias do planeta.

A Associação Brasileira dos Produtores de Cal (ABPC) divide os produtores de cal em quatro subgrupos, sendo eles: integrados (aqueles que produzem a cal com suas próprias minas de calcário), não integrados (os que produzem a cal com calcário comprado por terceiros), transformadores (aqueles que compram a cal e a modificam, seja por meio de moinhos ou hidratação do produto) e cativos (produzem a cal para o próprio consumo).

4.3.1. Processo de calcinação do calcário

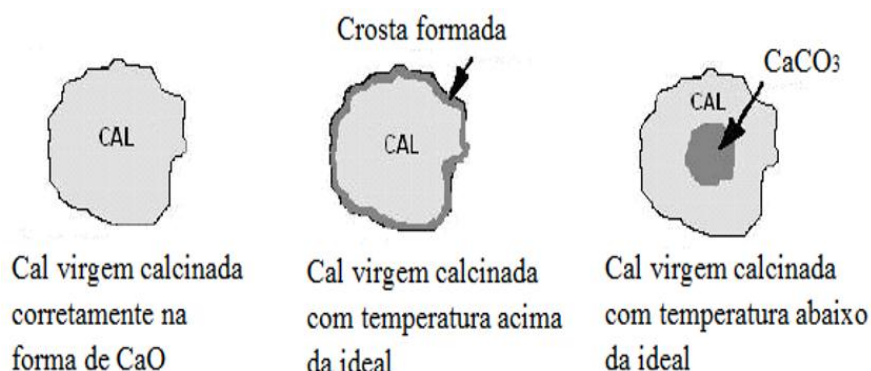
O processo de calcinação do calcário pode ocorrer em diversos tipos de fornos, onde ocorre a decomposição térmica dos calcários. Segundo o dicionário Aurélio (2000) o processo de calcinação é o processo no qual ocorre a transformação do carbonato de cálcio (CaCO_3), em óxido de cálcio (CaO).

Filho e Scipião (2004), citam os tipos de fornos existentes, verticais, rotativos, horizontais e leito. A escolha do forno utilizado no processo produtivo se dá de acordo com o que se deseja obter, e claro, com as condições financeiras disponíveis. Dentre esses quatro tipos de fornos o vertical é o mais empregado no processo.

Silva (2009), faz outro tipo de referência aos fornos existentes, dividindo-os em: forno de barranco descontínuo, forno de barranco contínuo, forno vertical metálico de cuba simples, forno AZBE, forno vertical metálico de cubas múltiplas e fluxos paralelos (esse tipo de forno geralmente é uma tecnologia suíça, sendo denominado como forno MAERZ).

Paiva, Gomes e Oliveira (2007) ilustram uma cal calcinada corretamente, além da demonstração de uma cal calcinada acima dos parâmetros ideais e abaixo desses (FIG. 1).

Figura 1 – Cal calcinada



Fonte: PAIVA, GOMES, OLIVEIRA (2007).

Depois do processo de calcinação, a cal produzida é classificada e então britada, destinada aos silos para seu armazenamento e por fim será separada por sua granulometria.

Após a obtenção da cal virgem ela pode ainda passar por processos de moagem, visando um produto final extremamente fino, e pelo processo de hidratação, que nada mais é a adição de água à cal virgem.

Depois da transformação do calcário e todas etapas da calcinação e processos de transformação da cal virgem, ela será destinada aos seus clientes.

4.3.2. Utilizações da cal

Chang (1994), diz que a indústria de aço é a que mais utiliza cal, é utilizada para retirar as substâncias ácidas indesejadas do minério de ferro. Muito utilizada também para tratamento de água e poluição atmosférica. Pode, também, ser utilizada na indústria alimentícia.

De acordo com Associação Brasileira de Cimento Portland - ABPC (2008) a cal é utilizada na construção civil, preferencialmente em sua forma hidratada, para estabilização de solo, produção de tintas, argamassas e construções de rodovias. Muito utilizada também em siderurgias e metalurgias e em indústrias químicas.

Segundo a mesma associação, a cal é também empregada na produção de papel e celulose, indústrias alimentícias e na agricultura.

A ABPC (2008) cita ainda o emprego da cal na saúde e preservação ambiental. Devido à sua ação bactericida e saneador ambiental. Muito utilizada nas unidades de tratamento de água que será distribuída à população.

4.4. Combustíveis para o processo produtivo da cal

Assis (1993), afirma que a combustão tem como principal objetivo a obtenção de calor, esse calor, possibilitará a temperatura fundamental para a conversão da matéria-prima em produto.

Segundo Silva (2009), existem vários tipos de combustíveis que podem ser empregados no processo produtivo da cal. A espécie do forno vai determinar seu consumo de combustível. Os combustíveis mais utilizados na calcinação são coque de petróleo (30%), gás natural (20%), lenha (20%), óleo combustível (20%), carvão mineral e vegetal (10%).

