



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

FABIO MARCELO VANDERLEI E SILVA

POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE BIOMASSA
ORIUNDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Recife, PE
2014



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

FABIO MARCELO VANDERLEI E SILVA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE BIOMASSA
ORIUNDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Co-orientador:

Prof. Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva

Recife, PE
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

V235p Vanderlei e Silva, Fabio Marcelo
Potencial energético dos resíduos de biomassa oriundos da construção civil / Fabio Marcelo Vanderlei e Silva – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2014.
112 f.: il.

Orientador: Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Co-Orientador: Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva
Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2014.

1. Resíduos da construção civil 2. Biomassa 3. Geração de energia. I. Engenharia Civil - Dissertação II. Gusmão, Alexandre Duarte (orient.) III. Silva, Sérgio Peres Ramos da IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V. Título.

CDD 624

FABIO MARCELO VANDERLEI E SILVA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE BIOMASSA
ORIUNDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadores:

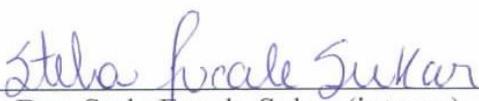


Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva
Universidade de Pernambuco

Examinadores:



Prof. Dra. Stela Fucale Sukar (interna)
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Alexandre Ricardo P. Schuler (externo)
Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

À minha Família, a quem dedico todo este trabalho, razão de todas as minhas conquistas, pela força e por existirem na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois é nele em quem eu acredito e sei que ele é poderoso.

Ao meu pai, Ludgero Barros, pelo maravilhoso exemplo de vida, trabalho duro e amor à família.

Às mulheres de minha vida:

Minha mãe, Oneide Vanderlei, pelo maior coração que existe e por todo o esforço dedicado à minha educação;

Minha esposa, Ivana Carla, que esteve presente em todas as etapas do processo, pelo apoio incondicional e paciência durante o mestrado e em todos os momentos juntos; e

Minha querida filha, Lorena Vanderlei, a maior alegria e fonte de energia para minha vida, e que com seu belo sorriso, não me deixou desistir.

Aos meus irmãos Márcio Roberto e Rosana Cristina, por sempre acompanharem e me apoiarem.

Em especial aos meus orientadores Prof. Dr. Alexandre Gusmão e Prof. Dr. Sérgio Peres, pela imprescindível orientação dedicada a este trabalho, vinculada a profundos laços de amizade, ensinamentos e profissionalismo, que fizeram presentes nestes últimos anos.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Alexandre Schuler e Prof.^a Dr.^a Stela Fucale pelas sugestões e conselhos valiosos para melhoria e conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eder Santos e Prof.^a Msc. Jamilly Cruz pela ajuda prestada ao longo deste trabalho.

Ao PEC/POLI/UPE pela oportunidade de continuar meus estudos, promovendo o Mestrado de Construção Civil de excelente qualidade.

Aos Professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UPE.

À secretária do PEC, Lúcia Rosani, pelo carinho, atenção e incentivo aos alunos deste mestrado.

Aos colegas de mestrado, pelos bons momentos compartilhados e pelo apoio mútuo durante estes anos de convivência.

Aos integrantes do Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM), sem mencionar nomes, pois todos foram de especial importância pelo acolhimento, ensinamentos, companheirismo, estímulo e dedicação à pesquisa científica.

Aos colegas de trabalho, na CHESF pelo incentivo para iniciar o mestrado e na COMPESA pelo incentivo para a conclusão deste.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

“A sabedoria consiste em temer ao Senhor, e
a inteligência está em afastar-se do mal.”
(Jó 28, 28)

VANDERLEI E SILVA, Fabio Marcelo. **Potencial energético dos resíduos de biomassa oriundos da construção civil**. Recife: UPE, 2014. 112p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

RESUMO

Nos últimos anos, a construção civil brasileira tem vivenciado um crescimento no setor com novas oportunidades de geração de riqueza. Atualmente, o desafio está na implantação dos conceitos de desenvolvimento sustentável. Várias oportunidades de utilização de fontes alternativas de energia renovável vêm surgindo para suprir a demanda crescente. A conversão termoquímica da biomassa oriunda de resíduos da construção civil (bioRCC) está entre as possibilidades de reciclagem energética. Esta pesquisa tem o objetivo de estudar as técnicas de valorização energética dos resíduos de biomassa oriunda da construção de edifícios residenciais multifamiliares, através da gaseificação, e sua viabilidade. Para tanto, foram coletadas amostras de bioRCC em um canteiro de obra durante a etapa de construção, verificando aspectos como a composição gravimétrica, dimensões, material constituinte e presença de contaminantes. Após as amostras receberem pré-tratamento, foram determinados os teores de umidade, voláteis, carbono fixo, cinzas, a composição química elementar, as frações constituintes (celulose, hemicelulose e lignina) e o poder calorífico (superior e inferior). Para a gaseificação do bioRCC utilizou-se um mini-gaseificador laboratorial e um de leito fixo downdraft. Os gases coletados foram analisados a partir de um cromatógrafo GC-TCD. Os resultados da caracterização energética demonstraram a boa qualidade do combustível sólido ($PCI=17,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$), produzindo um combustível gasoso com PCI de $10,1 \text{ MJ.m}^{-3}$. Considerando-se a geração diária de 200 toneladas de bioRCC na Região Metropolitana do Recife (RMR), a conversão termoquímica utilizando o mini-gaseificador indica um aporte energético suficiente para suprir aproximadamente 50.000 casas populares. A eficiência de conversão do gaseificador downdraft estimou-se uma redução para 40% em relação ao mini-gaseificador, no entanto, os resultados estão coerentes com aqueles encontrados na literatura. Pode-se concluir ao final da análise dos resultados que a gaseificação do bioRCC surge como uma alternativa de uso sustentável e ressalta o grande potencial para geração de energia elétrica nos centros urbanos.

Palavras-chave: Resíduos da construção civil. Biomassa. Geração de energia.

VANDERLEI E SILVA, Fabio Marcelo. **Energy potencial of biomass waste arising from construction**. Recife: UPE, 2014. 112p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

ABSTRACT

In recent years, the Brazilian construction industry has experienced growth in the sector with new opportunities to generate wealth. Currently, the challenge lies in the implementation of the concepts of sustainable development. Several opportunities for using alternative renewable energy sources are emerging to meet the growing demand. The thermochemical conversion of biomass waste arising from construction (bioCDW) is among the possibilities for energy recycling. This work aims to study the techniques for energy recovery of waste derived biomass construction of multifamily residential buildings, through gasification, and viability. Thus samples of bioCDW were collected on a construction site during the construction phase, verifying aspects such as gravimetric composition, dimensions, constituent material and the presence of contaminants. After receiving the samples pretreatment, were determined moisture, volatiles, fixed carbon, ash, the chemical composition, the constituent fractions (cellulose, hemicelluloses and lignin) and heating value (HHV and LHV). For bioCDW gasification used a laboratory gasifier and a fixed bed downdraft. The gases collected were analyzed using a GC-TCD. The results demonstrate the characterization of the energy of good quality solid fuel ($LHV = 17.8 \text{ MJ.kg}^{-1}$), producing a gaseous fuel with $LHV 10.1 \text{ MJ.m}^{-3}$. Considering the daily generation of 200 tons of bioCDW in the Recife's metropolitan area, the thermochemical conversion using the laboratory gasifier indicates an energy intake enough to supply about 50,000 popular houses. The conversion efficiency of the downdraft gasifier down esteem a reduction of 40% compared to the laboratory gasifier, however, the results are consistent with those found in the literature. It can be concluded by the end of the analysis that bioCDW gasification is an alternative for sustainable use and highlights the great potential for generating electricity in the metropolitan areas.

Keywords: Construction Waste. Biomass. Power Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Lançamento de imóveis residenciais na RMR.	17
Figura 2	– Estrutura de gestão dos resíduos, conforme a resolução CONAMA nº 307.....	29
Figura 3	– Participação dos materiais na composição gravimétrica dos RCC na cidade do Recife.	31
Figura 4	– Participação dos materiais na composição da amostra de RCC – Fase de estrutura.....	31
Figura 5	– Participação de madeiras no RCC.	32
Figura 6	– Classificação do RCC nos tipos de resíduos de biomassa.	33
Figura 7	– Fluxograma dos componentes da biomassa vegetal.	34
Figura 8	– Camadas da estrutura celular da madeira.....	35
Figura 9	– Diagrama de carbonificação para vários tipos de combustíveis.....	38
Figura 10	– Material briquetado: (a) bolacha (b) tarugos.	41
Figura 11	– (a) Prensa mecânica (b) Prensa hidráulica.	41
Figura 12	– (a) Pellets de madeira mista (b) Peletizadora.	42
Figura 13	– Oferta interna de energia no Brasil 1940-2012.	43
Figura 14	– Oferta interna de energia elétrica por fonte – 2012.	44
Figura 15	– Possibilidade de aproveitamento dos resíduos da biomassa.	45
Figura 16	– Processos de transformação de vegetais lenhosos.	46
Figura 17	– Análise termogravimétrica da madeira e de seus componentes.	52
Figura 18	– Gaseificador concorrente.....	54
Figura 19	– Etapas da pesquisa.	57
Figura 20	– (a) RCC Misto - madeira serrada mista (b) RCC Pinus - madeira serrada pinus (c) RCC Plastificado - compensado plastificado (d) RCC Resinado - compensado resinado.	60
Figura 21	– Micromoinho de facas, MARCONI, modelo MA-048.	61
Figura 22	– Amostra de madeira (a) pulverizada (b) peletizada.	62
Figura 23	– (a) Prensa manual (b) Mini-peletizador.	62
Figura 24	– Forno da estufa, QUIMIS.	64
Figura 25	– Forno de mufla, QUIMIS.	65
Figura 26	– Analisador elementar CHNOS, ELEMENTAR, modelo Vario EL cube.	66
Figura 27	– Balança termogravimétrica, SHIMADZU, modelo DTG-60.	67

Figura 28	– Termograma de TGA e DTA.	68
Figura 29	– Calorímetro digital, IKA-WERKE, modelo C2000 Control, com detalhe do vaso de decomposição.....	69
Figura 30	– Digestor para fibra em beakers, MARCONI, modelo MA-450/6.	70
Figura 31	– Análise Van Söest e frações da biomassa seca.....	71
Figura 32	– Mini-gaseificador laboratorial.	72
Figura 33	– (a) Chaminé do gaseificador downdraft (b) Queima do gás resultante da gaseificação.	73
Figura 34	– Gaseificador downdraft ventilado.....	74
Figura 35	– Diagrama esquemático do gaseificador downdraft atmosférico.....	75
Figura 36	– Gráfico com os picos cromatográficos.....	77
Figura 37	– Cromatógrafo de gás, SRI Instruments, modelo 8610C.	78
Figura 38	– Distribuição de temperatura ao longo da fornalha.	79
Figura 39	– Controle de transporte de resíduos de madeira.....	83
Figura 40	– Geração de Resíduos de Madeira por fase de construção.	83
Figura 41	– Gráfico da densidade aparente.....	85
Figura 42	– Gráfico do teor de umidade.....	85
Figura 43	– Gráfico do teor de cinzas.....	86
Figura 44	– Termograma do RCC Misto.	86
Figura 45	– Termograma do RCC Pinus.	87
Figura 46	– Termograma do RCC Plastificado.....	87
Figura 47	– Termograma do RCC Resinado.....	87
Figura 48	– Gráfico da análise imediata.	88
Figura 49	– Gráfico da análise elementar.	89
Figura 50	– Gráfico da análise bromatológica.	90
Figura 51	– Gráfico da calorimetria dos bioRCC.....	91
Figura 52	– Gráfico da densidade energética dos bioRCC.	92
Figura 53	– Composição do gás produzido à 700°C por tempo de residência.....	94
Figura 54	– Composição do gás produzido à 800°C por tempo de residência.....	94
Figura 55	– Composição do gás produzido à 900°C por tempo de residência.....	94
Figura 56	– PCI do gás produzido.....	95
Figura 57	– Massa gaseificável da biomassa.	95
Figura 58	– Composição média do gás produzido (bancada).	97
Figura 59	– Poder calorífico inferior vs temperatura.	97

