



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**LUCAS SILVA SYDRIÃO**

**COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO DO CEARÁ: AVALIAÇÃO  
DO POTENCIAL DE USO DE PNEUS INSERVÍVEIS E RESÍDUOS DE BIOMASSA**

**FORTALEZA**

**2018**

LUCAS SILVA SYDRIÃO

COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO DO CEARÁ: AVALIAÇÃO DO  
POTENCIAL DE USO DE PNEUS INSERVÍVEIS E RESÍDUOS DE BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S982c Sydrião, Lucas Silva.  
Coprocessoamento na indústria de cimento do ceará : avaliação do potencial de uso de pneus inservíveis e resíduos de biomassa / Lucas Silva Sydrião. – 2018.  
47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

1. Coprocessoamento. 2. Resíduos. 3. Indústria de cimento. I. Título.

CDD 660

---

LUCAS SILVA SYDRIÃO

COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO DO CEARÁ: AVALIAÇÃO DO  
POTENCIAL DE USO DE PNEUS INSERVÍVEIS E RESÍDUOS DE BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Química do Centro de  
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em: 21/06/2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profª. Dra. Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. João José Hiluy Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Otto e Lúcia.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente a Deus, por ter me concedido saúde, força e disposição. Sem ele, nada disso seria possível.

Aos meus pais, Lúcia e Otto, por todo o amor que me deram, além da educação, ensinamentos e apoio. Obrigado por estarem sempre ao meu lado!

A minha irmã, Ana Karine, por sempre me apoiar e incentivar.

A todos os amigos que me acompanharam durante todo esse percurso árduo, compartilhando as dores e sofrimentos, mas também as alegrias.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti, pelo o tempo que dedicou a me ajudar durante o processo de realização deste trabalho.

Ao Programa Ciências sem Fronteiras, pelo intercâmbio possibilitado e de grande relevância para minha formação pessoal e acadêmica.

À Universidade Federal do Ceará, pela estrutura fornecida que possibilitou meu aprendizado.

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista dos seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser vitoriosa.”

(Albert Einstein)

## RESUMO

O coprocessamento de resíduos representa uma alternativa de destinação final de diversos tipos de resíduos industriais devido ao fato de consistir em uma forma de descarte mais adequada do ponto de vista ambiental. A indústria cimenteira carece de grandes quantidades de combustível durante o processo de produção do cimento, e beneficia-se da necessidade de descarte de resíduos de outras indústrias em virtude de ter meios eficazes para efetuar a destruição desses ao mesmo tempo em que os utiliza como combustível complementar, além de potencialmente poder aproveitar o resíduo como matéria-prima alternativa. Este estudo foi realizado a fim de analisar o potencial de uso de pneus inservíveis e de biomassas, casca de arroz e casca de coco babaçu, para fins de coprocessamento em indústrias de cimento no estado do Ceará. Entre os objetivos do estudo estão: realizar uma revisão do processo de fabricação do cimento e avaliar o panorama da indústria de cimento nacional e estadual, comparar características entre os resíduos estudados e combustíveis fósseis tradicionais usados na indústria e verificar a viabilidade de uso dos resíduos estudados nas fábricas de cimento do Ceará.

**Palavras-chave:** Coprocessamento. Resíduos. Indústria de cimento.



## **ABSTRACT**

The co-processing of residues represents an alternative to the final disposal of several types of industrial waste due to the fact that it consists in a more adequate form of disposal from an environmental point of view. The cement industry requires large amounts of fuel for the cement production process, and benefits from the need of waste disposal by other industries due to having the means to effectively provide the destruction of such waste at the same time that it uses them as complementary fuel, in addition to being able to use the waste as an alternative raw material. This study was carried out in order to analyze the potential of using unserviceable tires and biomass, rice husk and babassu bark, for co-processing purposes in cement industries in the state of Ceará. Among the objectives of the study are: to carry out a review of the cement manufacturing process and to evaluate the panorama of the cement industry, state and nationwide; compare technical features between the residues studied and traditional fossil fuels used in the industry, and verify the feasibility of using the residues studied at cement factories in the state of Ceará.

**Keywords:** Co-processing. Residues. Cement Industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do processo de produção de cimento.....	22
Figura 2 – Forno rotativo de clínquer.....	24
Figura 3 – Resfriador Satélite.....	25
Figura 4 – Resfriador de Grelha.....	25
Figura 5 – Unidades de Coprocessamento no Brasil.....	29

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Principais Matérias Primas Alternativas Usadas no Brasil.....	21
Gráfico 2 – Perfil de uso de combustíveis alternativos na indústria de cimento brasileira.....	21
Gráfico 3 – Índice de Substituição Energética.....	30
Gráfico 4 – Produção por ano da safra e produto (Toneladas) - Arroz em Casca - Safra 2017.....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites Máximos de Emissão.....	19
Tabela 2 – Resíduos similares a matérias-primas para produção de cimento.....	20
Tabela 3 – Produção Nacional de Cimento por Região (toneladas).....	28
Tabela 4 – Resultados de análise de coque de petróleo.....	32
Tabela 5 – Características dos combustíveis.....	33
Tabela 6 – Veículos por Tipo no Estado do Ceará.....	37
Tabela 7 – Análise da Composição das Cinzas da Casca de Arroz.....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferro-aluminato tetra cálcico
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
Al	Alumínio
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
As	Arsênio
Be	Berílio
C	Carbono
Ca	Cálcio
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de cálcio
CaO	Óxidos de cálcio
$\text{CaSO}_3$	Sulfito de cálcio
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de cálcio
CE	Ceará
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CO	Monóxido de carbono
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
EVQ	Estudo de Viabilidade de Queima
Fe	Ferro
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro
HCL	Ácido clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
Hg	Mercúrio
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará

K	Potássio
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de potássio
kg	Kilograma
kJ	Kilojoules
LSPA	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
MgO	Óxidos de magnésio
MJ	Megajoule
mm	Milímetro
Mn	Manganês
MP	Material Particulado
Na	Sódio
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PTQ	Plano de Teste de Queima
S	Enxofre
Sb	Antimônio
Se	Selênio
Si	Silício
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
Sn	Estanho
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SPL	Spent Pot Liner
Te	Telúrio
THC	Hidrocarbonetos Totais
Ti	Titânio
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Coprocessamento na Indústria do Cimento.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.1</b>	<i>Legislação.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.2</b>	<i>Utilização de Resíduos na Indústria de Cimento.....</i>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Processo de Produção de Cimento.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Casca de Arroz.....</b>	<b>26</b>
<b>3.4</b>	<b>Coco Babaçu.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5</b>	<b>Pneus Inservíveis.....</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Panorama da Indústria Cimenteira.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.1</b>	<i>Perfil de Produção.....</i>	<b>28</b>
<b>4.1.2</b>	<i>Aproveitamento Energético em Fornos de Clínquer.....</i>	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização de Combustíveis Convencionais na Indústria do Cimento.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.1</b>	<i>Definições para Cinzas, Voláteis e Poder Calorífico.....</i>	<b>31</b>
<b>4.2.1.1</b>	<i>Teor de Cinzas.....</i>	<b>31</b>
<b>4.2.1.2</b>	<i>Teor de Voláteis.....</i>	<b>31</b>
<b>4.2.1.3</b>	<i>Poder Calorífico.....</i>	<b>31</b>
<b>4.2.2</b>	<i>Coque de Petróleo.....</i>	<b>32</b>
<b>4.2.3</b>	<i>Carvão Mineral.....</i>	<b>32</b>
<b>4.2.4</b>	<i>Carvão Vegetal.....</i>	<b>33</b>
<b>4.2.5</b>	<i>Óleo Combustível.....</i>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Pneus Inservíveis.....</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Casca de Arroz.....</b>	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Coco Babaçu.....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>41</b>





## 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos é atualmente um dos principais desafios enfrentados pela indústria. Conseqüentemente, a busca por alternativas que representem um modelo de gestão satisfatório que seja capaz de providenciar a destinação adequada desses resíduos é de extrema importância. Nesse contexto, o coprocessamento se apresenta como uma solução sustentável e adequada tanto do ponto de vista ambiental, já que é dada uma destinação final aos resíduos, quanto do ponto de vista econômico, já que os resíduos são incorporados a um processo produtivo, podendo representar uma redução de custos significativa ao processo.

No Brasil, as primeiras iniciativas ligadas ao coprocessamento foram implementadas no início da década de 90, porém, há quase 40 anos que essa técnica é amplamente utilizada na Europa, Estados Unidos e Japão, devido à necessidade crescente de realizar uma destinação final adequada de resíduos, muitas vezes perigosos, provenientes de diversas indústrias.

A indústria do cimento possui condições favoráveis para realizar o descarte de resíduos ao mesmo tempo em que os reaproveita como combustível ou matéria prima alternativa. Durante a produção de cimento, as altas temperaturas do forno de clínquer, ambiente alcalino e alto tempo de residência de gases, asseguram a completa destruição de resíduos, sem mudanças na qualidade do cimento produzido e geração de novos passivos ambientais.