Prates (2006), afirma que o gás natural é uma mistura dos hidrocarbonetos leves. Sua constituição varia conforme seu processamento, condicionamento e transporte. É encontrado no subsolo por meio de jazidas de petróleo.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2012), houve uma redução no corte da madeira em torno de 35%. Visando a capacidade energética da madeira, essa possui vantagens significativas como clima adequado e extensão de área para o plantio, além da existência de investimentos na área tecnológica, a biotecnologia, que auxilia o aumento da produção física por hectare e maior densidade de elementos energéticos.

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2004), o carvão mineral é um composto de componentes orgânicos sólidos. Fossilizados a milhões de anos com demais combustíveis fósseis, a qualidade desse combustível segue seu conteúdo de carbono e o estágio dos componentes orgânicos. O custo da sua extração varia conforme o solo e sua profundidade.

Uhlig, Goldemberg e Coelho (2008), citam que o carvão vegetal é utilizado na produção de ferro-gussa, ferro liga, fabricação de cimento e na produção da cal.

De acordo com a Petrobrás (2012), os óleos combustíveis são muito utilizados no processo industrial para aquecimento de fornos e caldeiras. É obtido através da destilação do petróleo, como é o caso do coque de petróleo que é o combustível mais utilizado neste processo.

4.4.1. Coque de petróleo como combustível no processo de calcinação

De acordo com Speight (2004), o coque verde de petróleo é um subproduto do petróleo, obtido na indústria de refino do petróleo. Esse combustível apresenta alto poder calorífico, baixo custo e seu teor de enxofre são referentes ao tipo de petróleo do qual o CVP foi originado.

Carvalho e Assis propuseram um fluxograma representando a produção do coque de petróleo (FIG. 2).

Figura 2- Fluxograma da produção do coque

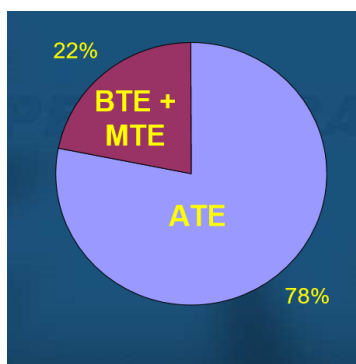


Fonte: CARVALHO, ASSIS; 2007, p.6.

A Petrobrás (2012), cita que a aplicação do coque verde de petróleo (CVP) dá-se conforme o ajuste de suas características com o processo industrial. O mercado de coque é muito amplo, tendo como principais segmentos a siderurgia, abrasivos, ferro-gusa, ferro-ligas, carboníferas, cerâmica, cimenteira, termelétricas a carvão, fundição, calcinação, gaseificação, secagem de grãos e indústria química. O baixo teor de enxofre é característico do coque verde de petróleo produzido no Brasil.

Carvalho e Assis (2007), citam a diferença entre o Coque Verde de Petróleo nacional e o internacional, essa diferença baseia-se no teor de enxofre. Sendo que o internacional apresenta maior teor (FIG. 3).

Figura 3- Qualidade do Coque Verde de Petróleo no Mercado Internacional



Fonte: CARVALHO, ASSIS (2007).

Sendo que:

BTE: Coque com baixo teor de enxofre

MTE: Coque com médio teor de enxofre

ATE: Coque com alto teor de enxofre

A Petrobrás cita algumas características do Coque Verde de Petróleo (TAB.

1).

Tabela 1 - Características Gerais do Coque Verde de Petróleo

Características	Unidade	Limite
Umidade	% massa	12,0 máx.
Matéria Volátil	% massa	15,0 máx.
Cinzas	% massa	0,50 máx.
Enxofre	% massa	1,0 máx.
Carbono Fixo		84min.
Poder Calorífico	Cal/g	8400 min.
Sup. (PSC)		
Hard Groove	-	60 min.
Index (HGI)		
Granulometria	Mm	200 máx.

Fonte: PETROBRÁS (2014).

Nas indústrias de cimento, cal e cerâmica o coque verde de petróleo é utilizado como substituinte da lenha e do carvão (vegetal ou mineral), por apresentar alto poder calorífico que associado ao baixo teor de cinzas, demonstra a sua capacidade energética, gerando assim pequenas quantidades de resíduos (GAUTO, 2011).

Por possuir um processo com condições alcalinas as indústrias da cal podem utilizar o coque verde de petróleo com alto teor de enxofre. Isso ocorre por causa da

reação do dióxido de enxofre com os compostos de cálcio, sódio e potássio (SILVA, 2009).

4.5. Poder calorífico dos combustíveis

Uma das características importantes para se analisar nos combustíveis antes de serem utilizados no processo produtivo da cal é o seu poder calorífico.

Jara (1989), define o poder calorífico como a quantidade de energia em forma de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa. O poder calorífico pode ser dado como inferior, que é a energia que realmente está disponível por uma unidade de massa na combustão.