Figura 60 – Volume produzido vs temperatura.....	98
Figura 61 – Energia gerada vs temperatura.	98
Figura 62 – Composição média do gás produzido (downdraft).....	100
Figura 63 – Poder calorífico do gás produzido (gaseificador downdraft).	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Participação dos RCC na massa total de RSU.....	24
Tabela 2	– Composição dos resíduos de construção e/ou demolição em diversas localidades (%).....	25
Tabela 3	– Legislações sobre resíduos sólidos.....	27
Tabela 4	– Composição média das madeiras coníferas e folhosas.....	35
Tabela 5	– Densidade e poder calorífico dos resíduos e dos correspondentes briquetes.....	41
Tabela 6	– Características dos gaseificadores.....	53
Tabela 7	– Características do gás produto.....	54
Tabela 8	– Caracterização termo-química da espiga de milho e do gás produto.....	56
Tabela 9	– Número de mol de ar dentro do gaseificador em função da temperatura na zona quente.....	79
Tabela 10	– Ensaio de caracterização físico-química e energética do bioRCC.....	81
Tabela 11	– Quantidade adquirida por tipo de madeira.....	82
Tabela 12	– Estimativa da taxa de utilização de madeira na obra.....	82
Tabela 13	– Características físico-química e energética do RCC estudado.....	84
Tabela 14	– Massa de madeira de RCC necessárias para combustão completa em função da temperatura na zona quente.....	90
Tabela 15	– Composição dos gases resultantes de pellets de bioRCC.....	93
Tabela 16	– Composição dos gases resultantes do gaseificador de bancada.....	96
Tabela 17	– Composição dos gases resultantes do gaseificador downdraft.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
\overline{AC}	Relação ar-combustível na base molar
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>bioRCC</i>	Resíduos de Biomassa da Construção Civil
<i>b.s.</i>	Base seca
<i>b.w.</i>	Base de trabalho
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>BEN</i>	Balanco Energético Nacional
<i>C</i>	Carbono
C^s	Massa de carbono na base seca
<i>CH₄</i>	Metano
<i>CNPq</i>	Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>CONAMA</i>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<i>DTA</i>	Derivada primeira da curva termogravimétrica
<i>EPE</i>	Empresa de Pesquisa Energética
<i>FDA</i>	Fibra em detergente ácido
<i>FDA-lignina</i>	Lignina Klason
<i>FDN</i>	Fibra em detergente neutro
<i>FIEPE</i>	Federação das Indústrias do Estado de Pernambuco
<i>FINEP</i>	Financiadora de Estudos e Projetos
<i>H</i>	Hidrogênio
<i>H₂</i>	Gás hidrogênio
H^s	Massa de hidrogênio na base seca
<i>N</i>	Nitrogênio
<i>N₂</i>	Gás nitrogênio
<i>NO</i>	Monóxido de nitrogênio
<i>NBR</i>	Normas Brasileiras
<i>O</i>	Oxigênio
<i>O₂</i>	Gás oxigênio

O^s	Massa de oxigênio na base seca
PAC	Plano de Aceleração do Crescimento
PC	Poder calorífico
PCI	Poder calorífico Inferior
PCI^s	Poder calorífico Inferior na base seca
PCS	Poder Calorífico Superior
PCS^s	Poder Calorífico Superior na base seca
PGRCC	Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PIGRCC	Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PIB	Produto Interno Bruto
PMCMV	Programa Minha Casa Minha Vida
PMGRCC	Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POLICOM	Laboratório de Combustíveis e Energia da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco
PROINFA	Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RBTB	Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Enxofre
SO_2	Dióxido de enxofre
S^s	Massa de enxofre na base seca
SINDUSCON/PE	<i>Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de Pernambuco</i>
SINDUSCON/SP	<i>Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo</i>
TCD	<i>Thermal conductivity detector</i> (detector de condutividade térmica)
TGA	Curva termogravimétrica
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)
UPE	Universidade de Pernambuco
WWF	World Wildlife Fund
\bar{x}	Média amostral

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	20
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.4	Metodologia	21
1.5	Estrutura da dissertação	22
2	GESTÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	23
2.1	Composição dos resíduos da construção civil	24
2.2	Legislação vigente.....	25
2.3	Gestão diferenciada dos RCC	28
2.4	Participação da madeira nos RCC.....	30
3	BIOMASSA E ENERGIA.....	33
3.1	Conceito de biomassa	33
3.2	Composição química das fibras	34
3.3	Propriedades físico-químicas da biomassa	37
3.4	Pré-tratamento dos resíduos de madeira.....	39
3.5	Matriz energética brasileira	43
3.6	Tecnologia de conversão dos resíduos de madeira em energia ou em combustível	45
3.6.1	<i>Tecnologia de gaseificação</i>	48
3.6.2	<i>Tipos de gaseificadores</i>	52
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.1	Programa experimental.....	57
4.2	Caracterização da obra	58
4.3	Estimativa de geração de resíduos de madeira no canteiro de obra.....	58
4.4	Coleta e preparo da biomassa	58
4.4.1	<i>Coleta, segregação e classificação das amostras</i>	58

4.4.2 Pulverização e densificação das amostras	61
4.5 Caracterização físico-química e energética da biomassa	63
4.5.1 Densidade aparente.....	63
4.5.2 Teor de umidade (método da estufa).....	64
4.5.3 Teor de cinzas (método da mufla).....	65
4.5.4 Análise elementar CHNOS	65
4.5.5 Análise termogravimétrica	67
4.5.6 Poder calorífico	68
4.5.7 Análise bromatológica (Método de Van Söest)	70
4.6 Gaseificação da biomassa.....	72
4.6.1 Descrição dos dispositivos experimentais.....	73
4.6.2 Análise qualitativa do gás combustível gerado	77
4.6.3 Análise quantitativa do gás combustível gerado	78
4.6.4 Planejamento de gaseificação	80
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
5.1 Estimativa de geração dos resíduos de biomassa no canteiro de obra	82
5.2 Caracterização físico-química e energética da biomassa	84
5.3 Conversão termoquímica da biomassa	92
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
6.1 Conclusões.....	101
6.2 Sugestões	104
REFERÊNCIAS.....	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O Brasil tem experimentado um forte crescimento econômico neste começo de século, vindo a figurar no cenário mundial como um país de economia emergente. No entanto, seu desenvolvimento passa prioritariamente por investimentos em projetos de infraestrutura, no setor produtivo e na habitação. Vários deles são anunciados pelos governos federal e estadual, como é o caso do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC), do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), do Estaleiro Atlântico Sul, do Pólo de Poliéster, da Refinaria Abreu e Lima, dentre outros. Desta forma, a construção civil está encontrando um ambiente propício para o crescimento do setor e novas oportunidades de geração de riqueza.

Evidências desta aceleração do crescimento econômico estão nos indicadores do mercado imobiliário, como é o caso das médias mensais de lançamento de unidades residenciais nos últimos anos na Região Metropolitana do Recife (RMR), Figura 1.

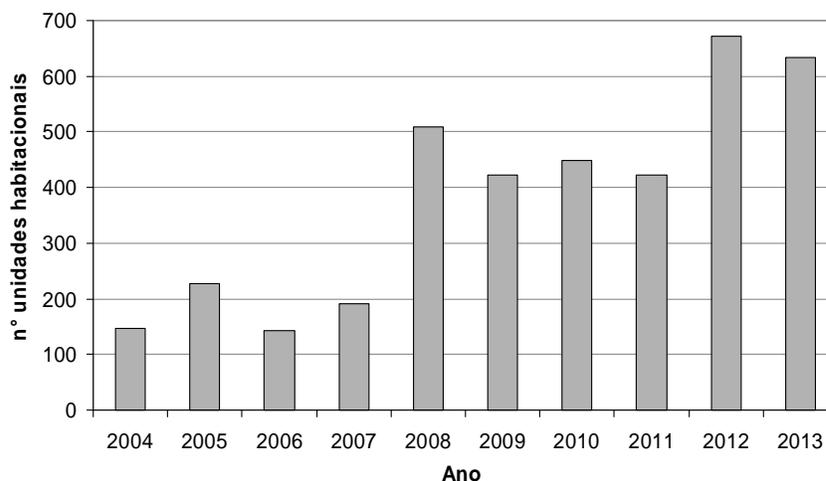


Figura 1 – Lançamento de imóveis residenciais na RMR.

(FIEPE, 2014)

Este grande volume de empreendimentos traz impactos ao meio ambiente, onde a indústria da construção torna-se responsável em administrar os efeitos causados. O modelo de produção utilizado atualmente tornou-se insustentável para a sociedade, devido à exploração predatória dos recursos naturais, ocupação desordenada dos centros urbanos e poluição do ambiente por

diversas formas. O atual desafio da construção civil está na implantação dos conceitos de sustentabilidade no setor, em suas dimensões econômica, social e ambiental.

Desenvolvimento sustentável, ainda, é um conceito em construção. A definição mais referenciada na literatura é a elaborada pela comissão Brundtland, em 1987, onde: “Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento através do qual as necessidades do presente são satisfeitas, sem, no entanto, comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades” (PRIORI JÚNIOR, 2008).

Um dos principais responsáveis pela degradação ambiental nas metrópoles do Brasil e do mundo é a grande quantidade de resíduos sólidos gerados pelo setor da construção civil, comumente chamado de resíduos da construção civil (RCC). No Brasil, isto representa mais da metade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos nas grandes cidades (GUSMÃO, 2008).

Em vários ramos da engenharia surgem inovações tecnológicas para tentar absorver os resíduos originados pelo processo produtivo como material reciclado e de baixo custo. Atualmente, no Brasil, existem muitas pesquisas sobre a reciclagem e reutilização dos RCC sob a forma de agregados, principalmente em obras de pavimentação, reaterro, melhoramento de terreno (fundações) e concreto, que tem mostrado viabilidade técnica e ambiental. No entanto, são raros os estudos desenvolvidos com outros materiais recicláveis dos RCC, como os resíduos de madeira oriundos da confecção de fôrmas das estruturas, de instalações provisórias, como também os resíduos de demolições de antigas edificações. Em todo o mundo, grandes quantidades de resíduos de madeira estão disponíveis para alimentar usinas de energia. Infelizmente, no Brasil a maioria destes resíduos não está sendo usada como combustível e, em grande parte, essa abundante fonte de energia está sendo desperdiçada.

Dentre as rotas tecnológicas de aproveitamento desta biomassa está o seu adensamento para formação de pellets e briquetes, a combustão direta em fornos e caldeiras, e a gaseificação que produz um gás combustível constituído principalmente de CO, CO₂, H₂, CH₄ e N₂, que possibilita a utilização dos resíduos de madeira em ciclos mais avançados de conversão de energia, como o ciclo combinado (ciclo Brayton e Rankine), que utiliza turbina a gás e a vapor, respectivamente, para geração de energia elétrica.

1.2 Justificativa

Estima-se que na Região Metropolitana do Recife (RMR) a geração de resíduos da construção civil atinja entre 3.000 e 4.000 toneladas por dia, mas apenas 3% desse total são destinados a locais licenciados (GUSMÃO, 2008). Por outro lado, a destinação clandestina provoca vários transtornos à população, a saber: problemas de saúde pública, pela proliferação de vetores de agentes patogênicos; geração de depósitos instáveis quando lançados em encostas, provocando deslizamentos; obstrução do escoamento de córregos e canais, provocando inundações; entre outros.

O manejo e a disposição dos resíduos da construção civil (RCC) em aterros tem se tornado uma problemática nos grandes centros urbanos devido à falta de áreas disponíveis para deposição, pelos altos custos de manutenção e monitoramento ambiental, mesmo após o seu fechamento, e por causar impactos negativos ao meio ambiente. A alternativa de aproveitamento energético da biomassa oriunda dos RCC (madeiras mistas, compensados e sacos de cimento), a partir da recuperação dos materiais e a sua conversão em energia, tenta reduzir o volume de resíduos destinado aos aterros e usinas de beneficiamento evitando problemas operacionais e ambientais gerados por estes materiais.

A conjuntura atual do Brasil tem criado mecanismos de incentivo ao uso de biomassa para geração de energia elétrica, como é o caso do Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). A possibilidade de aproveitamento energético da biomassa existente nos RCC é um dos caminhos para expansão da oferta de fontes alternativas renováveis em substituição da queima de combustíveis fósseis, obtendo também os benefícios da geração descentralizada, a redução das distâncias para transmissão e suas perdas, e o aumento da confiabilidade.

Podem se destacar algumas outras razões para considerar o uso de resíduos de madeira como fonte de combustível em usinas de energia: menores emissões de SO₂ e de NO que a maioria dos combustíveis fósseis e a valorização energética dos RCC como alternativa viável para este material. O seu uso reduz o risco econômico associado à flutuação dos preços dos combustíveis fósseis e diminui a dependência do petróleo importado.

Outro fato importante a ressaltar é o apoio que o presente estudo recebeu do centro nacional de desenvolvimento científico e tecnológico (CNPq), através de um projeto do laboratório de combustíveis e energia (POLICOM) da Universidade de Pernambuco (UPE), cuja temática é a formação de recursos humanos em biomassa, mais especificamente a biomassa oriunda dos resíduos de construção civil (bioRCC) nos centros urbanos. Para os estudos referentes ao equipamento de gaseificação, o POLICOM desenvolve um projeto P&D da AES Brasil que objetiva implementar um sistema de energia por meio do desenvolvimento de um pirolisador multcombustível. O POLICOM também promove um projeto de apoio às ações do grupo de trabalho sobre co-produtos na rede brasileira de tecnologia de biodiesel (RBTB), através da financiadora de estudos e projetos (FINEP).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é o estudo das técnicas de reaproveitamento energético dos resíduos de biomassa provenientes da construção de edifícios residenciais do tipo multifamiliar (bioRCC), utilizando a tecnologia de gaseificação, e sua viabilidade para geração de energia elétrica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Obter dados da composição do bioRCC (qualitativa e quantitativa);
- Analisar as propriedades físico-químicas do bioRCC e do combustível gasoso relacionando aos requisitos para uso energético;
- Avaliar parâmetros energéticos do bioRCC e do combustível gasoso proveniente da gaseificação.