O processo de produção de clínquer, principal constituinte do cimento, requer um alto consumo de energia térmica, logo, existe uma constante busca por fontes de energia que possam substituir parcialmente os combustíveis fósseis utilizados, de forma a diminuir os custos e reduzir as emissões de poluentes para a atmosfera. Desta forma, o coprocessamento configura uma maneira de aproveitar o potencial energético presente em resíduos.

Tendo em vista o reaproveitamento energético, a avaliação de resíduos que podem ser coprocessados na indústria cimenteira é um tema de bastante relevância. Buscando mensurar a aplicação desse conceito em indústrias de cimento no Ceará, foram analisados os resíduos: pneus inservíveis, casca de arroz e casca de coco babaçu. As análises foram referentes à sua disponibilidade no estado e região, com o intuito de avaliar sua viabilidade de uso em cimenteiras cearenses.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a viabilidade de uso de pneus inservíveis, casca de arroz e casca de coco babaçu para fins de coprocessamento em indústrias de cimento no estado do Ceará.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Expor características dos resíduos avaliados;
- b) Levantar dados quanto à disponibilidade dos resíduos no estado e região;
- c) Avaliar se a quantidade disponível de resíduos justifica seu uso em indústrias de cimento no Ceará.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Coprocessamento na Indústria do Cimento

O crescimento populacional e o avanço tecnológico contribuem para uma maior geração de resíduos, visto que muitos produtos atingem um estado de obsolescência precoce e são descartados antes do final de sua vida útil (SELLITTO et al., 2013). Além disso, a produção industrial acelerada de diferentes setores tem produzido uma quantidade elevada de resíduos. Assim, o gerenciamento destes representa um dos maiores desafios para a sociedade contemporânea.

Tendo em vista o manejo adequado de materiais inservíveis e passivos ambientais, o coprocessamento é uma alternativa interessante, tanto do ponto de vista econômico, quanto do ponto de vista ambiental. Essa técnica reintroduz o resíduo em um processo produtivo, utilizando-o como matéria prima ou combustível em indústrias com capacidade de realizar sua destinação final. Desta forma, o coprocessamento pode gerar uma redução de custo significativa tanto para quem recebe o resíduo, tanto para quem o descarta.

A indústria do cimento apresenta condições favoráveis para realizar a destinação final de diversos tipos de resíduo. A concepção tecnológica do coprocessamento em cimenteiras é baseada na queima de resíduos no forno rotativo de clínquer. Segundo Rocha, Lins e Santo (2011, p. 2),

Os resíduos são processados nos fornos rotativos devidos às condições específicas do processo, como alta temperatura, ambiente alcalino, atmosfera oxidante, ótima mistura de gases e produtos, e tempo de residência (> 2 segundos) geralmente suficiente para a destruição de resíduos perigosos. Por outro lado, a utilização desses combustíveis alternativos no processo de produção de clínquer possui limitações como as relacionadas ao volume de combustível secundário que alimenta o forno, e limitações ligadas à segurança ambiental.

##### 3.1.1 Legislação

A resolução CONAMA nº 264 de 1999 determina os procedimentos, critérios e aspectos técnicos específicos sobre licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.

Conforme a resolução, resíduos são aqueles que se apresentam nos estados sólido, semissólido ou líquido, não passíveis de tratamento convencional, resultantes de atividades

humanas. Fica também estabelecido que o termo resíduo compreende um único tipo de resíduo ou a mistura (blend) de vários. É definido que os estabelecimentos que manipulam essa mistura são denominados de unidades de mistura e pré-condicionamento.

O processo de licenciamento é fundamentado com base nos estudos:

- Estudo de Viabilidade de Queima – EVQ: estudo teórico que visa avaliar a compatibilidade do resíduo a ser coprocessado com as características operacionais do processo e os impactos ambientais decorrentes desta prática;
- Plano de Teste em Branco: plano que contempla dados e procedimentos relacionados com a operação da unidade sem a alimentação de resíduos;
- Relatório de Teste em Branco: apresentação do relatório conclusivo do teste, contemplando a verificação dos itens previstos no Plano de Teste em Branco;
- Plano de Teste de Queima – PTQ: plano que contempla dados, cálculos e procedimentos relacionados com as operações de coprocessamento propostas para o resíduo;
- Relatório de Teste de Queima: apresentação do relatório conclusivo do teste, contemplando a verificação dos itens previstos no Plano de Teste de Queima;
- Análise de Risco: avaliação dos riscos decorrentes tanto de emissões acidentais como de emissões não acidentais.

Tabela 1 - Limites Máximos de Emissão

POLUENTE	LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÃO
HCL	1,8 kg/h ou 99% de redução
HF	5 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
CO*	100 ppmv corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
MP	70 mg/Nm <sup>3</sup> farinha seca corrigido a 11% de O <sub>2</sub> (base seca)
THC (expresso como propano)	20 ppmv corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
Mercurio (Hg)	0,05 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
Chumbo (Pb)	0,35 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
Cádmio (TI)	0,10 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)	7,0 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)

\* As concentrações de CO na chaminé não poderão exceder a 100 ppmv em termo de média horária.

Fonte: Resolução CONAMA nº 264

A norma exige que o produto final resultante da utilização de resíduos não agregue substâncias ou elementos em quantidade que possam afetar a saúde humana e o meio ambiente. Também há a necessidade de efetuar o monitoramento de emissões durante o processo, não podendo ser ultrapassados os limites máximos de emissão estabelecidos (Tabela 1), tanto no Teste em Branco quanto no Teste de Queima. Os limites de emissão dos poluentes podem ser mais restritivos, a critério do órgão ambiental local.

### 3.1.2 Utilização de Resíduos na Indústria de Cimento

Conforme a sua composição e características, resíduos podem ser utilizados com diferentes finalidades. Em geral, nas fábricas de produção de cimento, são usados resíduos que possam agir como substitutos parciais de matéria prima, desde que apresentem características similares as dos componentes normalmente empregados na produção, ou como substitutos de combustível, desde que o ganho de energia seja comprovado.

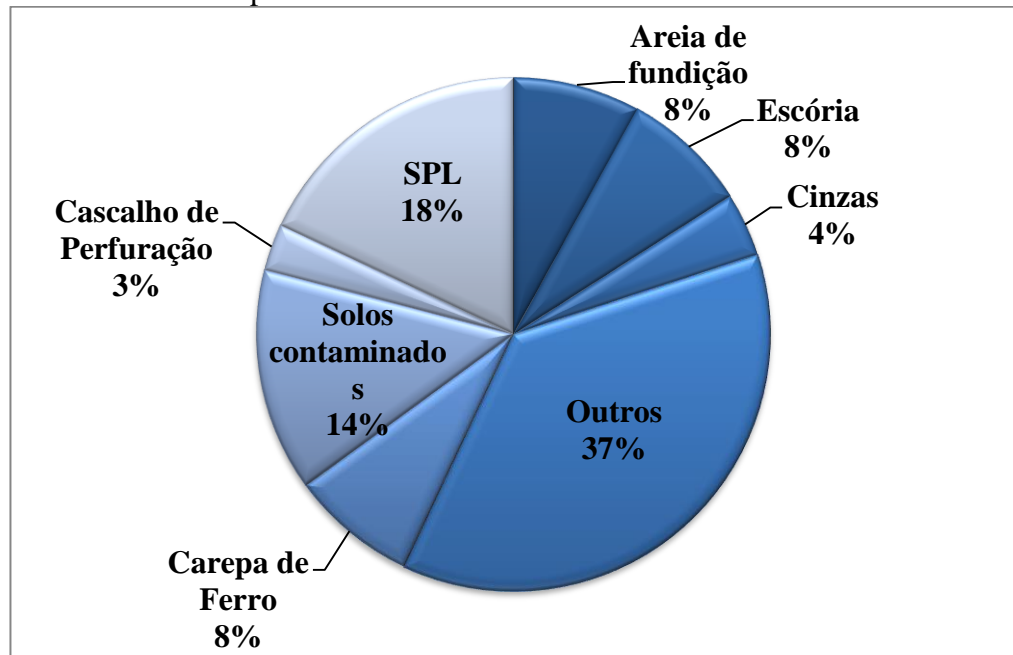
O uso de resíduos como substituinte de matéria prima não pode ser aleatório, e deve, obrigatoriamente, respeitar a similaridade de composição química entre ambos (SIQUEIRA, 2005). A Tabela 2 apresenta alguns resíduos que podem atuar como substitutos parciais de matéria prima em processos de produção de cimento.