4.6. Inferência estatística

A inferência estatística pode ser entendida como conjunto de métodos e técnicas que conduzem ao comportamento de certa população, através do seu conhecimento empírico proporcionado por uma amostra, sendo o comportamento de determinada amostra medido em termos de probabilidade (BARBOSA, 2014). A principal função da inferência estatística é obter resultados (conclusões) sobre uma população tendo como base seus dados amostrais.

Os métodos utilizados na inferência estatística são divididos em: métodos de estimação de parâmetros e testes de hipóteses. O teste de hipóteses tem como principal objetivo comparar se os aspectos analisados (atribuídos a um parâmetro populacional) são compatíveis com a evidência empírica da amostra (DAVIS et al., 2006).

4.6.1. Teste de hipótese

Testar uma hipótese é reunir evidências nos dados amostrais, que fundamentam a rejeição ou a não rejeição de certa afirmação de uma população específica ou sobre um modelo distributivo, levando em consideração as probabilidades de serem tomadas decisões incorretas (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Segundo Barbosa (2014), são realizados os seguintes procedimentos básicos para testar as hipóteses relativas aos parâmetros da μ (média) de uma população através dos quatro passos, sendo eles:

1º Passo: $H_0 = \mu_0$

$H_1 \neq \mu_0$

Onde de acordo com Scudino (2008):

Hipótese nula (H_0): é a hipótese assumida como verdadeira para a construção do teste. É a teoria, o efeito ou a alternativa que se está interessado em testar.

Hipótese alternativa (H_1): é considerada quando a hipótese nula não tem evidência estatística.

2º Passo: Identificação a estatística do teste e caracterização da sua distribuição.

3º Passo: Definição da regra de decisão, com especificação do nível de significância do teste.

4º Passo: Cálculo do teste estatístico e tomada da decisão.

Além disso também pode ser utilizado o p-valor, a partir do momento em que a probabilidade é relacionada a um valor observado da estatística (intervalo de confiança) é igual ou menor que o valor previamente determinado de α (hipótese nula) conclui-se que a hipótese nula é falsa. Esse valor é conhecido como significativo, que pode ser entendido como valor cuja a probabilidade de ocorrência, a partir da hipótese nula, é igual ou menor do que α (SIEGEL, 1975).

4.6.2. Análise de regressão

Segundo Kazmier (1982, p.299), o objetivo principal da análise de regressão linear é prever o valor de uma variável (dependente), dado que seja conhecido o valor de uma variável associada (independente). A equação de regressão é a fórmula algébrica pela qual se determina o valor previsto da variável dependente.

O modelo de regressão linear simples descreve a variável Y como uma soma da quantidade determinística e uma quantidade aleatória. A parte determinística, uma reta em função de X , que representa a informação sobre Y que já se quer, apenas com o conhecimento da variável X . Já a parte aleatória, chamada de erro, são os inúmeros fatores que podem interferir Y (KASMIER, 1982).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para a evolução da pesquisa.

O trabalho realizado é uma pesquisa experimental, com dois objetivos principais, o primeiro é criação de uma correlação matemática entre o poder calorífico e a formação de cinzas do coque de petróleo utilizado como combustível em processo de calcinação. Onde foi utilizado apenas um fornecedor de coque de petróleo para tais análises. Trabalhando assim com uma abordagem quantitativa dos dados para obter uma relação entre o poder calorífico inferior e as cinzas formadas na queima do coque de petróleo.

O segundo objetivo foi comparar se existem diferenças entre o PCI, das amostras de coque verde de petróleo de dois fornecedores distintos.

Vale ressaltar que o trabalho utiliza apenas análises de poder calorífico inferior do coque de petróleo porque no processo de calcinação os gases de combustão são liberados a temperaturas altas onde a água nele contida está em fase gasosa.

O coque verde de petróleo utilizado na realização das análises, tais como as informações referentes ao mesmo foram coletadas em uma indústria de calcinação localizada na zona rural da cidade de Arcos – MG, sendo que essas foram coletadas e analisadas entre o período de agosto de 2016 a 2018.

Os procedimentos experimentais realizados seguem as normas da ABNTNBR – 9092 para determinação das cinzas do coque e o equipamento 6400 CALORIMETER para a determinação do poder calorífico inferior.

5.1. Escolha e coleta das amostras

O coque utilizado para as análises foi o coque verde de petróleo seco, classificado em uma faixa granulométrica de 0 a 5 mesh. O mesmo foi coletado no silo de coque em uma indústria de calcinação na região de Arcos.