1.4 Metodologia

Para atingir os objetivos prescritos anteriormente foi necessária a realização de uma série de atividades, conforme descritas abaixo:

- i) revisão bibliográfica sobre os temas envolvidos, reunindo informações de publicações nacionais e internacionais, e também informações de relatórios técnicos;
- ii) coleta de amostras de resíduos de biomassa oriundos de atividades de construção civil em canteiros de obra (bioRCC) localizado na cidade de Recife/PE;
- iii) caracterização de amostra de bioRCC por meio de separação tátil-visual, realizando a segregação dos demais materiais de construção, e a classificação considerando o material constituinte, processo de fabricação e emprego na obra;
- iv) beneficiamento de amostras de bioRCC, para fins de redução do tamanho das peças e a peletização (densificação) do material;
- v) execução de ensaios laboratoriais, tais como densidade aparente, teor de umidade, teor de cinzas, análise elementar, análise termogravimétrica, poder calorífico (PCS e PCI) e análise bromatológica, todos de acordo com as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ASTM (American Society for Testing and Materials);
- vi) realização de ensaios de gaseificação com as amostras de bioRCC utilizando equipamentos em escala laboratorial (gaseificador de bancada) e um em escala piloto (gaseificador de leito fixo *downdraft* TERMOQUIP);
- vii) análise quantitativa e qualitativa do gás gerado pela gaseificação através da cromatografia gasosa;
- viii) análise e interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório e em campo, e comparação com dados da literatura.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido em 06 (seis) capítulos, incluindo este primeiro com uma breve introdução sobre o crescimento do setor da construção civil no Brasil e os impactos gerados pelos seus resíduos, a justificativa para realização da pesquisa, os objetivos geral e específicos, a metodologia, além de sua estrutura.

Os Capítulos 2 e 3 apresentam uma revisão bibliográfica com a fundamentação teórica sobre os resíduos da construção civil, a biomassa e a geração de energia, destacando suas definições, classificações, legislações, normas, impactos gerados e tecnologias de conversão.

No Capítulo 4 é descrito o programa experimental da pesquisa, onde são apresentados os critérios e métodos utilizados para a realização do estudo.

No Capítulo 5 são expostos os resultados, por meio dos dados obtidos nos ensaios, análise e comparações feitas.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões a respeito dos resultados encontrados ao longo da pesquisa, bem como sugestões para futuros.

Por fim, são listadas as referências bibliográficas utilizadas para embasar o trabalho do pesquisador.

2 GESTÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O crescimento populacional nos conglomerados urbanos, o avanço tecnológico nos setores produtivos e o aumento do consumo da população têm provocado grandes mudanças no meio ambiente, através do aumento do consumo dos recursos naturais e conseqüente geração de diversos tipos de resíduos. A partir daí, surgiu uma preocupação global em desenvolver um mecanismo alternativo de consumo dos recursos existentes sem com isto comprometer as futuras gerações.

Um dos principais responsáveis pela degradação ambiental nas metrópoles do Brasil e do mundo é a grande quantidade de resíduos sólidos gerados pelo setor da construção civil, comumente chamado de resíduos da construção civil (RCC). Gusmão (2008) observa que a indústria da construção civil atua com uma grande parcela nestas mudanças devido aos seguintes fatores: possui posição de destaque na economia do país (8,3% do produto interno bruto – PIB e 30,3% do PIB da indústria), maior consumidora de recursos naturais (20 a 50% do total de recursos naturais) e elevada taxa de geração de resíduos (41 a 70% dos resíduos sólido urbano).

A grande quantidade de RCC gerado sem áreas para disposição nos centros urbanos tem despertado a preocupação dos grandes geradores, principalmente pelas novas políticas municipais de gerenciamento de resíduos domiciliar e industrial. Considerando os elevados custos para manejo e disposição dos RCC e a redução da geração ser um processo complexo de médio e longo prazo, o setor da construção civil tem encorajado a reciclagem, a recuperação dos materiais e sua reutilização, possibilitando assim a redução na quantidade de resíduos dispostos nos aterros, e menor custo do gerenciamento dos resíduos sólidos (KOCASOY, 2005).

2.1 Composição dos resíduos da construção civil

A quantificação do impacto ambiental e seus indicadores variam de região para região, dependendo do método construtivo utilizado, do índice de desenvolvimento, do monitoramento da destinação dos resíduos gerados, entre outros. A variabilidade dos indicadores pode ser observada na participação dos resíduos da construção civil (RCC) na massa total de resíduos sólidos urbanos (RSU), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Participação dos RCC na massa total de RSU

Localidade	% RCC nos RSU
Belo Horizonte / MG	54%
Campinas / SP	64%
Recife / PE	41 - 70%
Salvador / BA	41%
EUA	39%
Europa Ocidental	~ 66%
Alemanha	> 60%

Fonte: Adaptado de Pinto (1999).

Na Tabela 2 pode-se observar a diversidade da composição dos resíduos da construção civil em diversas localidades, determinada pela tradição construtiva, nível de tecnologia e pelo local de coleta das amostras.

Uma grande parcela dos RCC é formada de materiais recicláveis, onde se encontra grande quantidade de materiais minerais e menor quantidade de materiais como papel, metal, plásticos e madeira, devido ao processo de aproveitamento imediato pelo seu valor comercial (PINTO, 1999).

Para a estimativa da participação de RCC sobre a massa total de RSU na Região Metropolitana do Recife – RMR (Recife, Olinda e Jaboatão dos Guararapes) pode-se utilizar o índice mediano das cidades brasileiras levantado por Pinto (1999), com valores entre 41% e 70%, devido às atuais informações da geração de RCC ainda serem imprecisas (VALENÇA; MELO; WANDERLEY, 2008).

Tabela 2 – Composição dos resíduos de construção e/ou demolição em diversas localidades (%)

Composição (%) (composição típica)	RCC Recife (1)	RCC Olinda (2)	RCC Petrolina (3)	RCC Galícia (4)	RCC Noruega (5)	RCC Califórnia (6)
Argamassas	24,0	22,5	21,0	--	--	--
Concreto	14,0	32,2	10,0	29,3	67,2	10,8
Madeira	2,0	1,0	4,0	5,4	14,6	20,2
Componentes cerâmicos	19,0	32,3	46,0	44,6	--	--
Tijolos	--	10,6	--	--	--	--
Brita	6,0	--	--	0,2	--	1,6
Papel e orgânicos	--	--	--	3,4	1,1	6,2
Solo	23,0	--	--	--	--	6,4
Areia	4,0	1,4	9,0	--	--	6,6
Gesso (dry-wall)	4,0	--	6,0	3,6	2,8	8,1
Metal	1,0	--	--	8,8	3,6	4,0
Material Asfáltico	--	--	--	0,1	0,5	24,6
Plástico	--	--	4,0	3,8	--	0,8
Vidro	--	--	--	0,1	0,3	1,1
Outros	3,0	--	--	0,7	9,9	9,6

Fonte:

- (1) Dados de RCC de obras de edifício residencial multifamiliar em Recife/PE (CARNEIRO, 2005)
- (2) Dados de RCC de pontos de deposição irregular em Olinda/PE (FALCÃO, 2011)
- (3) Dados de RCC provenientes da central de tratamento de resíduos (CTR) de Petrolina/PE (SAMPAIO, 2013)
- (4) Estimativa da composição C&D na região da Galícia, Espanha (LAGE, 2010)
- (5) Projeção da geração C&D na Noruega (BERGSDAL et al., 2007)
- (6) The California Integrated Waste Management Board - CIWMB (STATE OF CALIFORNIA-USA, 2006)

2.2 Legislação vigente

No início da onda ecológica, os ambientalistas estavam mais preocupados com assuntos ligados à preservação de espécies em extinção, desmatamentos, entre outras. Na última década, a legislação ambiental amplia as discussões para as questões sanitárias e de saúde pública. No Brasil, as discussões ambientais sobre geração de resíduos na construção civil têm provocado interesse dos órgãos governamentais por incentivar a implantação de políticas públicas para redução dos índices de perdas e de desperdícios na construção, através de programas de gestão, avaliação de desempenho das construções e estudos da composição dos resíduos.

A preocupação com resíduos sólidos vem crescendo. Há no Brasil a norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 10.004 (2004) – Resíduos sólidos – Classificação, que trata dos resíduos no estado sólido e semi-sólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços, de varrição, entre outras. Os RCC, quanto à origem, são tratados como resíduos de serviço.

A ABNT NBR 10.004 (2004) classifica os resíduos sólidos urbanos em três classes: os perigosos (Classe I), os não inertes (Classe II-A) e os inertes (Classe II-B), definindo critérios específicos de caracterização a partir do potencial de dano ambiental ou à saúde humana (resíduos classe I) e das condições de potabilidade da água em ensaios de solubilidade dos resíduos (Classe II-A e II-B). Para efeito desta norma, os RCC são enquadrados nos resíduos de Classe II B (Inertes).

Recentemente, o governo federal instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Este decreto cria o comitê interministerial da política nacional de resíduos sólidos e o comitê orientador para a implantação dos sistemas de logística reversa.

Para tratar das questões específicas dos RCC, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou em 5 de julho de 2002 a Resolução nº 307, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, criando responsabilidades para os agentes da cadeia: gerador, transportador, receptor e os municípios.

Na Resolução nº 307 do CONAMA (2002) e alterada pela Resolução nº 431 do CONAMA (2011), os resíduos da construção civil são classificados, quanto ao seu potencial de reciclagem da seguinte forma:

- Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

- Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;
- Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

A Tabela 3 apresenta os principais aspectos abordados nas legislações vigentes, no âmbito municipal e federal.

Tabela 3 – Legislações sobre resíduos sólidos

Legislação	Principais aspectos
Decreto municipal nº 18.082/1998 (Recife)	- Regras para a prestação dos serviços de coleta, transporte e disposição final dos resíduos sólidos oriundos da construção civil.
Resolução nº 307/2002 (CONAMA)	- Ações para minimizar os impactos ambientais; - Promove a reciclagem e reutilização dos RCC; - Classificação dos RCC; - Define o plano integrado de gerenciamento de RCC (PIGRCC) com prazos para elaboração e implementação nos municípios; - Estabelece o princípio da co-responsabilidade de todos os geradores.
NBR 10.004/2004 (ABNT)	- Classificação dos RSU quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública; - Classificação dos RCC como resíduos inertes (Classe II B).
Lei municipal nº 17.072/2005 (Recife)	- Estabelece diretrizes e critérios para o PMGRCC; - Regras para a apresentação do projeto de gerenciamento de RCC (PGRCC), obrigatório para o licenciamento de obras de construção, reforma ou demolição que gerem acima de 1m ³ de RCC por dia.
Lei federal nº 12.305/2010 (Brasil)	- Trata de temas relativos à área contaminada, ciclo de vida do produto, coleta seletiva, destinação final ambientalmente adequada, gerenciamento de resíduos, gestão integrada, reciclagem, responsabilidade compartilhada, reutilização, logística reversa e serviço público de limpeza urbana
Lei estadual nº 14.236/2010 (Pernambuco)	- Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, que dispõe sobre as diretrizes gerais aplicáveis aos resíduos sólidos no Estado de Pernambuco, bem como os seus princípios, objetivos, instrumentos, gestão e gerenciamento, responsabilidades e instrumentos econômicos. Dentre outras disposições incentiva a prática dos princípios de Redução, Reutilização e Reciclagem (3Rs).

Após a publicação das resoluções CONAMA, foram criadas leis municipais para tratar do assunto em algumas cidades no Brasil. No caso do Recife existem algumas leis municipais, como por exemplo, o Decreto nº 18.082/98 que regulamenta a lei nº 16.377/98 no que tange à coleta, transporte e disposição final dos resíduos da construção civil; a Lei nº 17.072, de 4 de janeiro de 2005, que estabelece as diretrizes e critérios para o programa municipal de gerenciamento de resíduos da construção civil (PMGRCC); e Lei estadual nº 14.236, de 13 de dezembro de 2010, que dispõe sobre a política estadual de resíduos sólidos.

2.3 Gestão diferenciada dos RCC

Em grande parte do mundo, os resíduos sólidos são dispostos tanto em lixões como em aterros sanitários. Tendo em vista o alto custo do aterramento sanitário, tanto para investimento inicial como durante a operação, sua utilização fica mais comumente confinada aos países desenvolvidos, enquanto os lixões, que não exigem qualquer custo, são os mais utilizados nos países em desenvolvimento. Existem também as deposições irregulares nas cidades, na maioria das vezes, em locais inadequados, como rios, mangues, terrenos baldios, dentre outros; causando impactos econômicos e ambientais.

O gerenciamento destes resíduos deve ser de responsabilidade do município e do setor gerador. A classificação dos resíduos é o que determina a sua disposição final, bem como a responsabilidade do seu gerenciamento.

O fluxo da gestão diferenciada dos resíduos da construção civil nos municípios, definido na resolução CONAMA nº 307 (2002), está apresentado através do esquema da Figura 2. Neste fluxo estão presentes práticas como a da reciclagem, reutilização e a disposição final compromissada dos RCC, que são objetivos secundários exigidos na resolução, mas o objetivo prioritário é a não geração de resíduos.

Este modelo de gestão vem romper com a ineficácia da atual gestão corretiva. A proposição de uma gestão diferenciada dos RCC persegue a ampliação dos serviços públicos constituído por um conjunto de ações, cujos princípios básicos, segundo Pinto (1999), são:

- Captação máxima dos resíduos gerados, através da constituição de redes de áreas de atração, diferenciadas para pequenos e grandes geradores/coletores;

- Reciclagem dos resíduos captados, em áreas perenes especialmente definidas para a tarefa;
- Alteração de procedimentos e culturas, no tocante à intensidade de geração, à correção da coleta e disposição e às possibilidades de utilização dos resíduos reciclados.