Tabela 2 – Resíduos similares a matérias-primas para produção de cimento

<b>Matéria prima</b>	<b>Resíduos</b>
Compostos de Cálcio	Cal de indústria
	Lama de cal
	Lama de carbonato
	Lama industrial
	Lama de tratamento de água potável
Compostos de Silício	Areia usada de fundição
	Areia de cromo
	Microsílica
Compostos de Ferro	Abrandamento da sílica
	Lama vermelha da fabricação de Alumínio
	Escória de Estanho
	Matéria particulado de Conversor
	Isca de laminação
Compostos de Al-Si-Ca	Cinzas da queima e pedra de carvão e carvão fóssil
	Escória de fósforo
	Areia de branqueamento
	Restos de processamento de pedra natural
Compostos de Enxofre	Gesso de dessulfuração de gases
	Gesso químico

Fonte: (LIEBL e GERGER, 1993 *apud* SIQUEIRA, 2005)

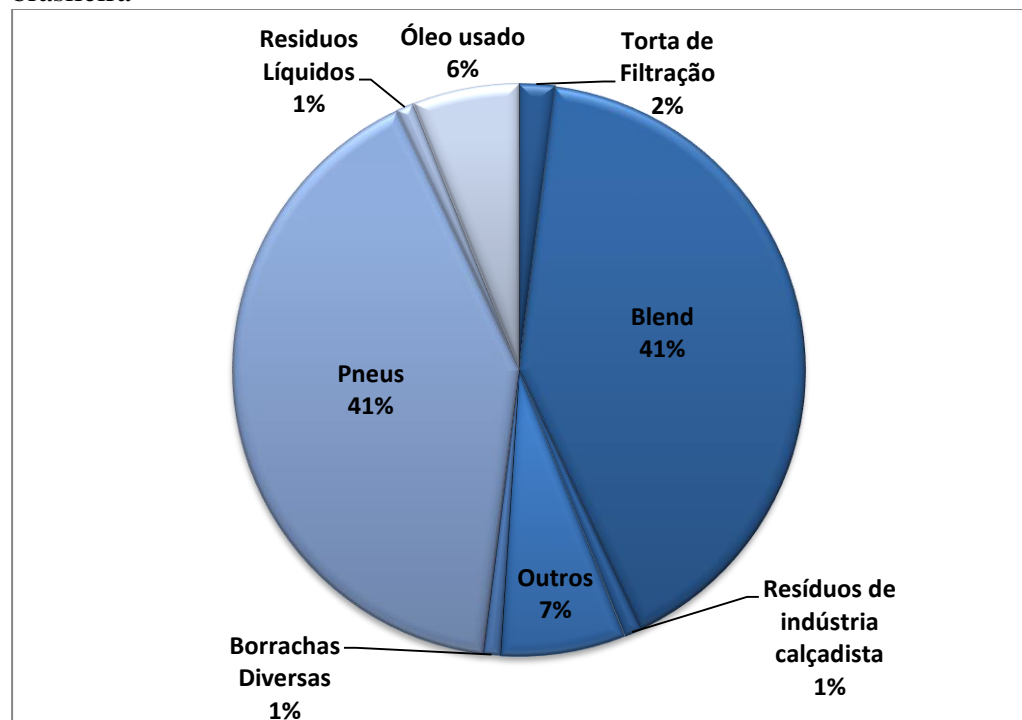
Gráfico 1 – Principais Matérias Primas Alternativas Usadas no Brasil



Fonte: ABCP, 2016

No Brasil, dos substitutos de combustíveis, destaca-se o uso de pneus inservíveis e do blend de resíduos, que representaram 82% do total em toneladas em 2015, como se pode observar no Gráfico 2. (ABCP, 2016)

Gráfico 2 – Perfil de uso de combustíveis alternativos na indústria do cimento brasileira



Fonte: ABCP, 2016

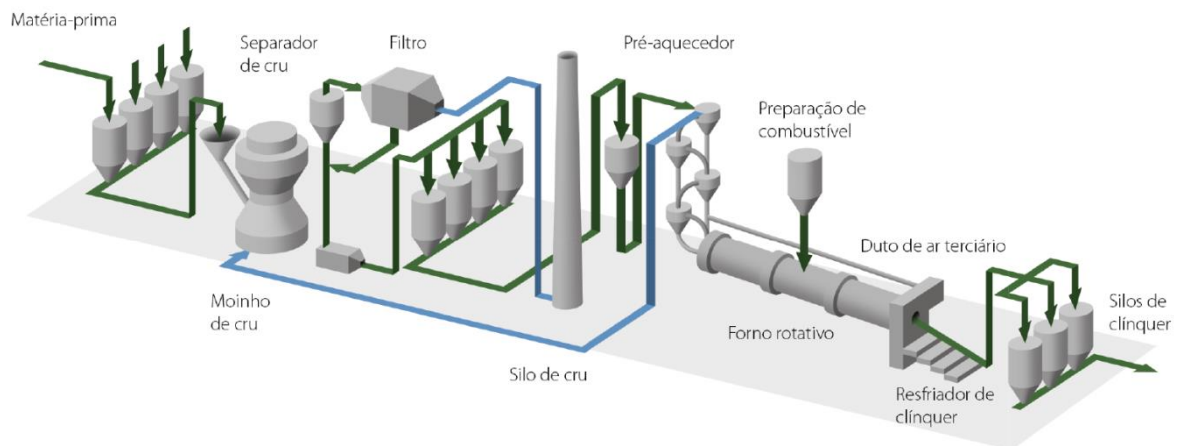
### 3.2 Processo de Produção de Cimento

Uma vez que o objetivo deste estudo está focado na aplicação da técnica do coprocessamento em indústrias cimenteiras, se faz necessário detalhar o processo de produção do cimento, para que se haja um maior entendimento da operação.

O cimento Portland, geralmente conhecido na construção civil apenas como cimento, é um material na forma de um pó fino da ordem de 50  $\mu\text{m}$ , formado por 97% de clínquer e 3% de gesso, que atua como um aglomerante e endurece quando misturado com água. Depois de endurecido, mesmo perante contato com a água, não há alteração em sua estrutura (PAULA, 2009).

O clínquer, principal constituinte do cimento, é produzido através de uma transformação térmica a elevadas temperaturas (da ordem de 1450°C) de uma mistura rochosa pulverizada, realizada em fornos rotativos. A mistura, denominada de farinha ou cru, contém aproximadamente 80% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), 15% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), 3% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e proporções menores de outros constituintes, como o ferro e enxofre (PAULA, 2009). A Figura 1 apresenta um diagrama geral do processo de produção do cimento.

Figura 1 – Diagrama do processo de produção de cimento



Fonte: Kalenborn International

Existem duas principais rotas para a produção de clínquer: a via úmida e a via seca. Na via úmida, durante o processo de moagem e homogeneização, a matéria prima é moída juntamente com água, sendo fornecida ao forno de clínquer na forma de lama ou pasta. Neste caso, é necessário fornecer energia em excesso para que primeiro ocorra a evaporação

de água contida na matéria prima. Nos fornos de via seca, não é adicionada água na matéria prima que é fornecida ao forno na forma de farinha.

Existem ainda processos intermediários chamados de via semiúmida e semisseca. Enquanto que os processos de via úmida necessitam de valores de energia térmica acima de 5000 MJ por tonelada de clínquer, um processo por via seca pode consumir somente 3000 MJ por tonelada de clínquer produzido (SILVA, 1994). Os processos por via semiúmida e semisseca possuem consumos de energia intermediários em relação aos dois extremos. Devido à ineficiência energética, processos de via úmida tendem a ser abandonados. No Brasil, toda a produção de cimento Portland é realizada em fornos de via seca. (PAULA, 2009). Desta forma, será dada ênfase nesse tipo de instalação.

Em sistemas de via seca, a matéria prima, composta principalmente de calcário e argila, é primeiramente moída de forma grosseira e misturada com outros materiais, como minério de ferro, alumina, areia, etc, com o intuito de obter uma composição otimizada para a produção de clínquer. Essa mistura homogeneizada é armazenada em silos (cobertos ou fechados), ou em pilhas a céu aberto. A matéria prima é então encaminhada para a moagem, realizada em moinhos de cru, onde ocorre uma mistura com gases provenientes do forno, proporcionando um melhor aproveitamento energético desses. Estes gases servem também para arrastar o material já moído, conduzindo a farinha para sistemas de separação e despoeiramento, onde os gases são expelidos para o exterior, pela chaminé, e a matéria prima é encaminhada ao forno para tratamento térmico.

Com a finalidade de aumentar a eficiência energética e a capacidade de processamento de matéria prima, atuais sistemas de produção de clínquer possuem pré-aquecedores que permitem a evaporação completa da água e o início do processo de calcinação da farinha antes da entrada no forno. O pré-aquecedor é constituído por uma torre de ciclones montados em cascata, na vertical, por onde a farinha que entra pela parte superior descende em contracorrente com os gases provenientes da queima no forno rotativo.

Nesse sistema, existe uma mistura entre matéria prima e gases de combustão que propicia uma troca de calor eficaz. Os gases entram pela base da torre com temperaturas acima de 800°C e saem no topo com temperaturas da ordem de 300°C. Desta forma, quando a farinha entra no forno rotativo, ela já se encontra com aproximadamente 30% de calcinação efetuada (RAMOS, 2015).