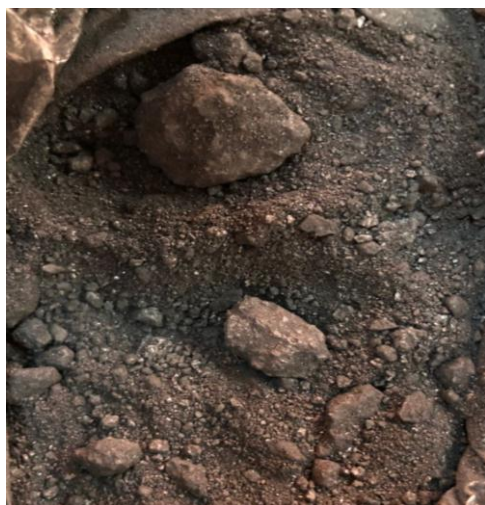
É válido ressaltar que a empresa realiza diversas análises neste coque, como as análises de poder calorífico inferior e cinzas, para averiguar a qualidade do combustível que está sendo utilizado em seus fornos de calcinação.

O coque utilizado foi coletado no galpão de armazenamento de coque da indústria, sendo que este produto é armazenado de acordo com o fornecedor.

5.1.1. Materiais utilizados na coleta e preparo das amostras

Coletou-se no pátio de coque uma amostra de 2 kg do combustível (FIG. 4).

Figura 4 - Amostra do coque verde de petróleo



Fonte: AUTORA, 2018.

O moinho de panela AMEF representado pela FIG. 5, é muito utilizado para moer minérios, de liga de ferro, e outros materiais. Seu motor permite que as amostras sejam moídas em um curto período de tempo (COMERCIAL AMEF, 2018).

Figura 5 - Moinho pulverizador



Fonte: AUTORA, 2018.

Para que a água contida na amostra não interfira nas análises utilizou-se um dessecador representado pela FIG. 6, com função de retirar a umidade da amostra.

Figura 6 - Dessecador



Fonte: AUTORA, 2018.

5.1.2. Métodos utilizados na coleta e preparo das amostras

Para se realizar a coleta de amostras em uma pesquisa é necessário realizar o delineamento experimental, ou seja, são a forma como as unidades experimentais, no caso do trabalho as amostras, estão organizadas.

Como o principal objetivo do trabalho é avaliar a influência do poder calorífico na formação de cinzas do coque de petróleo, existiu a necessidade de manter um controle rígido nas coletas para que as análises de poder calorífico inferior e a quantidade de cinzas fossem realizadas na mesma amostra (TAB. 2).

Tabela 2 - Cronograma para controle de coleta de amostras

Poder Calorífico Inferior (PCI)	Análise de Cinzas
Lote:	Lote:
Fornecedor:	Fornecedor:
Dia:	Dia:

Fonte: AUTORA, 2018.

A coleta de amostras e o preparo ocorreram da seguinte forma: coletou-se, diariamente, cerca de 2 kg de coque no galpão de armazenamento; anotou-se o número do lote e fornecedor; pulverizou-se as amostras em moinho; depois de pulverizadas, dessecou-se para a então realização das análises.

5.2. Procedimentos experimentais

Como dito anteriormente, os procedimentos experimentais utilizados para a realização das análises foram os mesmo que a indústria de calcinação utiliza. Sendo eles: NBR – 9092 para determinação das cinzas do coque e o equipamento 6400 CALORIMETER para a determinação do poder calorífico inferior.

5.2.1. Determinação do poder calorífico inferior (PCI)

O poder calorífico pode ser entendido como a quantidade de energia em forma de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa.

5.2.1.1. Materiais utilizados

Os materiais utilizados para a análise de PCI foram:

- Cadinho de platina
- Balança analítica (FIG. 7)

Figura 7- Balança analítica contendo cadinho com a amostra de coque



Fonte: AUTORA, 2018.

O Calorimeter Parr® 6400, representado pela FIG. 8, é um equipamento compacto, que possui um subsistema de refrigeração de circuito fechado no calorímetro. Esse subsistema utiliza um conjunto de resfriamento termoelétrico conectado diretamente a um tanque de água, de um litro, que fornece água de resfriamento ao calorímetro. Um tanque pressurizado de nitrogênio externo é usado para fornecer água de enxágue ao calorímetro. Este modelo apresenta a bomba fixa e o design da caçamba, permitindo o preenchimento automatizado da caçamba e do revestimento(PARR INSTRUMENT COMPANY, 2018).

Figura 8 - Calorimeter PARR 6400



Fonte: AUTORA, 2018.

5.2.1.2. Procedimento experimental

Para a realização das análises de Poder Calorífico Inferior (PCI) foi utilizada uma bomba calorimétrica COLORIMETER 6400 da marca Parr®.

Colocou-se um cadinho de metal em uma balança analítica e em seguida tarou-se a mesma. Cerca de 0,50 g +/- 0,05 g de coque verde de petróleo. Com a ajuda de uma pinça prendeu-se o fio de algodão no fio de níquel da bomba calorimétrica, encaixou-se o cadinho com a amostra e colocou-se o fio de algodão em contato com a amostra. A bomba foi então fechada até final da rosca.

5.2.2. Determinação do teor de cinzas

As cinzas são os resíduos formados pela combustão do combustível nos fornos de calcinação.