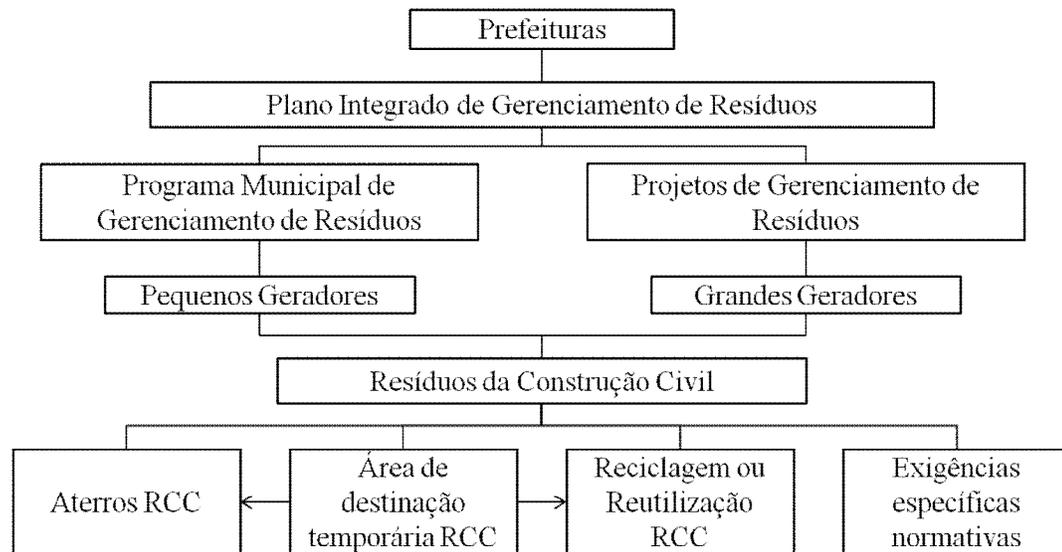


Figura 2 – Estrutura de gestão dos resíduos, conforme a resolução CONAMA nº 307.

(OH; GONÇALVES; MIKOS, 2003)

Ainda de acordo com Pinto (1999), os objetivos gerais da gestão diferenciada dos RCC são:

- Redução dos custos municipais com a limpeza urbana, com a destinação dos resíduos e com a correção dos impactos ocorrentes na gestão corretiva;
- Disposição facilitada de pequenos volumes de RCC gerados;
- Descarte racional dos grandes volumes gerados;
- Preservação do sistema de aterros como condição para a sustentação do desenvolvimento;
- Melhoria da limpeza urbana;
- Incentivo à presença e consolidação de novos agentes de limpeza urbana;
- Preservação ambiental com a redução dos impactos por má deposição, redução do volume aterrado e redução das resultantes da exploração de jazidas naturais de agregados para a construção civil;
- Preservação da paisagem e da qualidade de vida nos ambientes urbanos;
- Incentivos às parcerias para captação, reciclagem e reutilização de RCC;
- Incentivo à redução da geração de resíduos nas atividades construtivas.

A correta gestão dos RCC traz consigo inúmeras melhorias para todos os agentes envolvidos e para a sociedade. Porém a simples importação de modelos e planos de gestão aplicados em outros países ou cidades pode gerar problemas que levem ao seu fracasso. É indispensável então, que sejam realizadas todas as adaptações necessárias, levando-se em consideração as características regionais (CARNEIRO, 2005).

2.4 Participação da madeira nos RCC

De acordo com o WWF-Brasil e SINDUSCON-SP (2011), o Estado de São Paulo consome 15% da madeira amazônica e, deste total, 70% é utilizada na construção civil. No levantamento dos dados de obras de edifícios (múltiplos andares) residenciais e comerciais, verificou-se que em um ano (2009-2010) seis construtoras consumiram 17.997,07 m³ de madeira, sendo que 14.535,34 m³ (80,77%) correspondem a madeira oriunda de reflorestamentos (pinus e eucalipto) e 19,23%, ou 3.461,73 m³, de madeira tropical oriunda da floresta Amazônica. Este fato mostra uma realidade já consolidada no setor da construção civil: a da substituição da madeira nativa por madeira de reflorestamento, alternativa encontrada pelas construtoras para suprir a demanda crescente por madeira, principalmente, nas primeiras fases da obra, ou seja, as fases de fundações e formas para estruturas em concreto armado. Analisando-se o tipo de madeira utilizada, observou-se que 54% da madeira utilizada é sólida na forma de caibros, ripas, sarrafos, vigas, entre outros. Compensados (resinados, plastificados, dentre outros) representaram em torno de 45% do total utilizado. Com isso, pode-se dizer que 99% da utilização da madeira está concentrada em produto de menor valor agregado, sendo que produtos como pisos, decking, portas, janelas, batentes e móveis/playgrounds representaram aproximadamente 1% em volume do total de madeira consumido pelas construtoras.

O resíduo de madeira, apesar do baixo potencial poluidor, têm se constituído de problemas com significativa magnitude nos locais de disposição final, principalmente pelas dificuldades observadas em operações nas frentes de aterramento, além do comprometimento da qualidade da compactação nas células de aterros (TÔRRES FILHO, 2005).

Na Figura 3, Carneiro (2005) apresenta a composição gravimétrica média, dos resíduos de atividades construtivas da cidade do Recife, obtida na caracterização realizada na fase de

produção, onde se observa a baixa quantidade de madeira, metal e papel presentes nos resíduos da construção, devido em grande parte a coleta desses resíduos por pequenos catadores que comercializam estes materiais.

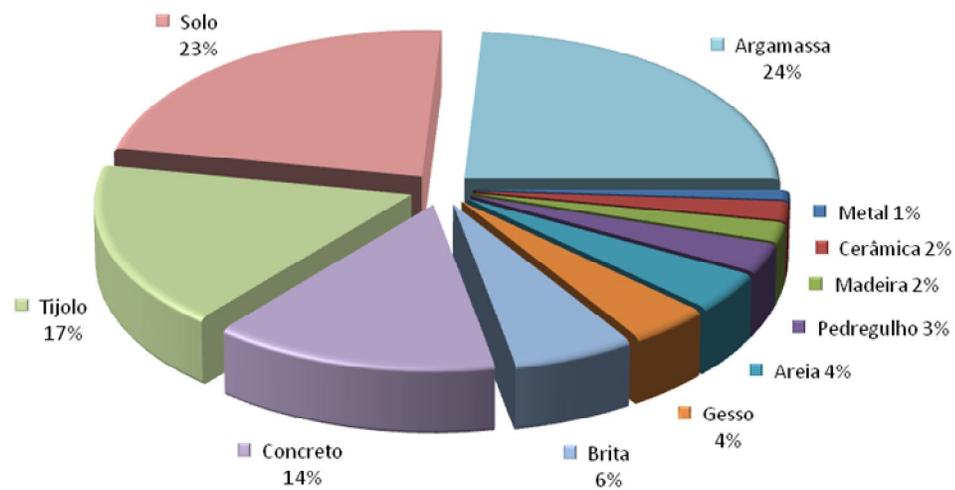


Figura 3 – Participação dos materiais na composição gravimétrica dos RCC na cidade do Recife.

(CARNEIRO, 2005)

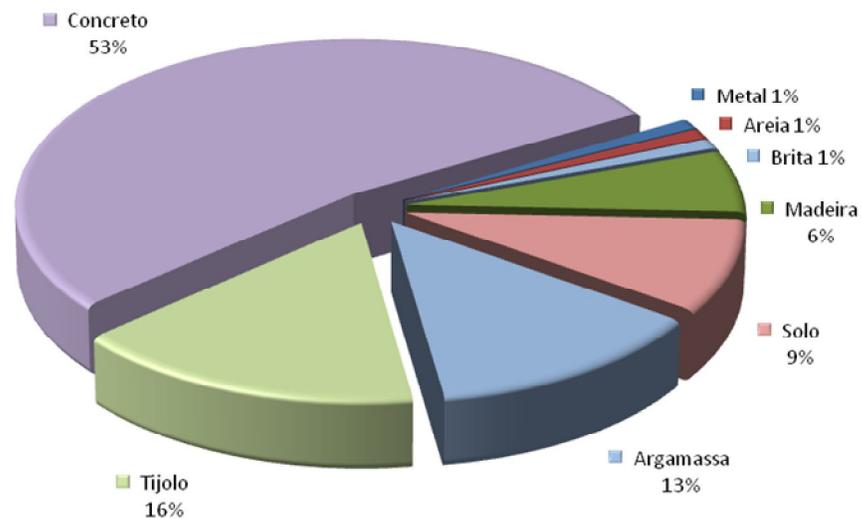


Figura 4 – Participação dos materiais na composição da amostra de RCC – Fase de estrutura.

(CARNEIRO, 2005)

Ainda na pesquisa de Carneiro (2005), dentre as diversas fases da construção de uma edificação, identifica-se que a maior geração de resíduos de madeira (bioRCC) está na etapa

de execução da estrutura, com uma participação de 6% na composição da amostra de RCC, conforme Figura 4.

No diagnóstico da situação do RCC no município de Petrolina, realizado por Santos (2008), evidenciou-se que os resíduos de madeira (bioRCC) no entulho representam 6,25% da geração total estimada pelas empresas construtoras, enquanto que em amostras de RCC coletadas em pontos de deposição irregular do município, apenas 2% destes resíduos foram encontrados.

Esta redução também pode ser identificada na análise gravimétrica dos RCC realizada por Falcão (2011), na cidade de Olinda, onde foram encontrados até 10% de resíduos de madeira (bioRCC) no entulho gerado pelas empresas construtoras, enquanto que nos pontos de deposição irregular do município apenas 1%. A possível justificativa desta baixa quantidade de madeira presente nos pontos de deposição irregular pode ser causada também pela coleta realizada por pequenos catadores.

Na Figura 5 pode-se evidenciar a variabilidade dos índices de participação da madeira em diversos levantamentos gravimétricos da composição dos resíduos da construção civil no Brasil e no mundo, dependendo da tradição construtiva, do nível de tecnologia e do local de coleta das amostras.

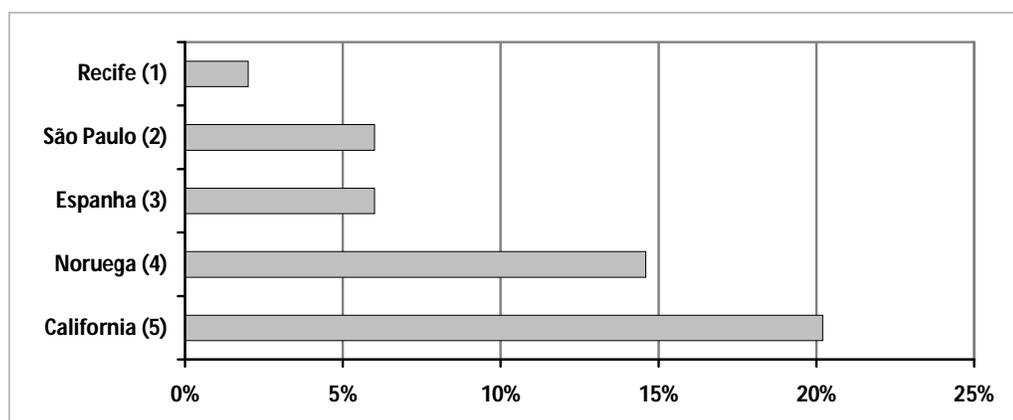


Figura 5 – Participação de madeiras no RCC.

((1) CARNEIRO, 2005; (2) SCHNEIDER, 2003; (3) LAGE, 2010 - dados de 2000;
(4) BERGSDAL *et al.*, 2007 - dados de 2002; (5) STATE OF CALIFORNIA (US), 2006)

3 BIOMASSA E ENERGIA

3.1 Conceito de biomassa

É difícil encontrar uma definição amplamente aceita para o termo Biomassa, contudo, existe uma utilizada na 11ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima realizada em Montreal (UNFCCC, 2005): “Material orgânico não-fossilizado e biodegradável proveniente de plantas, animais e microrganismos, incluindo: (a) os resíduos de biomassa; (b) as frações não fossilizadas e biodegradáveis das indústrias e resíduos urbanos; e (c) os gases e os líquidos recuperados a partir da decomposição de material orgânico não fossilizado e biodegradável”.

Biomassa também é referida como energia solar armazenada sob forma de matéria vegetal, gerada pela fotossíntese, e seus diversos produtos e subprodutos derivados; tais como: florestas; culturas e resíduos agrícolas; dejetos animais; matéria orgânica, contida nos rejeitos industriais e urbanos (PERES, 1997), Figura 6.

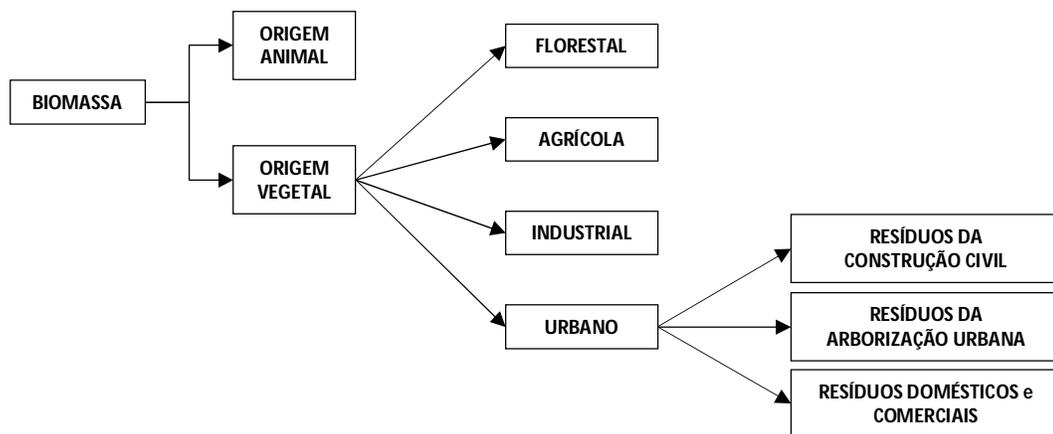


Figura 6 – Classificação do RCC nos tipos de resíduos de biomassa.