A matéria prima é então submetida ao forno, exemplificado na Figura 2, onde passa pelo processo de aquecimento que leva a produção do clínquer. Ao entrar no forno, a temperaturas de 500 a 900°C, ocorre o processo de descarbonatação do calcário, também



conhecido na indústria como calcinação. Durante a calcinação, verifica-se a dissociação de óxidos de cálcio (CaO) e óxidos de magnésio (MgO), provenientes do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e carbonato de magnésio (MgCO<sub>3</sub>) da matéria prima, junto com a liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Em seguida, a temperaturas entre 850 e 1200°C, é realizada a reação entre os óxidos de cálcio e substâncias sílico-aluminosas, formando produtos constituídos por silicatos dicálcicos (2CaO.SiO<sub>2</sub>), aluminatos tricálcicos (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e ferro-aluminatos tetra cálcicos (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ao final, a temperaturas entre 1200 e 1450°C ocorre a formação de silicatos tricálcicos (3CaO.SiO<sub>2</sub>), processo conhecido como sinterização. A formação final do clínquer se dá ao atingir a temperatura de 1450°C, seguida de um brusco resfriamento (RAMOS, 2015).

Figura 2 – Forno rotativo de clínquer



Fonte: China Henan Fote Heavy Mining Machinery Co.

O clínquer deixa o forno com uma temperatura acima de 1400 °C e necessita ser resfriado rapidamente, de forma a fixar suas propriedades termodinâmicas e facilitar o seu manuseio. Esse resfriamento é geralmente realizado em resfriadores satélite (em sistemas sem pré-aquecedores) ou de grelhas (em sistemas com pré-aquecedores).

Resfriadores satélite (Figura 3) são formados por um conjunto de cilindros acoplados paralelamente a parte final do forno de clínquer, onde ar fresco oriundo do exterior

é utilizado para resfriar o produto. O ar aquecido no processo irá servir de comburente no queimador existente na extremidade do forno, possibilitando uma recuperação parcial energética.

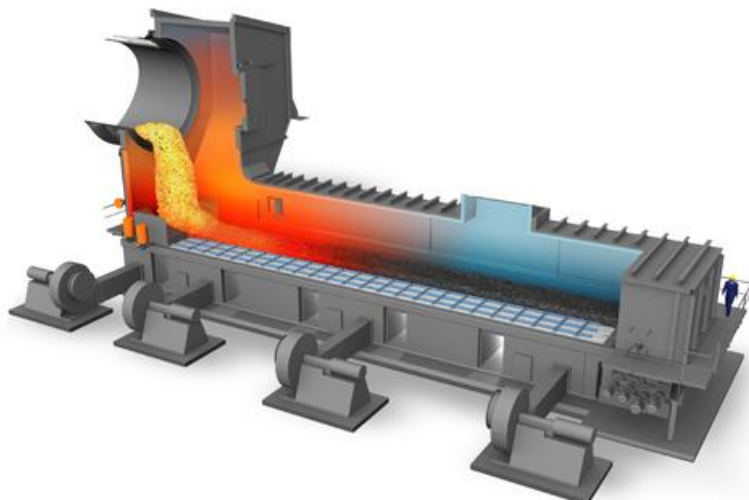
Figura 3 – Resfriador satélite



Fonte: Estanda Coolers

Já resfriadores de grelha (Figura 4), possuem grades fixas por onde o clínquer é deslocado por ação de pratos que deslizam sob as grades. O resfriamento se dá através de ar insuflado por entre as grelhas, proveniente de compartimentos separados existentes por baixo. Tais compartimentos permitem a existência de duas zonas: uma zona de recuperação, em que o ar aquecido, vai servir de ar secundário para combustão no queimador principal do forno rotativo, e uma zona de pós-resfriamento, onde ar excedente esfria o clínquer a temperaturas mais baixas, e posteriormente serve de ar terciário para a combustão nos pré-aquecedores (Paula, 2009).

Figura 4 – Resfriador de Grelha



Fonte: FLSmidth

Após o resfriamento, o clínquer é transportado para silos onde é estocado e posteriormente misturado e moído com gesso e outros aditivos, que permitem a obtenção de cimentos de diferentes características.

### **3.3 Casca de Arroz**

A casca do arroz é o subproduto mais expressivo gerado no beneficiamento do arroz em casca, e representa cerca de 20% da massa do grão (PANDEY; SOCCOL; MITCHELL, 2010). Segundo Gurgel (2012), a casca de arroz é um material fibroso, cujos maiores constituintes são celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%). O resíduo inorgânico contém, em média, 95% a 98%, em massa, de  $\text{SiO}_2$ .

Devido à intensa produção de arroz, principalmente na região sul do país, o volume de casca produzido é bem elevado. Um destino a ser considerado para o resíduo é a compostagem, porém o tempo que a casca de arroz leva para se decompor pode chegar a cinco anos. Além disso, a casca apresenta uma baixa densidade, o que resulta em um grande volume (MANIQUE, 2011).

Em função do elevado poder calorífico, a casca de arroz tem sido utilizada como biomassa na alimentação de caldeiras para geração de energia e/ou vapor, o que reduz o impacto ambiental causado pela destinação do resíduo, além de contribuir para a redução da dependência dos derivados de petróleo (KIELING, 2009).

### **3.4 Coco Babaçu**

O babaçu é uma palmeira brasileira de grande porte, com cerca de 20 metros de comprimento, estando concentrada nas regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste. Com produtividade de até seis cachos de frutos por palmeira, por temporada, os cachos produzem de 15 a 25 frutos. A safra é feita de agosto a janeiro limitando o período de colheita (DAHMER et al, 2012; TEIXEIRA, 2002).

O coco babaçu é composto pelo epicarpo, chamado de casca, representando 12,6% do peso do fruto; mesocarpo, camada marrom-clara localizada depois do epicarpo, correspondente a 20,4% do peso; endocarpo, camada escura que envolve as amêndoas, representando 58,3% do fruto; e as amêndoas, correspondendo a 8,7% do peso do fruto seco (CARRAZZA, 2012).

Segundo Protásio (2014), o babaçu é explorado pela extração de seu óleo presente nas amêndoas para o uso em cosméticos e em produtos para a alimentação, sendo que a casca é um dos resíduos do procedimento da quebra manual. Esse resíduo apresenta uma perspectiva promissora para a destinação da biomassa, especialmente para a produção de carvão vegetal em siderúrgicas.

Os elementos da casca do babaçu apresentam um potencial calórico semelhante aos de outras biomassas, como eucalipto e a cana-de-açúcar. A quantidade de biomassa de babaçu pouco tem a agregar a matriz energética nacional, em função disto a definição para a exploração do potencial energético desta cultura é uma questão regional (DAHMER et al, 2012).

### **3.5 Pneus Inservíveis**

Quando um pneu atinge o fim de sua vida útil, ele torna-se um resíduo inerte, conforme classificação da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) em sua NBR 10.004/04, e deve ser corretamente descartado. Este pneu, agora denominado “inservível”, constitui uma fonte de preocupação ambiental moderna, devido, principalmente, à elevada quantidade descartada nos últimos anos, decorrência direta do crescimento da frota de veículos, além do longo período de decomposição dos pneus que apesar de ainda incerto, sabe-se que é superior a 100 anos (BARTHOLOMEU et al, 2010).

A partir da constatação acerca dos riscos relacionados aos pneus inservíveis, tem-se notado que diversas estratégias passaram a ser elaboradas visando atenuar os seus efeitos adversos. Neste sentido, destaca-se a promulgação da Resolução 416, de 30 de setembro de 2009, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, além de outras providências (PESSOA; PESSOA, 2017).

Os pneus inservíveis podem seguir três caminhos: alguns pneus são destinados para as empresas que realizam a laminação e transformação da borracha em artefatos diversos, como solados, cintas de sofá, tapetes para carros etc; outros pneus são triturados e depois encaminhados para empresas produtoras de cimento, para queima nos fornos de clínquer; ou então o resíduo pode ser encaminhado para empresas regeneradoras de borracha, que o transforma em pó de borracha (MOTTA, 2008).

## 4 METODOLOGIA

Para realizar a análise de viabilidade de uso de pneus inservíveis, casca de arroz e coco babaçu para fins de coprocessamento em fábricas de cimento no estado do Ceará, foram coletadas informações quanto ao perfil da indústria do cimento no território nacional e regional. Também foram levantados dados sobre os principais tipos de combustíveis fósseis utilizados hoje nas cimenteiras, de modo a verificar algumas de suas características para comparações posteriores.

### 4.1 Panorama da Indústria Cimenteira

#### 4.1.1 Perfil de Produção

O mercado do cimento no Brasil é controlado por 24 grupos industriais, nacionais e estrangeiros, e composto por 100 unidades de produção de cimento. As fábricas estão espalhadas em 88 municípios de 24 estados, com uma capacidade instalada de 100 milhões ton/ano (SNIC, 2017). A Tabela 3 apresenta o perfil de produção nacional e regional de cimento nos últimos anos.