5.2.2.1. Materiais utilizados

Para realização da análise de cinzas utilizou-se um cadinho de porcelana, uma balança analítica e um forno mufla (FIG. 9).

Figura 9 - Forno mufla



Fonte: AUTORA, 2018.

5.2.2.2. Procedimento experimental

O cadinho de porcelana foi pesado e teve seu peso anotado, depois disso a balança foi tarada e pesou-se cerca de 1,000 g +/- 0,100 g da amostra de coque verde de petróleo e a massa foi anotada. Com o auxílio de uma pinça, o cadinho com a amostra foi levado até o forno mufla a uma de temperatura aproximada de 950°C, onde permaneceram por cerca de 2 horas.

Depois disso o cadinho foi retirado da mufla e deixado em bancada até que atingisse a temperatura ambiente, depois disso o cadinho foi pesado novamente e realizou-se a Equação 1 para o cálculo de cinzas:

$$\%CZ = \{(C + A)\} - (C + A (CAL))\} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

CZ: Teor de cinzas (%)

C: Massa do cadinho (g)

A: Massa da amostra (g)

C + A: Massa do cadinho + amostra (g)

CAL: Massa do cadinho + amostra pós queima (g)

5.3. Realização das análises estatísticas

Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o software Minitab®, que é um programa de computador proprietário voltado para fins estatísticos, ele oferece diversas ferramentas para a realização destes cálculos e por isso também é muito utilizado em diversas indústrias, auxiliando no seu controle de qualidade e planejamentos de dados (MINITAB, 2018).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos estatisticamente pelo software Minitab®.

6.1. Comparações dos valores obtidos na análise do PCI de dois fornecedores

A TAB. 3 apresenta os resultados usados nas análises de poder calorífico inferior do coque verde de petróleo, entre os fornecedores REDUC e REPLAN, para isso foram coletadas 50 amostras de cada fornecedor.

Tabela 3 - Análise de PCI dos fornecedores

Amostra	Fornecedor	PCI (Cal/g)	Amostra	Fornecedor	PCI (Cal/g)
1	REDUC	8.686	1	REPLAN	8.749
2	REDUC	8.294	2	REPLAN	8.559
3	REDUC	8.682	3	REPLAN	7.966
4	REDUC	8.795	4	REPLAN	8.575
5	REDUC	8.720	5	REPLAN	8.472
6	REDUC	8.760	6	REPLAN	7.908
7	REDUC	8.666	7	REPLAN	8.692
8	REDUC	8.753	8	REPLAN	8.618
9	REDUC	8.761	9	REPLAN	8.677
10	REDUC	8.698	10	REPLAN	8.757
11	REDUC	8,660	11	REPLAN	8.734
12	REDUC	8,656	12	REPLAN	8.671
13	REDUC	8,719	13	REPLAN	8.798
14	REDUC	8.676	14	REPLAN	8.365
15	REDUC	8.643	15	REPLAN	8.749
16	REDUC	8.662	16	REPLAN	8.749
17	REDUC	8.699	17	REPLAN	8.673
18	REDUC	8.501	18	REPLAN	8.582

Continuação da Tabela 3 - Análise de PCI dos fornecedores

19	REDUC	8.693	19	REPLAN	8.654
20	REDUC	7.911	20	REPLAN	8.660
21	REDUC	8.750	21	REPLAN	8.438
22	REDUC	8.796	22	REPLAN	8.632
23	REDUC	8.787	23	REPLAN	8.654
24	REDUC	8.724	24	REPLAN	8.837
25	REDUC	8.699	25	REPLAN	8.714
26	REDUC	8.767	26	REPLAN	8.913
27	REDUC	8.688	27	REPLAN	8.467
28	REDUC	8.650	28	REPLAN	8.707
29	REDUC	8.594	29	REPLAN	8.688
30	REDUC	8.596	30	REPLAN	8.663
31	REDUC	8.748	31	REPLAN	8.605
32	REDUC	8.669	32	REPLAN	8.709
33	REDUC	8.567	33	REPLAN	8.768
34	REDUC	8.595	34	REPLAN	8.668
35	REDUC	8.591	35	REPLAN	8.826
36	REDUC	8.581	36	REPLAN	8.663
37	REDUC	8.503	37	REPLAN	8.606
38	REDUC	8.541	38	REPLAN	8.592
39	REDUC	8.549	39	REPLAN	8.698
40	REDUC	8.600	40	REPLAN	8.595
41	REDUC	8.852	41	REPLAN	8.749
42	REDUC	8.839	42	REPLAN	8.666
43	REDUC	8.681	43	REPLAN	8.706
44	REDUC	8.616	44	REPLAN	8.872
45	REDUC	8.670	45	REPLAN	8.697
46	REDUC	8.764	46	REPLAN	8.576
47	REDUC	8.781	47	REPLAN	8.764

Continuação da Tabela 3 - Análise de PCI dos fornecedores

48	REDUC	8.701	48	REPLAN	8.729
49	REDUC	8.722	49	REPLAN	8.685
50	REDUC	8.600	50	REPLAN	8.685

Fonte: AUTORA, 2018.