(Adaptado de PERES, 1997)

A biomassa é formada a partir da conversão do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera em carboidratos pela energia solar na presença de clorofila e água; como resíduo desta conversão existe a liberação de oxigênio para atmosfera. A absorção da energia solar realizada neste

processo pelas plantas é chamada de Fotossíntese. A energia química armazenada na planta pode ser repassada como alimentos para animais e seres humanos (BASU, 2010).

3.2 Composição química das fibras

A biomassa de origem vegetal (madeira) é uma mistura complexa de material orgânico como carboidratos, gorduras e proteínas, juntamente com pequenas quantidades de minerais como sódio, fósforo, cálcio e ferro. Como pode ser visto na Figura 7, os principais componentes da biomassa vegetal são os extrativos (proteína, óleo, amido, açúcar, entre outros), fibras ou componentes da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) e cinzas (matéria inorgânica), Basu (2010) e Peres (1997).

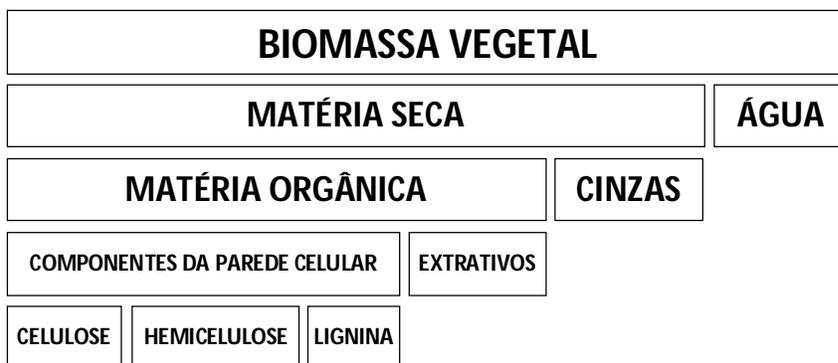


Figura 7 – Fluxograma dos componentes da biomassa vegetal.

(Adaptado de PERES, 1997)

Como pode ser observada na Figura 8, a estrutura celular da madeira possui várias camadas. A unidade celular da madeira que transporta fluido é conhecida como fibras ou traqueídeos. Os traqueídeos, ou tipicamente células, são compostos por uma parede primária (P) (externamente) e uma secundária (S1, S2 e S3) (internamente). Entre as células individuais há uma fina camada a lamela média, a qual une (cola) as células entre si, formando o tecido. A lamela média é predominantemente composta por lignina. A parede secundária (interna à primária) é composta por três camadas: S1, S2 e S3. A camada mais espessa (S2) é feita de microfibrilas que consistem em longas moléculas de celulose com a hemicelulose incorporada. A construção da parede celular na madeira é similar ao concreto armado, com a fibra de celulose atuando como os vergalhões de aço e a hemicelulose como o concreto envolvendo as microfibrilas da celulose. A camada S2 possui maior concentração de celulose.

A maior concentração de hemicelulose está na camada S3 (BASU, 2010 e KLOCK *et al.*, 2005).

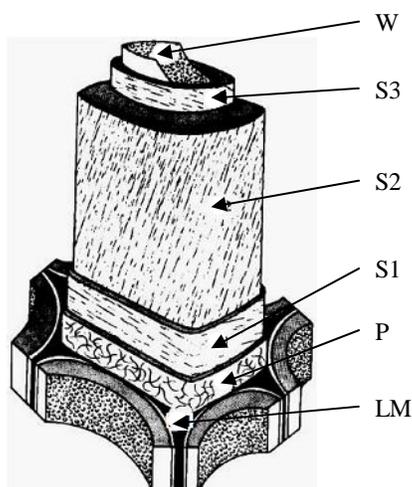


Figura 8 – Camadas da estrutura celular da madeira.
(KLOCK *et al.*, 2005)

Na análise dos componentes das madeiras, no que se refere aos componentes macromoleculares constituintes da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) que estão presentes em todas as madeiras; as proporções e a composição química da lignina e hemicelulose diferem em coníferas (softwoods) e folhosas (hardwoods), enquanto que a celulose é um componente uniforme da madeira, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição média das madeiras coníferas e folhosas

Constituinte	Gaur; Reed, 1995		Klock <i>et al.</i> , 2005		Basu, 2010	
	Coníferas	Folhosas	Coníferas	Folhosas	Coníferas	Folhosas
Celulose	42,2%	42,2%	42 ± 2%	45 ± 2%	40-44%	40-44%
Hemicelulose	28%	38%	27 ± 2%	30 ± 5%	20-30%	20-30%
Lignina	25-35%	15-20%	28 ± 2%	20 ± 4%	25-35%	18-25%
Extrativos	0-1%	0-1%	5 ± 3%	3 ± 2%	-	-

Fonte: Gaur e Reed (1995); Klock *et al.* (2005); Basu (2010).

Liodakis et al (2002) apresentam composição dos constituintes das espécies florestais da região mediterrânea como sendo 41-53% celulose (pirólise 280-400°C), 15-25% hemicelulose e 16-33% lignina (pirólise 280-400°C).

Em madeiras oriundas de zonas temperadas, as porções dos constituintes poliméricos da parede celular somam cerca de 97~99% do material madeira. Para madeiras tropicais, este valor pode decrescer para um valor médio de 90%. A madeira é constituída de cerca de 65 % a 75 % de polissacarídeos (KLOCK *et al.*, 2005).

A celulose é o componente majoritário, perfazendo aproximadamente a metade das madeiras, tanto de coníferas, como de folhosas. Mas sua quantidade pode atingir 90%, como no caso do algodão. Pode ser caracterizada como um polímero linear de alta massa molecular, constituído exclusivamente de β -D-glucose. Devido a suas propriedades químicas e físicas, bem como à sua estrutura supra molecular, preenche sua função como o principal componente da parede celular dos vegetais (KLOCK *et al.*, 2005). Celulose é altamente insolúvel e, apesar de ser um carboidrato, não é digerível pelos seres humanos.

A hemicelulose (ou poliose) está em estreita associação com a celulose na parede celular. Cinco açúcares neutros, as hexoses glucose, manose e galactose; e as pentoses xilose e arabinose, são os principais constituintes das polioses. As cadeias moleculares são muito mais curtas que a de celulose, podendo existir grupos laterais e ramificações em alguns casos. As folhosas, de maneira geral, contêm maior teor de polioses que as coníferas, e a composição é diferenciada (KLOCK *et al.*, 2005).

A lignina é a terceira substância macromolecular componente da madeira. As moléculas de lignina são formadas completamente diferentes dos polissacarídeos, pois são constituídas por um sistema aromático composto de unidades de fenilpropano. Há maior teor de lignina em coníferas do que em folhosas, e existem algumas diferenças estruturais entre a lignina encontrada nas coníferas e nas folhosas. Do ponto de vista morfológico a lignina é uma substância amorfa localizada na lamela média composta, bem como na parede secundária. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e assim fortalecendo, enrijecendo as paredes celulares. A lignina é o agente de cimentação para fibras de celulose que unem as células adjacentes.

Utilizando o método proposto por Van Söest e Robertson (1985) é possível separa fisicamente os constituintes da parede celular em fibra detergente neutro (FDN) (celulose, hemicelulose e lignina), fibra detergente ácido (FDA) (celulose e lignina) e FDA-lignina. Na análise dos constituintes da parede celular do bagaço da cana-de-açúcar, realizada por Peres (1997),

foram encontradas as seguintes proporções: 46,1% celulose, 24,6% hemicelulose, 17,2% lignina e 1,13% cinzas. Estes compostos separados puderam ser usados na bomba calorimétrica para obter o calor de combustão. O poder calorífico superior (PCS) encontrado foi de 18,5 MJ.Kg⁻¹ para o bagaço, 20,1 MJ.Kg⁻¹ para a lignina, 17,0 MJ.Kg⁻¹ para a celulose e 17,5 MJ.Kg⁻¹ para a hemicelulose.

3.3 Propriedades físico-químicas da biomassa

Algumas propriedades físicas da biomassa podem afetar o processo de conversão termoquímica; por exemplo, a densidade e o teor de umidade. De acordo com Basu (2010), a densidade da biomassa pode ser definida de quatro maneiras diferentes: verdadeira, aparente, granel e florestal.

- A densidade verdadeira é a relação entre a massa pela unidade de volume ocupado pelo constituinte sólido da biomassa. A parede celular constitui a maior parcela sólida da biomassa. Para madeira em geral, a densidade da parede celular corresponde a 1.530 g.cm⁻³.
- A densidade aparente é baseada no volume aparente ou externo da biomassa, incluindo o volume dos vazios ou as cavidades celulares. Para biomassa de formas regulares, utilizam-se meios mecânicos, como micrômetro ou paquímetro, para medir os diferentes lados da peça, obtendo assim o volume aparente. Uma alternativa é usar o volume do deslocamento de água com a imersão da peça. A densidade aparente é geralmente usada no cálculo de projetos com biomassa, por ser a mais fácil de mensurar e por fornecer o volume real ocupado pela partícula no sistema.
- A densidade a granel expressa o espaço total ocupado por uma quantidade ou um grupo de partícula da biomassa. O volume a granel inclui o volume intersticial entre as peças, assim como depende de como a biomassa foi embalada.
- A densidade de biomassa (ou florestal) é utilizada na indústria de recursos vegetais para expressar quanto de biomassa está disponível por unidade de área plantada. Ela é definida como a quantidade total, acima do solo, de matéria orgânica viva de árvores expressa como tonelada por unidade de área (ex: tonelada por hectare) e inclui todos os materiais orgânicos: folhas, galhos, ramos, fuste principal, cascas, e árvores.

A influência da umidade afeta negativamente o aproveitamento energético da madeira reduzindo a quantidade de energia global produzida no processo de gaseificação, uma vez que a energia utilizada na evaporação não é recuperada. Por exemplo, são necessárias 580 cal para evaporar 1 g de água. Se a água estiver fortemente ligada à madeira, é necessário mais energia para deslocar essa umidade. Na prática, a madeira seca oferece combustão mais rápida e melhor rendimento na carbonização (QUIRINO, 2000).

Este importante parâmetro de entrada no projeto deve ser conhecido para avaliação de custo da energia gasta para secagem da biomassa. A umidade da biomassa pode aparecer em duas formas: (1) livre ou externa; e (2) inerente ou de equilíbrio. A primeira reside fora da parede celular, enquanto a segunda, é absorvida para o interior da parede celular.

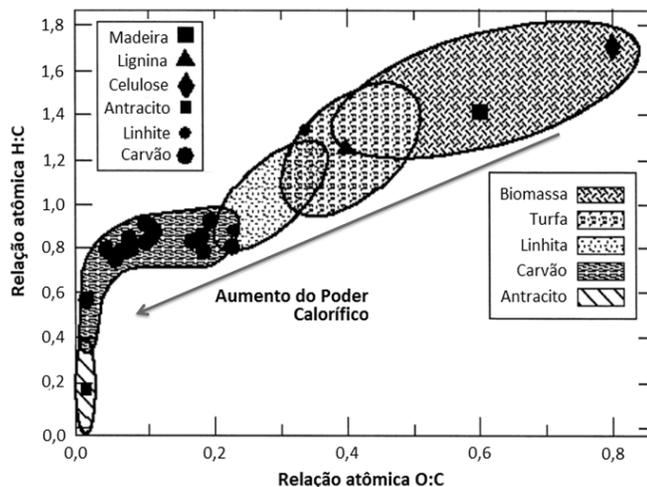


Figura 9 – Diagrama de carbonificação para vários tipos de combustíveis.

(Adaptado de JENKINS *et al.*, 1998)

A composição química da biomassa, também, afeta o processo de conversão termoquímica. Entre todos os combustíveis hidrocarbonados, a biomassa possui o mais alto índice de oxigênio. Infelizmente, oxigênio não traz qualquer contribuição útil ao poder calorífico e torna difícil transformar a biomassa em combustíveis líquidos. O alto conteúdo de oxigênio e hidrogênio na biomassa resulta em alta produção de voláteis e líquidos, respectivamente. O oxigênio consome uma parte do hidrogênio da biomassa para produção desfavorável de água e, portanto, a alta relação de hidrogênio/carbono não se traduz em alta produção de gás combustível (BASU, 2010). Na Figura 9 pode ser observada a influência das razões O:C e H:C no poder calorífico para diferentes tipos de carvão e biomassas.

Com base na composição química elementar podem ser utilizadas várias correlações empíricas para calcular o poder calorífico de um combustível. Uma destas correlações é a fórmula desenvolvida por D. I. Mendeliev e apresentada em Zunatta (2011), com a qual é possível calcular o poder calorífico inferior (em kJ.kg^{-1}) de qualquer combustível sólido ou líquido na base seca (Equação 1).

$$PCI^S = 339C^S + 1030H^S - 109(O^S - S^S) \quad (1)$$

Outra correlação, desenvolvida por Jenkins e apresentada em Cortez; Lora; Gómez (2008) é utilizada especificamente para determinação do poder calorífico de biomassas. Por meio dela, é possível estimar o calorífico superior (em MJ.kg^{-1}) em base seca (Equação 2) a partir da composição da amostra.

$$PCS^S = 2,3381 + 0,35C^S \quad (2)$$

Como pode ser observado nas Equações 1 e 2, os conteúdos de carbono, hidrogênio e enxofre contribuem positivamente tanto para o PCS quanto para o PCI, pois C, H e S são oxidados durante a combustão por reações exotérmicas (formação de CO_2 , H_2O e SO_2). O teor de oxigênio influencia negativamente o poder calorífico. Os teores de cinzas e água também diminuem o valor do PC, uma vez que as cinzas representam a base inorgânica da biomassa e a umidade drena grande parte da energia dos processos termoquímicos de conversão (BASU, 2010).