Tabela 3 – Produção Nacional de Cimento por Região (toneladas)

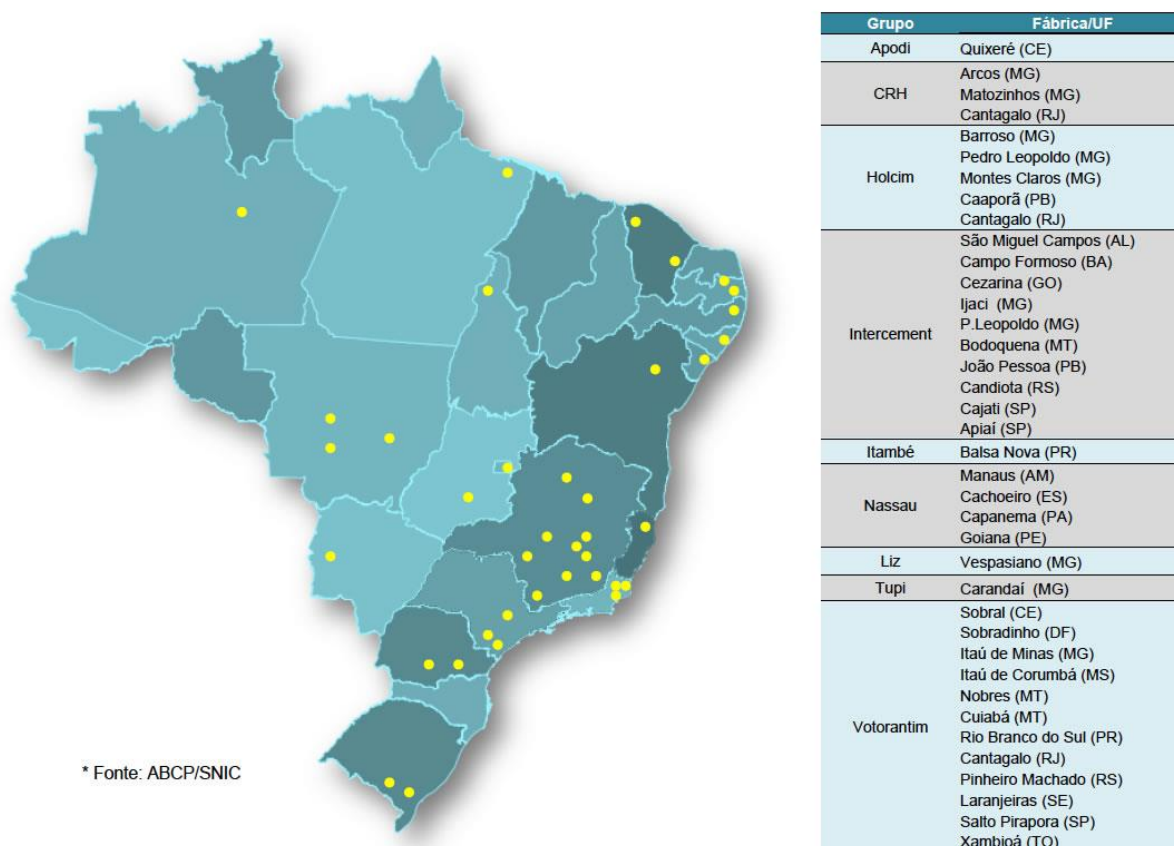
	2014	2015	2016	2017 (Janeiro a Setembro)
<b>Norte</b>	3.276.243	3.222.710	2.797.447	2.038.334
<b>Nordeste</b>	15.502.984	14.733.620	12.837.294	8.617.621
<b>Centro-Oeste</b>	8.605.200	7.639.386	5.836.271	4.308.237
<b>Sudeste</b>	33.446.287	29.937.085	26.695.388	19.270.962
<b>Sul</b>	10.423.331	9.750.169	9.390.501	6.647.628
<b>Brasil</b>	71.254.045	65.282.970	57.556.901	40.882.782

Fonte: Adaptado de SNIC, 2014, 2015, 2016, 2017

Em 2015, das 57 plantas integradas a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) que possuíam fornos rotativos para a produção de clínquer, 38 são licenciadas para realizar o coprocessamento de resíduos (ABCP, 2016). A Figura 5 mostra a disposição das fábricas de cimento licenciadas para coprocessar resíduos no território nacional.

Figura 5 – Unidades de Coprocessamento no Brasil

## Unidades de coprocessamento no Brasil \*



\* Fonte: ABCP/SNIC

Fonte: ABCP/SNIC, 2018

O Estado do Ceará, do período de janeiro a setembro de 2017, produziu 1.772.028 toneladas de cimento, sendo o estado com o maior volume de produção da região nordeste, seguido por Paraíba e Sergipe, com respectivas 1.678.834 e 1.382.899 toneladas produzidas (SNIC, 2017). No estado, existem cinco fábricas de cimento, localizadas nos municípios de Sobral, Caucaia, Pecém, Quixeré e Barbalha. Das plantas presentes no Ceará, apenas as unidades de Sobral e de Quixeré, possuem licença para efetuar coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer.

#### 4.1.2 Aproveitamento Energético em Fornos de Clínquer

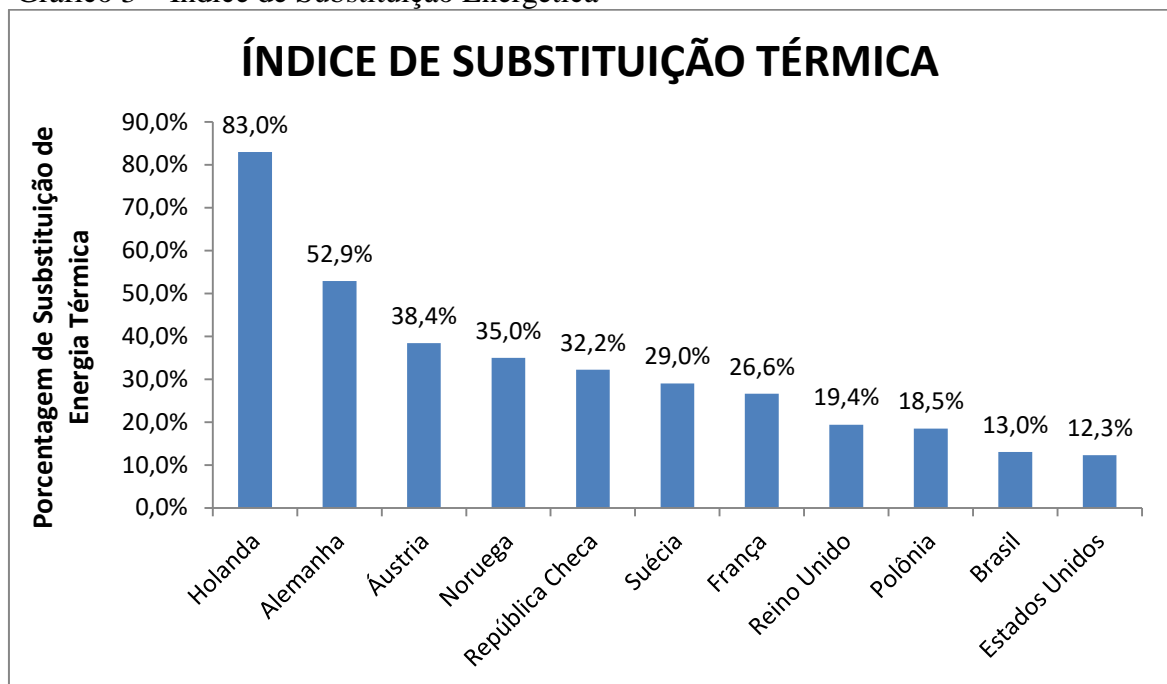
A partir de 2015, devido à crise econômica, o desempenho de diversos setores foi afetado negativamente, entre eles o setor da construção civil. Em consequência de restrições de gastos públicos em construção e o aumento da taxa de juros, o setor entrou em rescisão, o

que impactou na atividade da indústria do cimento, que sofre com a retração do consumo da commodity.

A busca pela redução de custos no processo incentiva a atividade do coprocessamento, uma vez que ainda existe um grande potencial de aproveitamento energético de resíduos no Brasil. Quando comparado com outros países, o nível de substituição energética no Brasil ainda é baixo, em torno de 13%, enquanto que em países europeus essa taxa pode chegar a mais de 80%, conforme é mostrado no Gráfico 3 (CNI, ABCP, 2012).

Pela Lei 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, é estabelecido que resíduos sólidos somente poderão ser dispostos em aterros após terem sido esgotadas todas as possibilidades de reaproveitamento. Assim, a utilização destes como combustível alternativo em fornos de clínquer representa uma solução adequada para a sua recuperação energética.

Gráfico 3 – Índice de Substituição Energética



Fonte: Adaptado de CNI, ABCP, 2012

## 4.2 Caracterização de Combustíveis Convencionais na Indústria do Cimento

O objetivo desta seção é apresentar os diferentes tipos de combustíveis principais usados na indústria e suas características, tais como poder calorífico, teor de voláteis, teor de cinzas, entre outras. Para melhor entendimento serão apresentadas antes algumas definições.

## **4.2.1 Definições para Cinzas, Voláteis e Poder Calorífico**

### **4.2.1.1 Teor de Cinzas**

Cinzas são originárias de materiais de origem mineral, não orgânica e inerte, podendo ser constituídas de compostos de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), fósforo (P) e enxofre (S). Quando em alta concentração podem diminuir o poder calorífico e ainda causar perda de energia. Sua presença afeta também a transferência de calor sendo, em alguns casos, necessário à remoção das mesmas (STREHLER, 2000 apud KLAUTAU, 2008).