Para a comparação dos valores apresentados utilizou-se o teste de hipótese para médias de duas populações de PCI do coque verde de petróleo dos dois fornecedores. A TAB. 4 e a TAB. 5 apresentam os resultados obtidos no teste.

Tabela 4 - Teste T realizado nas amostras de PCI Reduc e Replan

	N	Média	Desvio Padrão
PCI (Cal/g) Reduc	50	8657	21
PCI (Cal/g) Replan	50	8623	26

Fonte: AUTORA, 2018.

Tabela 5 - Teste T da diferença do PCI Reduc e Replan

Diferença = $m\mu$ PCI (Cal/g) Reduc – $m\mu$ PCI (Cal/g) Replan			
Diferença	Média	IC	P. Valor
PCI Reduc – PCI Replan	33,7	(-29,6; 97,00)	29,3

Fonte: AUTORA, 2018.

Nota-se que o P-valor foi acima de 5%, que é um nível de significância notável. Nota-se também que o intervalo de confiança contém o valor 0, que é a hipótese nula, logo, rejeita-se o H_0 , isso quer dizer que não existe diferença significativa entre os dois fornecedores ao nível de 5%.

6.2. Resultados da determinação do PCI e do teor de cinzas do coque verde de petróleo

Utilizou-se 100 amostras de coque verde de petróleo do fornecedor Reduc, onde apresentou-se os valores de PCI e teor de cinzas obtidos através de análises feitas. Realizou-se uma análise de regressão linear, e a partir desses resultados obteve-se a Equação 2.

$$(\%) \text{Cinzas} = 3,20 - 0,000344 \times \text{PCI} \quad (2)$$

A TAB. 6 apresenta os valores obtidos na análise de determinação do PCI e teor de cinzas e os respectivos resultados da equação de regressão.

Tabela 6 - Valores utilizados do PCI e teor de cinzas do coque verde de petróleo e análise de regressão linear

Amostra	Fornecedor	PCI (Cal/g)	Cinzas (%)	Regressão Linear
1	REDUC	8.686	0,24	0,212016
2	REDUC	8.294	0,60	0,346864
3	REDUC	8.682	0,26	0,213392
4	REDUC	8.795	0,28	0,17452
5	REDUC	8.720	0,17	0,20032
6	REDUC	8.760	0,11	0,18656
7	REDUC	8.666	0,26	0,218896
8	REDUC	8.753	0,21	0,188968
9	REDUC	8.761	0,26	0,186216
10	REDUC	8.698	0,14	0,207888
11	REDUC	8.660	0,16	0,22096
12	REDUC	8.656	0,17	0,222336
13	REDUC	8.719	0,19	0,200664
14	REDUC	8.676	0,26	0,215456
15	REDUC	8.643	0,29	0,226808
16	REDUC	8.662	0,25	0,220272
17	REDUC	8.699	0,23	0,207544
18	REDUC	8.501	0,27	0,275656
19	REDUC	8.693	0,24	0,209608
20	REDUC	7.911	0,34	0,478616
21	REDUC	8.750	0,22	0,19
22	REDUC	8.796	0,18	0,174176
23	REDUC	8.787	0,21	0,177272
24	REDUC	8.724	0,21	0,198944
25	REDUC	8.699	0,26	0,207544

Continuação da Tabela 6 - Valores utilizados do PCI e teor de cinzas do coque verde de petróleo e análise de regressão linear

26	REDUC	8.767	0,24	0,184152
27	REDUC	8.688	0,27	0,211328
28	REDUC	8.650	0,25	0,2244
29	REDUC	8.594	0,28	0,243664
30	REDUC	8.596	0,27	0,242976
31	REDUC	8.748	0,19	0,190688
32	REDUC	8.669	0,26	0,217864
33	REDUC	8.567	0,23	0,252952
34	REDUC	8.595	0,32	0,24332
35	REDUC	8.591	0,29	0,244696
36	REDUC	8.581	0,36	0,248136
37	REDUC	8.503	0,42	0,274968
38	REDUC	8.541	0,29	0,261896
39	REDUC	8.549	0,36	0,259144
40	REDUC	8.600	0,27	0,2416
41	REDUC	8.852	0,21	0,154912
42	REDUC	8.839	0,28	0,159384
43	REDUC	8.681	0,18	0,213736
44	REDUC	8.616	0,22	0,236096
45	REDUC	8.670	0,27	0,21752
46	REDUC	8.764	0,17	0,185184
47	REDUC	8.781	0,14	0,179336
48	REDUC	8.701	0,21	0,206856
49	REDUC	8.722	0,34	0,199632
50	REDUC	8.600	0,38	0,2416
51	REDUC	8.760	0,26	0,18656
52	REDUC	8.665	0,44	0,21924
53	REDUC	8.744	0,21	0,192064
54	REDUC	8.736	0,23	0,194816