3.4 Pré-tratamento dos resíduos de madeira

A dificuldade da utilização para o aproveitamento energético dos resíduos de madeira está pela sua baixa densidade, elevado teor de umidade e por se encontrarem dispersos geograficamente, encarecendo a coleta e o transporte. Uma característica bastante comum nestes resíduos é a heterogeneidade (QUIRINO, 2000).

Antes da utilização dos resíduos de madeiras da construção civil (bioRCC) para geração de energia existe a necessidade da separação do material desejado junto aos outros gerados pela obra. A separação pode ser feita no próprio canteiro de obra, pela implantação de um sistema de gestão diferenciada dos RCC, ou em última instância no aterro para onde são destinados os

resíduos de vários locais. A escolha da alternativa ideal depende da localização dos aterros e das usinas, da distribuição das fontes geradas e da disponibilidade dos recursos. A atividade de transporte nesta etapa é decisiva no custo do material, pois independente da alternativa utilizada, deve-se buscar o máximo de economia possível (HOLZ, 2008).

Esses resíduos, da forma como são dispostos, encontram-se em condições impróprias para utilização direta como combustível sólido, em função de inúmeros problemas, tais como a desuniformidade dimensional das peças, a eventual presença de elementos metálicos (pregos, arames, parafusos), entre outros fatores que levam diariamente uma elevada quantidade desses materiais ao descarte, apesar da aptidão natural que os mesmos possuem para sua utilização nos processos de combustão (TÔRRES FILHO, 2005).

Outra condição seria estes resíduos se encontrarem associados a outros produtos químicos, como, por exemplo, tintas, vernizes, produtos de conservação; e conferir características de emissão de gases altamente tóxicos durante a valorização energética (QUIRINO, 2000).

Normalmente, algum tratamento termo-mecânico necessita ser realizado no bioRCC, pois não podem ser utilizados como combustíveis na forma em que se encontram disponíveis. Rendeiro *et al.* (2008) apresentam, a seguir, os mais usuais: secagem, torrefação, briquetagem, peletização e trituração.

- O processo de secagem remove a água contida na madeira promovendo a sua evaporação por transferência de calor, diminuindo o teor de umidade contida. A velocidade de secagem depende da temperatura, da umidade relativa, do fluxo de ar, do tempo de exposição, do teor de água e das características do material.
- A torrefação pode ser definida como um processo de pré-carbonização, o qual se desenvolve justamente na fase endotérmica da pirólise, entre 250 e 300°C. A hemicelulose é degradada, sendo removida a umidade, o ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico.
- A briquetagem é um processo de densificação de resíduos. Transforma um resíduo de baixíssima densidade em uma lenha de alta densidade energética, da ordem de 2 a 5 vezes

maior, considerando a densidade a granel e o poder calorífico obtido após o processo, conforme exemplos na Tabela 5. Na Figura 10 pode ser visto material briqueteado.

Tabela 5 – Densidade e poder calorífico dos resíduos e dos correspondentes briquetes

Tipo de resíduo	Densidade natural do resíduo (kg.m^{-3})	Densidade de um briquete (kg.m^{-3})	Densidade à granel do briquete (kg.m^{-3})	Poder calorífico inferior (kJ.kg^{-1})
Palha de milho	33	910	550	14.937
Pó de serra	274	1.220	570	20.418
Aparas de madeira	112	1.160	565-615	20.084
Usina de compensado	132	830	560	18.510
Casca de arroz	150	1.280	610	15.607
Bagaço-de-cana	180	1.100	500-600	15.481

Fonte: Quirino (2000).

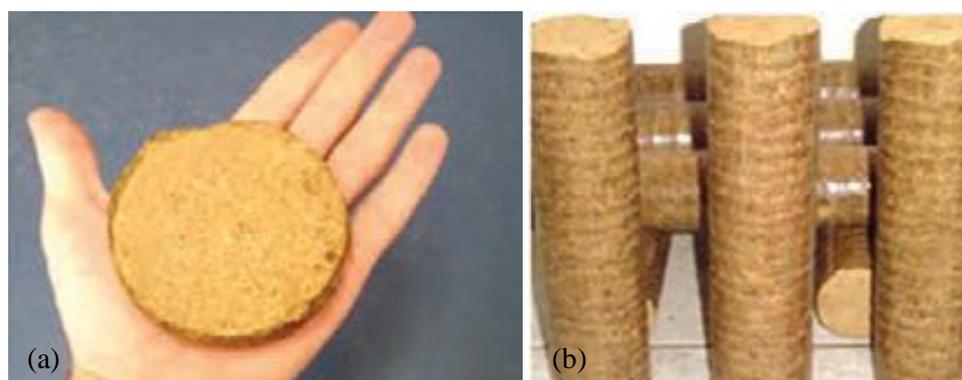


Figura 10 – Material briqueteado: (a) bolacha (b) tarugos.

(RENDEIRO *et al.*, 2008)

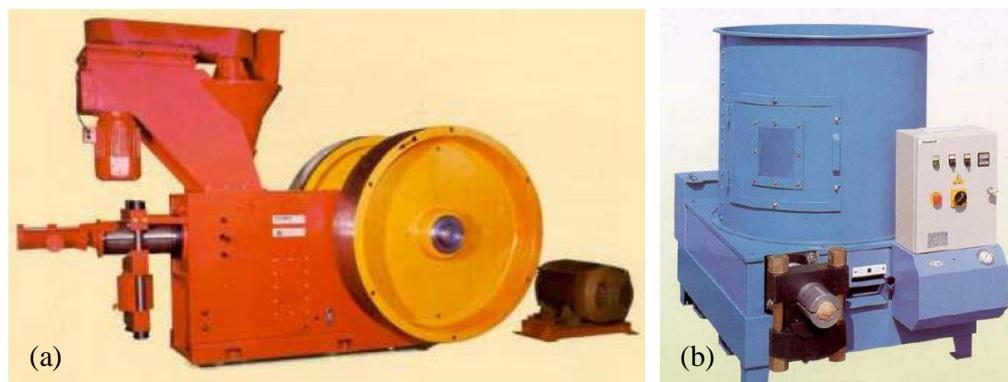


Figura 11 – (a) Prensa mecânica (b) Prensa hidráulica.

(QUIRINO, 2000)

A briquetagem é realizada a elevada pressão e temperatura em prensas mecânicas (Figura 11.a), hidráulicas (Figura 11.b) ou de rolos, as quais provocam a plastificação da lignina que atua como elemento aglomerante das partículas, formando os briquetes. Pode ser usado em caldeiras e queimadores industriais e fornos, com aplicação industrial ou doméstica.

- O processo de peletização é semelhante ao da briquetagem, sendo que é feito por uma prensa de peletização, Figura 12.b, que consiste de um rolo e uma matriz de disco ou de anel. Os pellets são bastante similares aos briquetes, de mesmo formato se diferenciando apenas nas dimensões (ϕ 5 a 30 mm), Figura 12.a.



Figura 12 – (a) Pellets de madeira mista (b) Peletizadora.

(a) (Foto do autor) (b) (RENDEIRO *et al.*, 2008)

Os pellets e os briquetes podem ser um excelente substituto comercial da madeira nativa e lenha para uso residencial e industrial, por causa de sua uniformidade de tamanhos e embalagens, fácil armazenamento, higiênico, regularidade térmica, utilização direta nas fornalhas, como também pode reduzir a comercialização ilegal de madeira.

- A trituração é pré-requisito para vários processos de reaproveitamento de produtos para fins energéticos. Visa reduzir o tamanho das peças a dimensões abaixo de 5-20 mm, proporcionando uma melhor alimentação na fornalha com aumento significativo da área do combustível. O processo de trituração pode ser feito por compressão, impacto por compressão, desgastes nas arestas (“nibbling”), impacto, abrasão e raspagem (“shredding”).

3.5 Matriz energética brasileira

Até o século XIX, mais de 50% da energia consumida no Brasil e no mundo provinha da madeira. No final do século XIX, a biomassa começou a perder a liderança histórica para a energia do carvão, e no século XX, a civilização moderna com o crescimento industrial optou pelo uso generalizado de combustíveis fósseis (petróleo, gás e derivados), como pode ser observado na Figura 13. O uso da lenha foi até recentemente considerado um indício de atraso, não apenas econômico ou tecnológico, mas até quanto ao nível de civilização de uma nação. A utilização da biomassa foi reduzida praticamente às residências particulares em regiões agrícolas (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

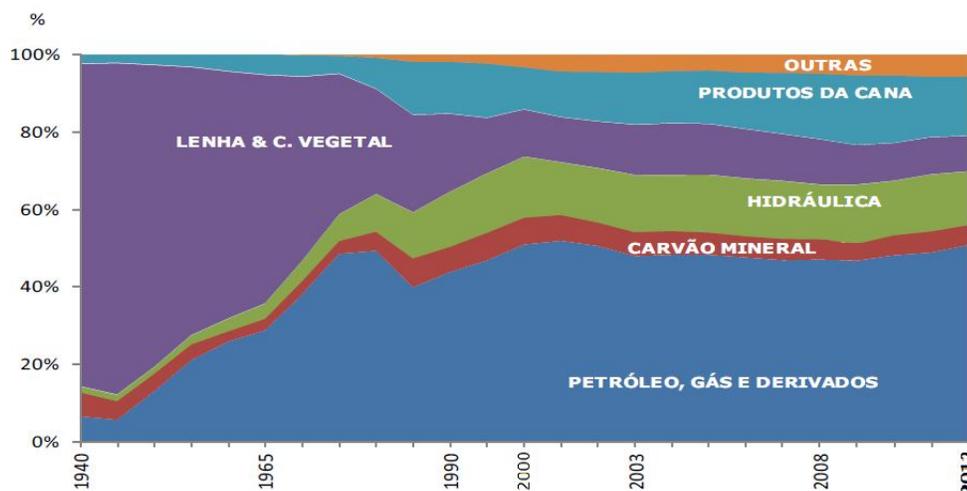


Figura 13 – Oferta interna de energia no Brasil 1940-2012.
(EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013)

No mundo começa a fortalecer a teoria de que o uso do combustível fóssil é uma prática meramente extrativista, não muito diferente daquela em que os primatas colhiam seu alimento de árvores, mas com consequências climáticas catastróficas pelo aumento da temperatura média do globo devido ao efeito estufa. Por isso, hoje, o aproveitamento da biomassa é associado a estágios mais elevados de produção, envolvendo sofisticadas técnicas agrícolas e o processamento físico e químico dos insumos (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável. A utilização da biomassa¹ como fonte de energia elétrica tem sido crescente no Brasil, principalmente em sistemas de cogeração (pela qual é possível obter energia térmica e elétrica) dos setores industriais e de serviços. Em 2012, ela foi responsável pela oferta de 40,3 TWh (terawatts-hora), segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2013 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013). Este volume foi 124% superior ao de 2007 e, ao corresponder a 6,8% da oferta total de energia elétrica, obteve a segunda posição na matriz da eletricidade nacional. Somando as importações, pode-se afirmar que 85% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis, como mostra a Figura 14. Na relação das fontes internas, a biomassa só foi superada pela hidreletricidade, com participação de 76,9%. Uma das características termelétricas movidas à biomassa é o pequeno porte com potência instalada de até 60 MW, o que favorece a instalação nas proximidades dos centros de consumo e suprimento (BRASIL, 2008; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013).

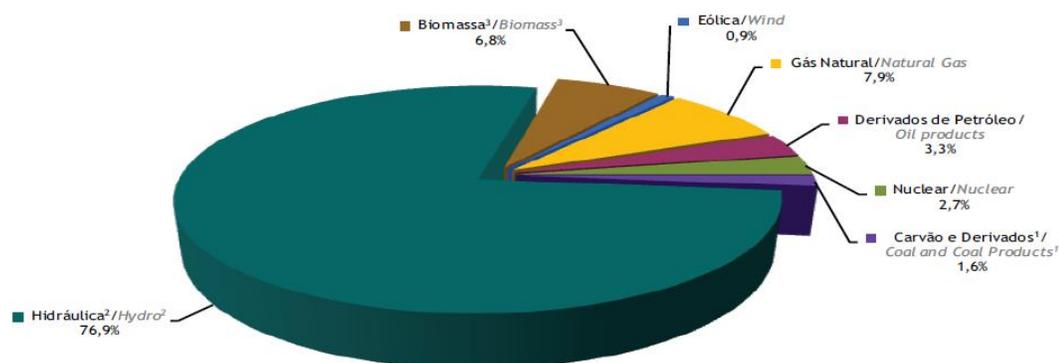


Figura 14 – Oferta interna de energia elétrica por fonte – 2012.
(EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013)

A madeira é um componente essencial no atendimento da demanda energética do Brasil, tudo indicando que isso continuará sendo predominante, com a maior parte do consumo situada nos setores de produção de carvão vegetal, domiciliar, industrial e agropecuário. Da mesma forma, ainda há espaço adicional para que ela possa contemplar outras oportunidades de uso energético, graças ao seu alto potencial renovável e produtivo, especialmente no caso brasileiro, podendo expressar uma matriz energética ambientalmente mais saudável e socialmente mais justa (BRITO, 2007).