Segundo Hansted (2016), o teor de cinzas não altera somente o potencial energético, mas também influencia nos custos de produção. Altos teores de cinzas podem reduzir a vida útil dos equipamentos, provocar corrosões e aumentar a demanda de manutenções.

### **4.2.1.2 Teor de Voláteis**

O teor de voláteis é a parte de uma amostra que evapora como um gás quando submetido a aquecimento, ou seja, o teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850°C (MCKENDRY, 2002).

A compreensão do teor de materiais voláteis é essencial para o conhecimento da combustão adequada de biomassas em sistemas de conversão energética a fim de realizar o seu melhor aproveitamento (PROTÁSIO, 2014).

Frederico (2009) afirma que um alto teor de voláteis ocasiona a produção de muita fumaça, além da menor eficiência energética, o que não seria desejável para combustíveis.

### **4.2.1.3 Poder Calorífico**

O poder calorífico de um material é expresso pelo conteúdo de energia que é liberada quando o material é queimado no ar. Sendo assim, o calor gerado durante a combustão de diferentes espécies pode variar dependendo de suas propriedades físicas, químicas e anatômicas (ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010).



O poder calorífico divide-se em poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O PCS considera o calor latente de condensação da água, ou seja, a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (JESUS; RODRIGUES, 2011). Já o PCI representa o valor do PCS descontando a energia necessária para condensar a água.

#### 4.2.2 Coque de Petróleo

O coque de petróleo é um subproduto do processo do refinamento de derivados de petróleo, denominado de craqueamento catalítico fluido. Atualmente é o principal combustível primário utilizado em cimenteiras, representando aproximadamente 75% do consumo total (CNI, ABCP, 2017). Devido às condições alcalinas no processo de produção de clínquer, a indústria pode utilizar o coque de petróleo com alto teor de enxofre. Após a queima, o dióxido de enxofre formado reage com compostos de sódio, potássio e cálcio contidos na farinha, resultando em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_3$  e  $\text{CaSO}_4$ , que são incorporados ao clínquer (PAULA, 2009).

O coque de petróleo é caracterizado por possuir um alto poder calorífico, baixos conteúdos de voláteis e baixos teores de cinzas, como pode se observar na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados de análise de coque de petróleo

Coque Tipo	Voláteis %	Cinzas %	Enxofre %	PCI kJ/kg
01	17,68	0,79	4,70	35337
02	---	---	6,20	32938
03	16,07	0,70	5,80	35538
04	16,25	0,53	6,70	34637
05	16,38	1,52	6,00	34939
06	15,93	2,13	6,10	34738
07	15,70	2,14	6,20	34838
08	15,33	1,79	6,30	34637
09	14,62	1,38	6,90	35039
10	16,11	0,47	6,80	35240

Fonte: adaptado de PAULA, 2009.

#### 4.2.3 Carvão Mineral

O carvão mineral é um combustível fóssil sólido de origem orgânica, formado pela decomposição parcial de matéria vegetal, livre de contato com o ar e, na maioria dos

casos, sob a influência de aumento de temperatura e pressão. O carvão brasileiro, de modo geral, é de qualidade inferior aos carvões do hemisfério norte uma vez que possui um alto teor de cinzas e menor poder calorífico.

O carvão é caracterizado pelo alto teor de carbono, e de acordo com esse teor ele pode ser dividido em quatro grupos: turfa (55 – 60% C), linhito (67 – 78% C), hulha ou betuminoso (80 – 90% C) e antracito (90 – 96 % C). O estágio mínimo para a utilização industrial do carvão é o do linhito.

A maior parte do carvão mineral utilizado na indústria do cimento é do tipo betuminoso, que pode apresentar PCI entre 26750 kJ/kg e 32570 kJ/kg (PAULA, 2009).

#### **4.2.4 Carvão Vegetal**

O carvão vegetal é usado predominantemente na produção de ferro gusa e aço. A indústria de cimento nacional utiliza uma porcentagem de carvão vegetal, geralmente misturado ao carvão mineral, com o objetivo de realizar o balanço de cinzas, o que permite também o uso de calcário com um menor teor de carbonato de cálcio.

Devido a sua quebra durante o processo de produção, transporte e manuseio, o carvão vegetal produz muitos finos. O sistema de peneiramento existente nas usinas gera finos com fração abaixo de 6 mm, denominado moinha. A moinha, que não tem aplicação na indústria siderúrgica, possui praticamente os mesmos atrativos do carvão vegetal em termos de aproveitamento energético, o que a torna uma interessante fonte de combustível alternativo em cimenteiras.

Tabela 5 - Características dos combustíveis

<b>Parâmetro</b>	<b>Carvão Mineral</b>	<b>Coque de Petróleo</b>	<b>Carvão Vegetal</b>
Cinzas (%)	5,8	0,5	1
Voláteis (%)	22	10	22
C fixo (%)	30	89	76

Fonte: (SOUZA, 2010)

#### **4.2.5 Óleo Combustível**

O óleo combustível derivado de petróleo é um produto utilizado para geração de energia térmica, composto basicamente por uma mistura complexa de correntes oriundas do processamento de petróleo e cuja base é o resíduo de destilação a vácuo. Os tipos de óleos

combustíveis são especificados pelo Departamento Nacional de Combustíveis, baseando-se em teores de enxofre e faixas de viscosidade.

Devido ao seu alto custo, o óleo combustível é atualmente utilizado na indústria de cimento apenas para aquecer o forno depois de paradas, visto que seu alto poder calorífico (37 MJ/kg – 42 MJ/kg) o torna capaz de atingir rapidamente as condições iniciais de operação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante a apresentação do panorama da indústria de cimento no estado e das principais fontes de combustível, serão apresentados dados dos resíduos escolhidos como foco desse estudo, de forma a analisar o seu comportamento ao serem coprocessados no processo de fabricação de clínquer, assim como sua disponibilidade no estado e região. Normalmente, para ser considerado viável o uso de um resíduo é necessário que este esteja disponível nas regiões próximas as cimenteiras e em quantidade que justifique seu uso em fornos de produção de clínquer.

### 5.1 Pneus Inservíveis

A utilização de pneus inservíveis como fonte energética é o exemplo mais comum de uso de um combustível alternativo na indústria de cimento. Pneus inservíveis possuem um alto poder calorífico, em torno de 33 MJ/kg, que é maior do que a maioria dos carvões, que apresentam em média 27 MJ/kg (CARPIO, 2005). Esse resíduo possui também menor teor de cinzas quando comparado à maioria dos tipos de carvão, e um percentual de enxofre inferior ao do carvão betuminoso (PAULA, 2009).

No Brasil, a utilização de pneumáticos como fonte de energia térmica, ganhou força depois que foi instaurada a resolução CONAMA 258/1999, posteriormente revogada e substituída pela resolução CONAMA 416/2009, onde fabricantes e exportadores de pneus são obrigados a realizar a coleta e destinação de pneus inservíveis existentes no território nacional.

O coprocessamento é tão importante para a indústria de pneumáticos que esta pagava à indústria do cimento para realizar a queima de seus resíduos. A indústria cimenteira, por sua vez, possui condições apropriadas para realizar a destinação final de pneus inservíveis. Assim, uma vez que as alternativas para o reaproveitamento de pneus são esgotadas, a utilização do resíduo no forno de clínquer assegura a sua completa destruição.

Um único forno com capacidade de produção diária de mil toneladas de clínquer pode consumir até cinco mil pneus por dia, inteiros ou triturados, de forma segura e eficiente. Os pneus, quando queimados em ambiente controlado, não apresentam um aumento nas emissões, podendo haver em alguns casos até mesmo redução.

O IBAMA, órgão responsável pelo controle e fiscalização da resolução CONAMA nº 416, publica anualmente o Relatório Pneumáticos, onde são dispostos dados

referentes à comercialização de pneus no Brasil, o mercado de reposição e a meta de destinação nacional de pneus inservíveis. Segundo o Relatório Pneumáticos 2017, referente ao ano base de 2016, foram colocados no mercado de reposição 53.411.924 unidades de pneus, correspondente a 729.214,04 toneladas.

A resolução CONAMA nº 416 estabelece que para cada pneu novo comercializado no país, os fabricantes e importadores devem providenciar a destinação final adequada para um pneu inservível (relação 1:1). Ao colocar essa relação em peso, há um desconto de 30% na massa dos pneus novos de forma a compensar o desgaste dos pneus inservíveis. Assim, no ano de 2016, a meta de destinação para pneus inservíveis foi de 510.449,83 toneladas (IBAMA, 2017).

O Ceará possui 32 pontos de coleta de pneus, com uma capacidade total para receber 28.850 unidades. Em 2016, o estado destinou 878,33 toneladas de pneus, representando apenas 0,18% da destinação nacional e 2,17% do total da região nordeste (IBAMA, 2017).

A Votorantim Cimentos chega a receber resíduos de outros estados para realizar o coprocessamento em sua unidade em Sobral, e possui uma meta para 2018 de aumentar o uso do produto em 10% (FONTENELE, 2017).