Continuação da Tabela 6 - Valores utilizados do PCI e teor de cinzas do coque verde de petróleo e análise de regressão linear

55	REDUC	8.804	0,26	0,171424
56	REDUC	8.702	0,27	0,206512
57	REDUC	8.640	0,34	0,22784
58	REDUC	8.575	0,17	0,2502
59	REDUC	8.641	0,15	0,227496
60	REDUC	8.685	0,16	0,21236
61	REDUC	8.588	0,22	0,245728
62	REDUC	8.580	0,12	0,24848
63	REDUC	8.660	0,20	0,22096
64	REDUC	9.400	0,08	-0,0336
65	REDUC	8.716	0,11	0,201696
66	REDUC	8.677	0,13	0,1986
67	REDUC	8.764	0,14	0,19344
68	REDUC	8.712	0,17	0,201696
69	REDUC	8.681	0,26	0,215112
70	REDUC	8.685	0,10	0,185184
71	REDUC	8.822	0,14	0,203072
72	REDUC	8.622	0,08	0,185184
73	REDUC	8.650	0,14	0,203072
74	REDUC	8.687	0,19	0,213736
75	REDUC	8.690	0,20	0,21236
76	REDUC	8.681	0,07	0,165232
77	REDUC	8.664	0,19	0,234032
78	REDUC	8.723	0,20	0,2244
79	REDUC	8.775	0,14	0,211672
80	REDUC	8.832	0,19	0,21064
81	REDUC	8.788	0,21	0,213736
82	REDUC	8.735	0,16	0,219584
83	REDUC	8.855	0,13	0,199288

Continuação da Tabela 6 - Valores utilizados do PCI e teor de cinzas do coque verde de petróleo e análise de regressão linear

84	REDUC	8.779	0,10	0,1814
85	REDUC	8.673	0,08	0,161792
86	REDUC	8.838	0,12	0,176928
87	REDUC	8.770	0,14	0,19516
88	REDUC	8.815	0,10	0,15388
89	REDUC	8.812	0,18	0,180024
90	REDUC	8.808	0,22	0,216488
91	REDUC	8.703	0,07	0,159728
92	REDUC	8.770	0,21	0,18312
93	REDUC	8.815	0,18	0,16764
94	REDUC	8.812	0,19	0,168672
95	REDUC	8.808	0,14	0,170048
96	REDUC	8.703	0,16	0,206168
97	REDUC	8.625	0,24	0,233
98	REDUC	8.799	0,21	0,173144
99	REDUC	8.702	0,18	0,206512
100	REDUC	8.724	0,11	0,198944

Fonte: AUTORA, 2018.

Com os valores obtidos determinou-se o coeficiente de correlação Parson e ajustou o modelo de regressão linear.

6.2.1. Análise de regressão dos valores obtidos

Estimou-se o ajuste do modelo de regressão linear tendo o teor de cinzas como variável resposta e o PCI como variável regressora.

Segundo a equação de regressão, a cada 1grama de PCI há uma redução na formação de cinzas de 0,0344%.

O coeficiente de determinação obtido $R-SQ= 30,5\%$, é a medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra, o valor obtido é significativo, o modelo é explicativo e se ajusta a amostra.

Já o $R-SQ (adj) = 29,8\%$ modelo ajustado, é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores do modelo em relação ao número de observações. Isso significa que a equação explica 29,8% das cinzas, o que permite estimar o modelo. Esse coeficiente obtido permite relacionar o PCI com a formação de cinzas, sendo que quanto maior o PCI menor será a formação de cinzas.

7. CONCLUSÃO

O coque verde de petróleo, subproduto do petróleo, é o combustível mais utilizado em fornos de calcinação. As grandes indústrias de calcinação utilizam matéria-prima e tecnologia de qualidade para fabricar um produto com alto padrão. Por isso quando se trata da geração de energia para a combustão dos fornos de calcinação, a escolha é o coque verde de petróleo devido ao seu alto poder calorífico. O trabalho apresentou isso de forma aprofundada e por isso seus objetivos principais foram alcançados.

Para manter o forno funcionando com desempenho máximo é preciso que o equipamento esteja em boas condições e que o combustível utilizado esteja dentro dos padrões específicos e por isso os resultados apresentados no trabalho são relevantes.

O primeiro objetivo do trabalho, correlacionar à formação de cinzas com o PCI do coque verde de petróleo obteve resultados satisfatórios, pois, apresentou valores que comprovaram que quanto maior o PCI menor será a formação de cinzas.

O teste de hipóteses realizado para confirmar se o PCI do coque verde de petróleo de dois fornecedores da empresa possui valores iguais, também foi comprovado, mostrando que não existe diferença significativa entre os mesmos, o que garante há empresa segurança para com seus fornecedores.