¹ Biomassa inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações

Para se ter uma idéia do potencial energético envolvido, considerando o percentual médio de bioRCC como sendo 5% dos resíduos totais durante a construção de uma edificação na Região Metropolitana do Recife (RMR) e uma geração de resíduos da construção civil atinja entre 3.000 e 4.000 toneladas por dia, conforme Gusmão (2008), a geração de resíduos de madeira em canteiros de obra (bioRCC) atingiria valores em torno de 200 toneladas diárias. Com base na National Association for Forest Industries, da Austrália (2005), que considera uma geração de energia elétrica entre 1200 a 1800 kWh por tonelada de madeira seca, portanto, a biomassa existente nos RCC na RMR, possui uma capacidade teórica de geração de energia mensal de até 10.000 MWh, que seria suficiente para suprir aproximadamente 75.000 casas populares.

3.6 Tecnologia de conversão dos resíduos de madeira em energia ou em combustível

Um resíduo ligno-celulósico pode ser transformado em partículas e constituir-se em painéis à base de madeira, como também utilizado energeticamente na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em grupos geradores ou termelétricas. Outro aproveitamento é sob a forma de combustível sólido, como o carvão vegetal. Pode ainda ser gaseificado transformando-se em um combustível gasoso ou utilizado como gás de síntese (QUIRINO, 2000). Na Figura 15 pode-se ter uma noção geral das formas de aproveitamento dos resíduos desta biomassa.

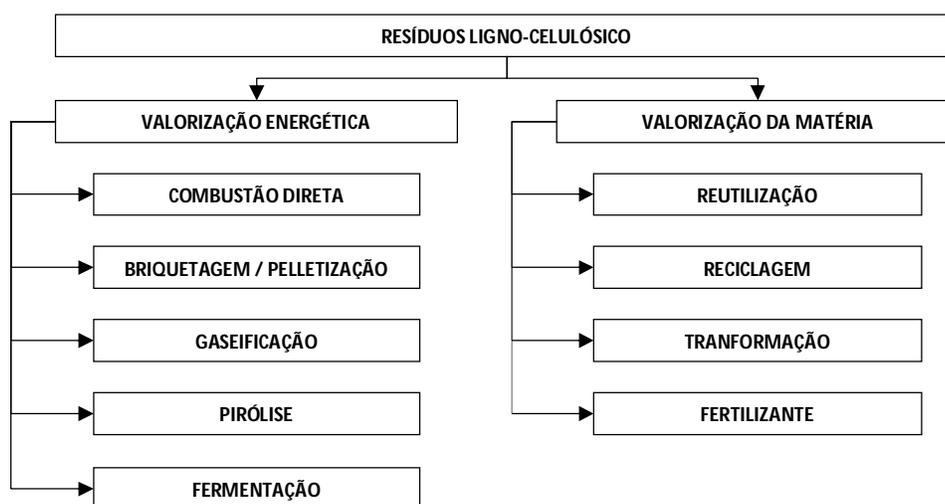


Figura 15 – Possibilidade de aproveitamento dos resíduos da biomassa.

(Adaptado de QUIRINO, 2000)

Quirino (2000) lista as diversas maneiras de utilização dos resíduos de madeira como fonte energética:

- queima direta, em caldeiras, como lenha ou resíduo, gerando calor ou vapor de processo;
- queima direta em termelétrica para produção e comércio de energia elétrica;
- queima direta em queimadores de partículas como ocorre na indústria de cerâmica vermelha;
- compactação de resíduos, transformando-os em briquetes para posterior utilização como lenha, em todos os processos que tradicionalmente já utilizam lenha, sejam padarias, pizzarias, caldeiras em geral;
- produção de carvão utilizado comumente para carbonização de lenha;
- carbonização dos resíduos sob a forma de partículas;
- produção de carvão ativo, a partir de finos de carvão ou de finos de madeira, através de ativação física ou química.

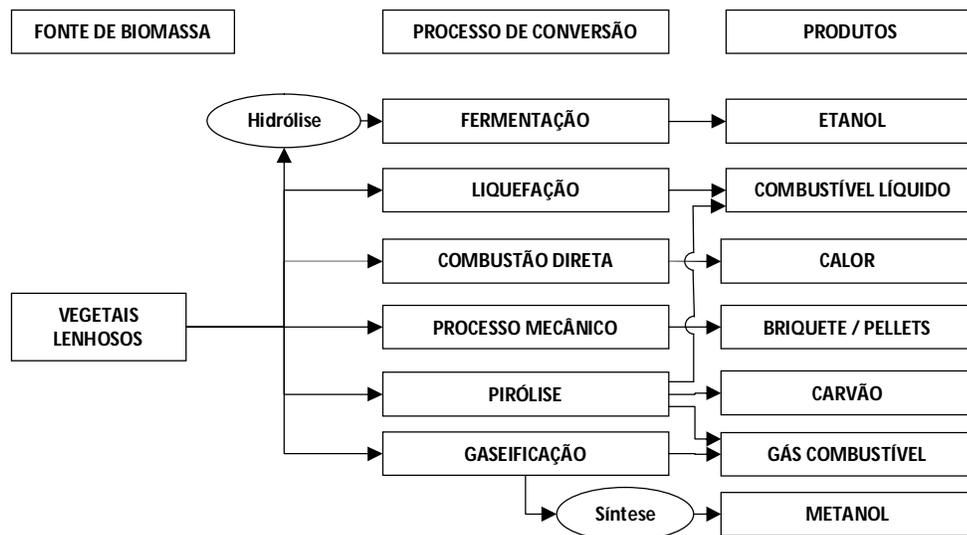


Figura 16 – Processos de transformação de vegetais lenhosos.

(Adaptado de BRASIL, 2005).

Vários são os procedimentos que permitem transformar os resíduos em energia. As tecnologias utilizadas para geração de energia elétrica a partir da biomassa são a combustão direta acoplada a um ciclo de vapor, a pirólise e a gaseificação. A queima direta pode gerar calor e empregado para produzir vapor, denominado de ciclo Rankine (ciclo térmico a vapor). A pirólise e a gaseificação podem gerar um gás combustível ou um gás de síntese (monóxido

de carbono – CO e hidrogênio – H₂) que pode ser utilizado com grupos geradores que operam nos ciclos Otto (motores à centelha), Brayton (turbinas a gás) e/ou combinado (Brayton/Rankine). A carbonização produz um carvão vegetal energético ou de termo-redução na indústria siderúrgica, ou um carvão ativo (QUIRINO, 2000). A Figura 16 mostra os processos de conversão energética dos resíduos de madeira.

A National Association for Forest Industries (AUSTRÁLIA, 2005) destaca como principais tecnologias dentre as diversas tecnologias de conversão que utilizam resíduos de madeira para a produção de energias renováveis, as seguintes:

1. *Combustão direta de biomassa para a geração de vapor superaquecido por transferência de calor* – combustão direta é o processo usado por mais de 90% das plantas de bioenergia no mundo. Em geral, os gases quentes provenientes da combustão de biomassa fluem ao longo de um conjunto de bancos de tubos, aquece a água nos bancos de tubos para produzir vapor. Isto é semelhante à tecnologia utilizada por muitos moinhos que utilizam seus resíduos de madeira para a produção de calor e vapor para a secagem ou para operar prensas.

A combustão direta de biomassa para gerar eletricidade e calor (cogeração de produção combinada de calor e eletricidade) pode adicionar uma turbina a vapor nos processos de queima direta, sendo possível gerar eletricidade que pode ser consumida no próprio local ou vendidos na rede.

2. *Co-combustão* – A combustão de resíduos de madeira com carvão e/ou bagaço (a partir de refinarias de açúcar) para gerar eletricidade. Os resíduos de madeira podem ser fornecidos em várias formas, incluindo lascas de madeira, gás de síntese (de gaseificação) ou bio-óleo (a partir de pirólise).

3. *Pirólise* – O aquecimento dos resíduos de madeira, em ambiente controlado (sem oxigênio) para produzir quantidades variadas de óleo, gás e carvão. O gás pode ser queimado para produzir eletricidade e o bio-óleo pode ser usado como matéria-prima química ou como um substituto para o combustível diesel por geradores de energia estacionários.

4. *Gaseificação* – O aquecimento da madeira com uma pequena quantidade de oxigênio sob determinadas condições que torna uma proporção elevada da madeira em um gás combustível. É um processo altamente eficiente e algumas aplicações comerciais da tecnologia estão disponíveis. Há ainda algumas dificuldades técnicas associadas com a

de ciclo combinado nas usinas a gás a serem superadas. No entanto, é possível utilizar o gás da madeira para as operações de co-combustão em fornos de carvão.

5. *Pelletização / briquetagem* – combustíveis como pellets e briquetes são feitos por compressão de partículas finas de madeira e compostos resinados na presença de calor para produzir pequenos blocos que podem ser utilizados em estações de carvão ou usados diretamente em unidades de aquecimento doméstico.
6. *Conversão químico-biológica de produção de combustíveis líquidos* – A produção de combustíveis líquidos tal como o etanol a partir de resíduos de madeira baseia-se em uma série de reações químicas e processos biológicos que convertem quimicamente os polissacarídeos dos compostos ligno-celulósicos em açúcares simples e, em seguida, etanol (álcool etílico). Não há aplicações comerciais dessa tecnologia atualmente disponível.

3.6.1 Tecnologia de gaseificação

A gaseificação e a combustão direta acoplada a um ciclo de vapor apresentam-se como importantes tecnologias utilizadas dentre os processos de conversão e geração de energia elétrica a partir da biomassa. Ambos os processos consistem da reação dos componentes da biomassa com o ar. O primeiro ocorre com a falta de oxigênio enquanto que o segundo geralmente com oxigênio, para garantir a combustão completa.

A combustão é uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor e formando como produto um grupo de espécies diferentes dos reagentes (RENDEIRO *et al.*, 2008). O calor é uma energia muito difícil de ser armazenada, exigindo então que seja consumida imediatamente. Uma maneira de transformar a biomassa num energético mais fácil de ser utilizado, transportado ou até mesmo ser convertido em líquido, é a gaseificação.

Os princípios básicos da gaseificação de biomassa são conhecidos desde o final do século XVIII. As primeiras aplicações comerciais foram registradas em 1830. Em 1850, grande parte da cidade de Londres era iluminada com gás e a indústria então estabelecida cresceu usando gaseificadores para produzir gás, principalmente de carvão mineral e madeira. Em 1881, pela primeira vez o gás de gaseificação foi usado para acionar um motor de combustão interna.

Nos anos de 1920 várias demonstrações de aplicações estacionárias, caminhões, tratores e automóveis aconteceram na Europa e outras partes, mas foram aos poucos abandonadas. Durante a Segunda Guerra Mundial os gaseificadores de biomassa para a geração de eletricidade reapareceram com força na Europa, Ásia, América Latina e Austrália, devido à escassez de petróleo. Apenas na Europa cerca de um milhão de veículos eram acionados por gaseificadores naquela época usando carvão vegetal ou madeira. Com o fim da guerra foram todos abandonados novamente. As crises energéticas dos anos de 1970 e 1980 reacendem o interesse pela gaseificação de biomassa (STASSEN, 1995).

O objetivo do processo de gaseificação é converter o máximo da biomassa em gás de síntese (CO – monóxido de carbono e H₂ – hidrogênio), transformando não só a água e os voláteis em vapor e gases, como também converter o carbono fixo em gases (RENDEIRO *et al.*, 2008). Os principais compostos formados nesse processo são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e nitrogênio (N₂), com traços de C₂H₄, C₂H₆ e C₃H₆, bem como alcatrão e particulado (SALES; ANDRADE; LORA, 2006; PERES, 1997).

Idealmente, o processo produz apenas gases não condensáveis e resíduos de cinza. Porém, na realidade, a gaseificação incompleta do carvão e o alcatrão da pirólise irão produzir um gás combustível contendo vários contaminantes. A composição do gás e o nível de contaminação variam com a matéria-prima, tipo de reator e parâmetros de operação.

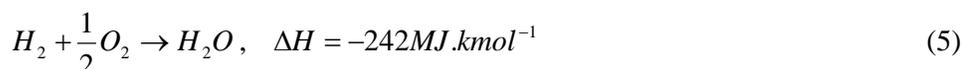
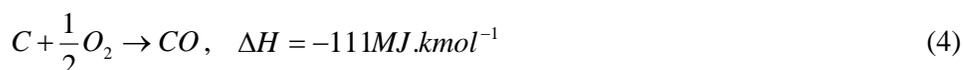
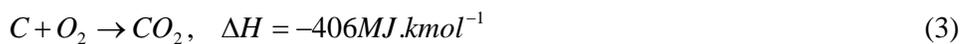
De acordo com Rendeiro *et al.* (2008), as principais etapas do processo de gaseificação são a secagem, pirólise, combustão e redução. Na etapa de secagem ocorre a retirada da umidade contida no combustível sólido através da adição de calor, que provoca a evaporação da água. A pirólise ocorre após a secagem do combustível sólido, se a sua temperatura for elevada a níveis adequados, acontecerá a liberação dos gases inflamáveis contidos no sólido. Essa fase também é denominada de volatilização. Portanto, nesta fase ocorre a decomposição dos carboidratos (hemicelulose, celulose, lignina) na temperatura que varia de 250°C a 300°C; e, a produção de alcatrão e ácidos leves entre 350°C e 450°C. Desta forma, os produtos dessas etapas são: gases condensáveis (alcatrão e ácidos), gases não condensáveis (CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂) e carvão vegetal.