Ao realizar uma avaliação baseada nas estatísticas da frota veicular no estado, disponibilizadas pelo DETRAN/CE, e considerando que a vida útil de um pneu pode chegar até 10 anos, é possível estimar o número de pneus inservíveis que deveriam existir em 2016 a partir da frota de veículos em 2006.

Em 2006, a frota veicular no Ceará era de 1.055.338 veículos, entre eles 45,42% eram automóveis (veículos de passeio), representando um total de 479.322 unidades (DETRAN, 2006). Considerando que o peso de um pneu para um veículo de passeio é em média de 6 kg, e que o peso de um pneu inservível seria aproximadamente 70% desse valor, ou seja 4,2 kg, estima-se que haveria pelo menos, apenas em relação a automóveis de passeio, 8.052,61 toneladas de pneus inservíveis no ano de 2016. Ainda assim, apenas 878,33 toneladas foram adequadamente destinadas no ano. Isso indica um potencial de reaproveitamento energético inexplorado no estado, principalmente quando comparado com dados da frota atual de veículos, que quase que triplicou conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Veículos por Tipo no Estado do Ceará

ATÉ ABRIL / 2018				
DISCRIMINAÇÃO	ESTADO		CAPITAL	
	NÚMERO	%	NÚMERO	%
TIPO				
Automóvel	1.133.277	36,56	596.610	54,24
Caminhão	75.318	2,43	23.488	2,14
Caminhonete	193.968	6,26	71.006	6,46
Camioneta	71.850	2,32	45.113	4,10
Micro-ônibus	12.324	0,40	3.466	0,32
Motocicleta	1.335.234	43,08	287.045	26,09
Motoneta	159.812	5,16	9.376	0,85
Ônibus	18.326	0,59	7.765	0,71
Reboque	36.154	1,17	19.444	1,77
Semirreboque	13.413	0,43	7.417	0,67
Outros	49.733	1,60	29.280	2,66
<b>TOTAL</b>	<b>3.099.409</b>	<b>100,00</b>	<b>1.100.010</b>	<b>100,00</b>

Fonte: DETRAN, 2018

## 5.2 Casca de Arroz

A casca de arroz é a principal biomassa utilizada na indústria de cimento brasileira. Ela possui um bom PCI, por volta de 16720 kJ/kg, que representa cerca de um terço do valor do PCI de coque de petróleo ou metade do valor do PCI de carvão betuminoso (MANIQUE, 2011). Além disso, ela possui um alto teor de sílica, o que a torna duplamente desejável em cimenteiras (Tabela 7).

Tabela 7 – Análise da Composição das Cinzas da Casca de Arroz

Constituinte (% massa)	Cinzas de casca de arroz
CaO	1,85
SiO <sub>2</sub>	88,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26
MgO	0,46
Cinzas (%)	19,50
Materiais Voláteis (%)	65,18

Fonte: CARPIO, 2005

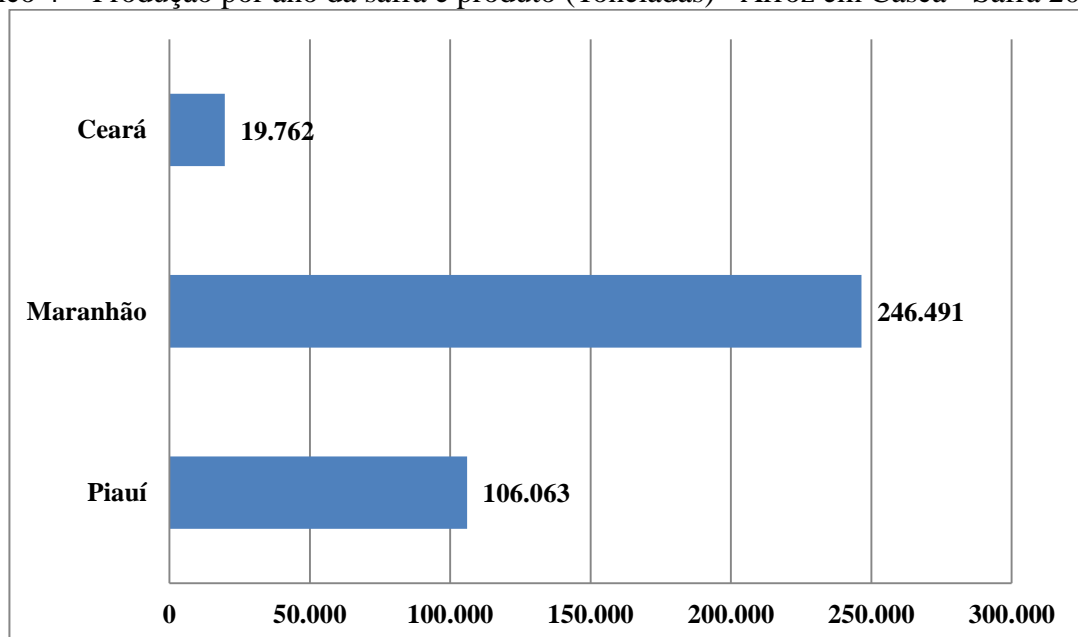
O alto teor de sílica propicia um aumento no nível de alcalinidade do forno, isso possibilita o uso de coque com teores de enxofre mais altos, sem comprometer significativamente a qualidade das emissões. Além disso, as cinzas provenientes da queima

são incorporadas ao clínquer, podendo contribuir para a resistência de longo prazo do cimento produzido (SELLITTO et al., 2013).

Segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) realizado pelo IBGE, a safra de arroz (em casca) no estado do Ceará, referente ao ano de 2017, apresentou uma produção de 19.762 toneladas do grão. Considerando que, após o beneficiamento, 20% dessa massa corresponde a casca de arroz, isso equivale a 3.952,4 toneladas de casca de arroz produzidas no estado.

Um forno com capacidade de produção de mil toneladas de clínquer por dia pode consumir até 20 toneladas de casca de arroz. Assim, existe um potencial de aproveitamento energético em relação ao resíduo produzido no estado. Esse potencial é salientado quando levado em consideração a possibilidade de recebimento da casca de estados adjacentes, como Piauí e Maranhão, uma vez que esses estados possuem um maior volume de produção (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Produção por ano da safra e produto (Toneladas) - Arroz em Casca - Safra 2017



Fonte: IBGE, 2018

Vale salientar que a casca de arroz possui uma baixa densidade, o que pode acarretar em problemas no seu transporte. Uma solução para o problema seria compactar o resíduo na forma de briquetes, porém deve ser analisado se tal operação é justificada economicamente.

### 5.3 Coco Babaçu

Com relação ao babaçu, após a extração da amêndoa, principal produto comercializado do fruto, a casca do coco pode ser utilizada para fins de aproveitamento energético, uma vez que ela possui um PCI de aproximadamente de 22MJ/kg (SOUZA, 2018).

De acordo com Anuário Estatístico do Ceará 2017 disponibilizado pelo IPECE, o estado produziu, em 2016, 179 toneladas de amêndoa de babaçu. Sabendo que a amêndoa representa 8,7% do fruto, pode-se estimar que a produção cearense foi de aproximadamente 2000 toneladas de babaçu no ano. Da mesma forma, o epicarpo (casca) representa 12,6% do coco, assim estima-se que 252 toneladas de casca de coco babaçu foram produzidas. Esse número não é expressivo para justificar o seu uso na indústria de cimento, principalmente quando comparado aos outros resíduos analisados.

Porém, se for levado em consideração a possibilidade de recebimento da casca de babaçu de estados vizinhos, a quantidade de resíduo disponível muda drasticamente. Em 2016, o estado do Piauí produziu 3.503 toneladas de amêndoas de babaçu (CEPRO, 2017), enquanto que o estado do Maranhão, maior produtor de coco babaçu do Brasil, produziu 57.191 toneladas de amêndoas (PEVS, 2017). Isso equivale a 5073,3 e 82.828,3 toneladas de casca de coco babaçu produzidas. Tendo em vista essa perspectiva, a utilização desse resíduo na indústria de cimento no Ceará torna-se mais atrativa.



## 6 CONCLUSÃO

No presente estudo, buscou-se avaliar a capacidade de uso de pneus inservíveis, casca de arroz e casca de coco babaçu para fins de coprocessamento em indústrias de cimento localizadas no estado do Ceará. De forma geral, para sua utilização ser viável é necessário que o resíduo escolhido esteja disponível nas regiões próximas às localidades das indústrias e em quantidade que justifique seu uso em fornos de produção de clínquer. Em alguns casos, dependendo da relação entre cimenteira e empresa que necessita realizar o descarte, ultrapassar as fronteiras do estado para realizar a destinação de resíduos é praticável.

Apesar do estado do Ceará possuir apenas duas fábricas de produção de cimento licenciadas para realizar o coprocessamento em fornos de clínquer, devido aos benefícios energéticos e financeiros que a alternativa traz, a tendência é que a utilização de resíduos aumente nos próximos anos.