A pesquisa também demonstrou a importância dos métodos estatísticos de análises, pois, foram eles os responsáveis por comprovar todas as hipóteses criadas no trabalho.

A realização da pesquisa tornou-se relevante e importante para a pesquisadora, e também para as indústrias que utilizam o coque verde de petróleo como combustível, não sendo limitada apenas para as indústrias calcinadoras.

REFERÊNCIAS

ABREU, S. F. **Recursos Minerais do Brasil**: minerais não metálicos. 2 ed. Rio de Janeiro: Biblioteca Geográfica Brasileira, 1965. 505 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Carvão Mineral**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-carvao(2).pdf)>. Acesso em: 07 de abril de 2018.

ASSIS, P.S. et al. **Injeção de materiais diversos em altos-fornos**. ABM, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6471**: Cal virgem e cal hidratada – Retirada e preparação de amostra – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. **A cal e suas aplicações**. Disponível em: <http://www.abpc.org.br>. Acesso em: 08 de abril de 2018

AURÉLIO, B. H. F. **Novo Dicionário Aurélio**: Século XXI. Nova Fronteira, 2000. 2128 p.

BARBOSA, E. M. **Testes de hipótese e aplicações**. 2014. 31 p. Universidade Estadual da Paraíba. Centro de Ciência e Tecnologias. Departamento de Estatísticas. Campina Grande, 2014.

CAVALCANTI, C. et al. **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil, 1994. p. 262. Disponível em: <<http://168.96.200.17/ar/libros/brasil/pesqui/cavalcanti.rtf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2018.

CHANG, R. **Química**. 5 ed. Portugal: McGraw-Hill, 1994.

COMERCIAL AMEF LTDA. **Produtos**. 2018. Disponível em: <<http://www.amef.com.br/produtos.htm>>. Acesso em: 9 de junho de 2018.

DAVIS, B. B.; MUKAMAL, K. J. **Statistical Primer for Cardiovascular Research**. 2006. p. 1078-1082. Circulation. 2006.

FILHO, J. A; SCIPIÃO, T. T. **Nota Técnica 9**: Panorama geral do setor mineral cearense. Governo do Estado do Ceará, SEPLAN, IPECE. Fortaleza, 2004.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. São Paulo: Pini, 1998.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

KASMIER, L. J. **Estatística aplicada à economia e a administração**. 1 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

Ministério da Fazenda. **SAIN** – Secretaria de Assuntos Internacionais. Disponível em: <<http://www.sain.fazenda.gov.br/assuntos/politicas-institucionais-economico-financeiras-e-cooperacao-internacional/ocde>>. Acesso em: 10 de março de 2018.

Ministério de Minas e Energia. **Diretrizes de Política de Agroenergia**. 2006-2011. Disponível em: <www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/programa/agroenergia/Diretrizes_de_Politica_de_Agroenergia.pdf>. Acesso em: 07 de abril de 2018.

MINITAB. 2018. Disponível em: <<http://www.minitab.com/pt-br/>>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. 1ed. Belo Horizonte, 2007.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. O.; OLIVEIRA, R. A. **Controle de qualidade da cal para argamassas: metodologias alternativas**. UNICAP, Pernambuco, 2007.

PAR INSTRUMENT COMPANY. **6400 Automatic Isoperibol Calorimeter**. 2018. Disponível em: <<https://www.parrinst.com/products/oxygen-bomb-calorimeters/6400-automatic-isoperibol-calorimeter/>>. Acesso em: 5 de junho de 2018.

PETROBRÁS. **Carbono 2007**. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/premiotecnologia/pdf/carbono2007.pdf>>. Acesso em: 18 de março de 2018.

PETROBRÁS. **Coque verde de petróleo**. Disponível em: <<http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-industrias/coqueverdedepetroleo>>. Acesso em: 18 de março de 2018.

PRATES, C. P. T. et al. **Evolução da oferta e da demanda de gás natural no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDS Setorial, 2006. p. 35-68.

REIS, L. B.; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 2.ed. Editora Manole Ltda, 2012.

SCUDINO, P. A. **Utilização de alguns testes estatísticos para análise da variabilidade do preço do mel nos municípios de Angra dos Reis e Mangaratiba**. 2008. 51 p. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2008.

SIEGEL, Sidney. **Estatística Não-paramétrica para as ciências do comportamento**. 1975. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

SILVA, J. O. **Ministério de Minas e Energia: Perfil da Cal**. 2009.

SPEIGHT, J. G. **New approaches to hydroprocessing**: Catalysis Today. Vol. 98, 2004.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. **O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas**. Revista Brasileira de Energia, Vol. 14, 2008.

VECCHIA, Rodnei. **O meio ambiente e as energias renováveis instrumento de liderança visionária para a sociedade sustentável**. 1.ed. Editora Manole Ltda, 2010.