Na avaliação de pneus inservíveis, observou-se que existe um potencial de aproveitamento energético inexplorado no Ceará. De acordo com as estatísticas disponibilizadas pelo DETRAN/CE e pelo IBAMA, estima-se que deveriam existir 8.052,61 toneladas de pneus inservíveis disponíveis no estado em 2016, mas apenas 878,33 toneladas do resíduo foram destinadas.

Em relação às biomassas, o estado possui uma safra modesta de arroz, porém a estimativa de produção da casca do grão, aproximadamente 3.952,4 toneladas em 2017, se mostra suficiente para justificar seu uso em cimenteiras. Isso é salientado pelo fato de estados adjacentes ao Ceará também possuírem produção de arroz. Já para o babaçu, o Ceará apresenta uma produção quase que irrelevante para uso em fábricas de cimento, com uma estimativa de apenas 252 toneladas de casca de coco babaçu produzidas em 2016. Desta forma, a utilização do resíduo deve ser apenas considerada caso haja uma contribuição vinda de estados vizinhos, como o Maranhão e Piauí.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Tendo em vista um maior aprofundamento no assunto, recomenda-se para trabalhos futuros:

- a) Avaliar junto à cimenteiras o custo benefício do transporte de resíduos para a localidade das plantas de produção de cimento, aplicando conceitos de logística reversa;
- b) Levantar dados de outros tipos de resíduos (borras de tinta, lodos de estação de tratamento, resíduos da indústria siderúrgica, etc) e analisar se a sua utilização para fins de coprocessamento em indústrias de cimento é viável.

## REFERÊNCIAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland -. **Panorama do Coprocessamento Brasil - Brasil 2016**. Disponível em: <[http://coprocessamento.org.br/cms/wp-content/uploads/2017/01/Panorama-coprocessamento\\_2016-1.pdf](http://coprocessamento.org.br/cms/wp-content/uploads/2017/01/Panorama-coprocessamento_2016-1.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2018.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma Técnica - ABNT NBR 10004:2004**. 2004. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=936>>. Acesso em: 29 maio 2018.

ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 101, n. 24, p.9778-9784, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.026>.

BARTHOLOMEU, D. B. et al. **A logística reversa: o caso da destinação de pneus inservíveis no Brasil**. 2010. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/textos/128.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2018.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, DF, Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 29 maio 2018.

BRASÍLIA. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). (Ed.). **Relatório de pneumáticos: Resolução Conama nº 416/09: 2017 (ano base 2016)**. 2017. Disponível em: <<http://ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/ibama-relatorio-pneumaticos-2017-nov.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2018.

CARPIO, Ricardo Carrasco. **Otimização no Co-processamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental**. 2005. 194 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá,, 2005.

CARRAZZA, L. R. **Manual Tecnológico de Aproveitamento Integral do Fruto do Babaçu**. 2ª ed. 2012.

CEPRO, Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí -. **Anuário Estatístico do Piauí - 2016**. 2017. Disponível em: <[http://www.cepro.pi.gov.br/download/201805/CEPRO03\\_a44b0f3ffe.pdf](http://www.cepro.pi.gov.br/download/201805/CEPRO03_a44b0f3ffe.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2018.

CNI, ABCP (2012). Confederação Nacional da Indústria e Associação Brasileira de Cimento Portland. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento – Brasília** : CNI, 2012. 58 p. (Cadernos setoriais Rio+20)

CSI, ABCP (2017). Confederação Nacional da Indústria e Associação Brasileira de Cimento Portland. **Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento / Confederação Nacional da Indústria, Associação Brasileira de Cimento Portland, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – Brasília** : CNI, 2017. 60 p.

DAHMER, Alice Maria ; RAMOS, Aline Alves ; SILVA, Ellen Aparecida Moises da ; SILVA, Natália Crisléia Rosas da ; FRANQUIS, Rafaela Queiroz ; DUTRA, Andrei Gromiko Helena . **Aproveitamento da biomassa do babaçu para a geração de energia: um estudo em uma unidade de laticínios de Mato Grosso/MT**. In: II Seminário de Iniciação Científica, 2012, Colorado do Oeste. II Seminário de Iniciação Científica do IFRO Câmpus Colorado do Oeste, 2012.

DETRAN. **Veículos por Tipo no Estado do Ceará**. 2006. Disponível em: <<http://portal.detran.ce.gov.br/index.php/estatisticas>>. Acesso em: 30 maio 2018.

DETRAN. **Veículos por Tipo no Estado do Ceará**. 2018. Disponível em: <<http://portal.detran.ce.gov.br/index.php/estatisticas>>. Acesso em: 30 maio 2018.

FONTENELE, Cristina. **Logística reversa. O lixo como negócio rentável**. 2017. Publicado

pelo jornal O Povo. Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/jornal/dom/2017/12/logistica-reversa-o-lixo-como-negocio-rentavel.html>>. Acesso em: 31 maio 2018.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GURGEL, Fábio de Lima. **A Cultura do Arroz**. 2012. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAARc4AE/cultivo-arroz>>. Acesso em: 25 maio 2018.

HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAJI, F. M. **Caracterização Físico-Química da Biomassa de Leucaena leucocephala para Produção de Combustível Sólido**. Revista Virtual de Química Caracterização Físico-Química da Biomassa de Leucaena leucocephala para Produção de Combustível Sólido. v. XX, n. Xx, 2016.

IPECE, **Anuário Estatístico do Ceará**. 2017 Disponível em: <<http://www.ipece.ce.gov.br/index.php/anuario-estatistico-do-ceara>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

JESUS, W. M. de; RODRIGUES, W. J. **Automatização do controle do PCI e melhoria do controle da relação estequiométrica de um forno de combustão a gás**. E-xacta, v. 4, n. 1, p. 7, 2011.

KIELING, A. G. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNISINOS. São Leopoldo, RS, 2009.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.

LSPA, **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola** - LSPA. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 28 maio 2018.

MANIQUE, Márcia Cardoso. **Caracterização e utilização da cinza de casca de arroz como adsorvente na purificação de biodiesel de óleo de fritura**. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Volume 83, Número 1, maio 2002, p. 37-46, 2002.

MOTTA, Flávia Gutierrez. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis - o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 9, n. 1, p.167-184, jun. 2008.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R; MITCHELL, D. **New developments in solid state fermentation: Ibioprocesses and products**. *Process Biochemistry*. v. 35, p. 1153–1169. 2000.

PAULA, Luiz Gonzaga de. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

PESSOA, Jonas Onis; PESSOA, Jonatan Onis. Avaliação do Sistema De Logística Reversa de Pneus Inservíveis no Sul do Amazonas. **Revista Foco**, Amazonas, v. 10, n. 1, p.221-237, abr. 2017.

PEVS **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura** - PEVS. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 30 maio 2018.

PROTASIO, T. P. **Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

RAMOS, Márcio Dimas. **Estudo da Formação e Emissão de Poluentes na Atmosfera Originários do Coprocessamento de Resíduos em Fábricas de Cimento**. 2015. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; SANTO, Belinazir Costa do Espírito. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 16, n. 1, p.1-10, mar. 2011.

SELLITTO, Miguel Afonso et al. Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. **Ambiente & Sociedade**, [s.l.], v. 16, n. 1, p.141-162, mar. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1414-753x2013000100009>.

SILVA, Rogério Jose da. **Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland**. 1994. 259 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SIQUEIRA, Lígia Cristina Gonçalves de. **Avaliação do impacto das emissões de metais geradas no coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento**. 2005. 362 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SNIC (2014). Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Produção Regional 2014**. Disponível em: < <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/pr2014.pdf> >. Acesso em: 26 de Maio de 2018.

SNIC (2015). Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Produção Regional 2015**. Disponível em: < <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/pr2015.pdf> >. Acesso em: 26 de Maio de 2018.

SNIC (2016). Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Produção Regional 2016**. Disponível em: < <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1513362481.pdf> >. Acesso em: 26 de Maio de 2018.

SNIC (2017). Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Produção Regional 2017**. Disponível em: < <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1524668651.pdf> >. Acesso em: 26 de Maio de 2018.

SOUZA, Antônia Bruna Vieira de et al. **Análise do Potencial de Resíduos para Geração de Energia Térmica no Processamento de Cimento**. 2018. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/Anais/mostracientifica2017/51693-ANALISE-DO-POTENCIAL-DE-RESIDUOS-PARA-GERACAO-DE-ENERGIA-TERMICA-NO-PROCESSAMENTO-DE-CIMENTO>>. Acesso em: 30 maio 2018.

SOUZA, Bruno Damacena de. **Estudo do uso de carvão vegetal de resíduos de biomassa no sistema de aquecimento dos fornos de produção do clínquer de cimento Portland**. 2010. Departamento de Engenharia dos Materiais – PUC-Rio. Disponível em: <[https://www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2011/Relatorios/CTC/DEMA/DEMa-Bruno Damacena de Souza.pdf](https://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2011/Relatorios/CTC/DEMA/DEMa-Bruno%20Damacena%20de%20Souza.pdf)>. Acesso em: 28 maio 2018.

TEIXEIRA, M. A. **Biomassa de babaçu no Brasil**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002. Disponível: Acesso em: 29 maio 2018.