Nas etapas de redução e combustão, o carvão vegetal residual pode ser convertido em gases pelo processo denominado de gaseificação. A gaseificação é um processo de redução o qual

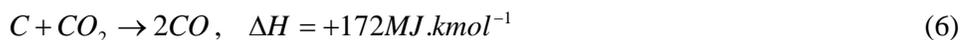
requer energia para que a átomo de oxigênio seja transferido de uma molécula para o carbono do carvão. Conseqüentemente, a gaseificação é um processo endotérmico. Essa energia térmica pode ser fornecida aos reagentes (carvão e gás redutor) a partir de uma fonte externa ou através da combustão de parte da biomassa (voláteis e carvão). As reações químicas que ocorrem são basicamente as combinações de oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio e são classificadas em reações heterogêneas.

Segundo Cortez, Lora e Gómez (2008), ao se realizar o modelamento de um gaseificador, pode-se determinar a composição de equilíbrio do gás produzido através de equações termoquímicas. Essas equações prevêm o estado de equilíbrio das reações básicas envolvidas na gaseificação em função dos principais parâmetros, ou seja, pressão, temperatura, umidade do combustível, teor de oxigênio no agente gaseificador e tipo de combustível. Durante os processos de gaseificação, ocorrem principalmente reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução envolvendo fases sólida e gasosa. As reações exotérmicas fornecem energia para as reações endotérmicas na forma de calor, como pode ser vista nas equações abaixo.

Reações de combustão:



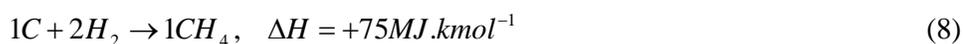
Reação de Boudouard:



Reação de gás-água:



Reação de formação do metano:



Como as reações envolvendo o oxigênio livre (reações de combustão) são essencialmente completadas durante o processo de gaseificação, as reações (3), (4) e (5) não são consideradas para determinação da composição do gás de equilíbrio. As três reações heterogêneas, reações (6), (7) e (8), são suficientes.

Em geral, merecem atenção aquelas situações onde a conversão do carbono é essencialmente completa. Nessas circunstâncias, pode-se reduzir as equações heterogêneas em duas equações homogêneas (fase gasosa, equações 9 e 10):

Reação homogênea do gás d'água (water shift):



Reação de formação do metano:



As reações (3), (6), (7) e (8) descrevem os quatro modos de como um combustível composto por carbono e hidrogênio pode ser gaseificado. As reações de oxidação do carbono são fortemente exotérmicas, rápidas e podem ser consideradas irreversíveis nas temperaturas normais de gaseificação. A reação de Boudouard (6) passa a ser mais importante na produção de monóxido de carbono puro durante a gaseificação do carbono puro com uma mistura de O₂ e CO₂, na faixa de 800 a 900 °C. Já a reação de gás d'água (9) é a base de todo processo de gaseificação hidrogenado. A reação (10) deve ser priorizada quando o objetivo é a produção de metano (HIGMAN e BURGT, 2008).

Na gaseificação, o objetivo principal é maximizar a produção de CO, H₂ e CH₄, constituintes do gás combustível produzido. Os fatores que afetam a condição de equilíbrio dos gases são temperatura, pressão, umidade do combustível, teor de oxigênio no reator e o tipo de combustível (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Uma ferramenta que pode ser utilizada para identificar as etapas que ocorrem durante a carbonização é a análise termogravimétrica (ou análise imediata) usada para determinar alterações da massa de amostras em função da temperatura. A Figura 17 mostra a evolução da perda de massa de cada um dos principais componentes da madeira (hemicelulose, celulose e lignina).

A aplicação típica desta técnica está na avaliação da estabilidade térmica e temperatura de decomposição. A derivada primeira da curva termogravimétrica (TGA) é a termogravimetria derivada (DTG), que mostra a variação de massa em função da temperatura sob a forma de picos, que definem melhor o início e o fim de um processo.

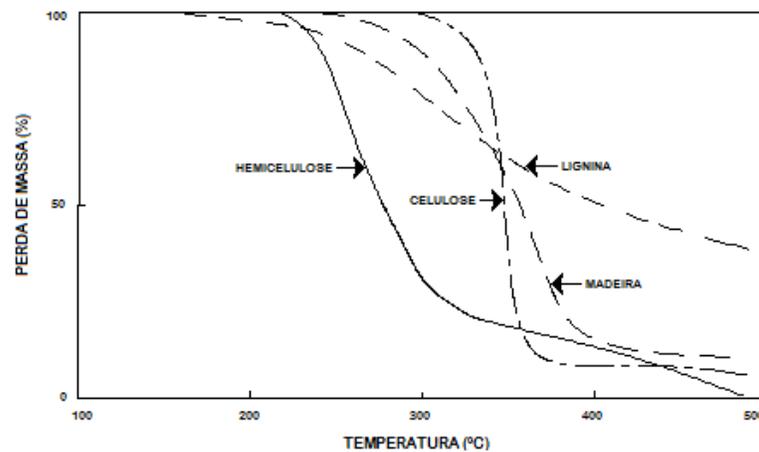


Figura 17 – Análise termogravimétrica da madeira e de seus componentes.
(VIVACQUA FILHO,1982 apud TÔRRES FILHO,2005).

3.6.2 Tipos de gaseificadores

O gaseificador consiste de um reator químico alimentado por combustível sólido ou líquido e com a quantidade controlada de ar forçada para dentro do equipamento, posicionado de acordo com o projeto. Corrêa Neto (2001) afirma que uma instalação de gaseificação é constituída principalmente por unidades de pré-processamento (estoque, transporte e redução da biomassa ao tamanho adequado), seção de alimentação apropriada para não haver vazamento de gás, tratamento do gás com limpeza e, se necessário, resfriamento, sistema de controle, e tratamento dos efluentes com disposição adequada. A Tabela 6 ilustra as diversas formas pelas quais os gaseificadores podem ser classificados de acordo com diversas características.

Os gaseificadores hoje existentes representam um estágio avançado de alguns modelos desenvolvidos desde os primórdios da evolução desta tecnologia, a fim de atender às particularidades das matérias primas e à demanda de gás. Embora existam outros parâmetros que possibilitem esta classificação, a maioria dos gaseificadores em comercialização ou em

fase de desenvolvimento é classificada segundo o tipo de leito utilizado: de leito fixo e de leito fluidizado (ou circulante). Entre os vários tipos de gaseificadores o de leito fixo é o mais utilizado e com tecnologia mais difundida (SANTOS, 2006).

Tabela 6 – Características dos gaseificadores

Características	Variações	
Poder calorífico do gás produzido	Baixo	Até 5MJ.Nm ⁻³
	Médio	Entre 5 e 10 MJ.Nm ⁻³
	Alto	Entre 10 e 40 MJ.Nm ⁻³
Tipo de agente gaseificador	Ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio (hidrogaseificação)	
Movimento relativo das massas	Leito fixo	Contrafluxo (contracorrente) <i>updraft</i> Fluxo direto (co-corrente) <i>downdraft</i>
	Leito fluidizado	Leito circulante
Pressão de trabalho	Baixa pressão	Atmosférica
	Pressurizados	Até 6 MPa (59,2 atm)
Natureza da biomassa	Resíduos	Agrícolas, industriais e sólidos urbanos
	Biomassa	<i>In natura</i> , peletizada, pulverizada

Fonte: Santos (2006); Corrêa Neto (2001)

Os gaseificadores de leito fixo destacam-se pelo escoamento do combustível por gravidade, ou seja, o leito move-se do topo para o fundo do reator. Também podem ser classificados de acordo com o movimento do fluxo gasoso através da “cama” de combustível: os de corrente ascendente (ou *updraft*) e os de corrente descendente (ou *downdraft*). Também, podem ser divididos em relação ao sentido e à direção do fluxo do combustível a ser gaseificado e o fluxo do gás gerado. Caso tenham mesma direção e sentido, a gaseificação é denominada concorrente; caso tenham mesma direção e sentido oposto, chama-se a gaseificação de contracorrente; e se tiverem direção cruzada, a gaseificação é de corrente cruzada (*cross-current*), Santos (2006).

Gaseificação termoquímica é a conversão por oxidação parcial à temperatura elevada de uma matéria-prima carbonácea como a biomassa ou carvão. A oxidação parcial pode ser realizada utilizando ar, oxigênio, vapor de água ou uma mistura destes. Quando o processo utiliza o ar, como agente oxidante, e rejeitos ligno-celulósicos sem qualquer contribuição externa de

energia; o gás produzido tem um PC entre 4-6 MJ.Nm⁻³ (gás de baixo poder calorífico). Os gases de baixo PC são usados diretamente em combustão ou como combustível de motores que utilizam o ciclo Otto. Já se o agente for O₂ puro, é possível obter um gás com cerca de 10-20 MJ.Nm⁻³ (gás de médio ou alto poder calorífico). Entretanto, é importante também considerar os fatores econômicos, pois a utilização do oxigênio para gaseificação torna o processo caro, e o ar é normalmente usado para processos até cerca de 50 MW (BRIDGWATER, 1995 e MCKENDRY, 2002). Características típicas do “*syngas*” são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características do gás produto

Tecnologia	Composição (%)					PCS [MJ.Nm ³]	Qualidade do gás	
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂		Alcatrão	Particulado
Leito fixo atmosférico	9	14	20	7	50	5,4	Regular	Pobre
<i>Updraft</i> atmosférico	11	24	9	3	53	5,5	Pobre	Boa
<i>Downdraft</i> atmosférico	17	21	13	1	48	5,7	Boa	Regular
<i>Downdraft</i> oxigenado	32	48	15	2	3	10,4	Boa	Boa
Leito fluidizado multi-sólido	15	47	15	23	0	16,1	Regular	Pobre
Leito fluidizado (twin)	31	48	0	21	0	17,4	Regular	Pobre

Fonte: Bridgwater *et al.* (2002)

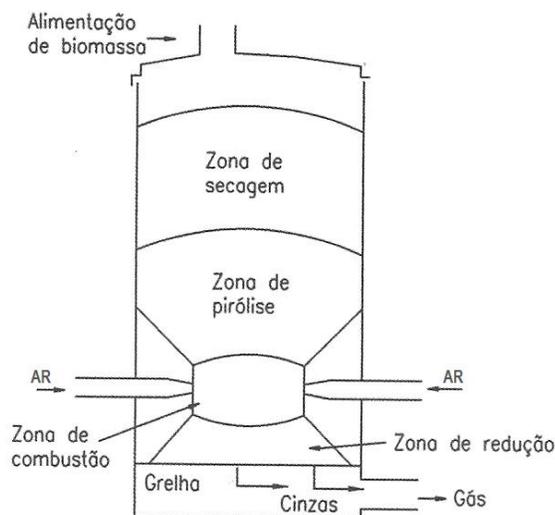


Figura 18 – Gaseificador concorrente.
(CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008)

Neste trabalho, a planta piloto do gaseificador utiliza um reator de leito fixo de fluxo concorrente (*downdraft*) ventilado, com capacidade de bateladas de 30 - 50 kg de biomassa. A

tecnologia de gaseificação downdraft é mais utilizada e difundida. A alimentação de combustível é realizada pelo topo, e a alimentação de ar é feita em fluxo descendente (mesmo sentido do fluxo de combustível), passando pela zona de combustão e redução, conforme Figura 18. Com este tipo de configuração, a mistura de gases na saída é relativamente livre de alcatrão, entre 0,1 e 1,2 g.Nm⁻³, no entanto tem uma quantidade significativa de particulado (cinza e fuligem), entre 0,1 e 1,0 g.Nm⁻³, podendo ser filtrado com certa facilidade (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Embora as tecnologias de gaseificação de biomassa tenham demonstrado sucesso em larga escala, e vários projetos estejam em operação ou em fase avançada de construção, eles ainda são relativamente caros em comparação de energia com base fóssil, e também encontram barreiras econômicas e outras barreiras não técnicas ao tentar penetrar no mercado de energia. Gaseificação de biomassa só será capaz de penetrar o mercado de energia se estiver completamente integrado a um sistema de biomassa, ou seja, a integração da tecnologia de gaseificação em sistemas existentes ou recém-desenvolvidos, onde pode ser demonstrado que o sistema global oferece melhores perspectivas para o desenvolvimento econômico (BRIDGEWATER, 2003).

No Departamento de Engenharia de Processos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Belgrado, vários gaseificadores experimentais de laboratório foram projetados e testados com diferentes tipos de processos de gaseificação utilizando biomassa e resíduos, a fim de beneficiar a energia química contida na biomassa em formas mais convenientes de energia como calor ou eletricidade. Uma unidade de gaseificação *downdraft* de leito fixo com potência térmica de até 0,5 MW foi projetada utilizando resíduos agrícolas da produção de milho (espiga de milho), amplamente disponível, e também muito adequado para gaseificação como biomassa bruta. A espiga de milho mostra-se como um combustível de boa qualidade (PCS de 18,63 MJ.kg⁻¹), que pode produzir gás de alta qualidade (PCS de 6,2 MJ.m⁻³), Trninić *et al.* (2012). A análise aproximada, elementar e composição do gás produzido estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização termo-química da espiga de milho e do gás produto

Análise imediata (%)	
Matéria volátil	81,1
Carbono fixo	17,4
Cinzas	1,4
Análise elementar (%)	
Carbono (C)	47,5
Hidrogênio (H)	6,3
Oxigênio (O)	43,9
Nitrogênio (N)	0,5
Enxofre (S)	0,1
Poder calorífico superior (MJ.kg⁻¹)	
PCS	18,6
Composição do gás produzido (%)	
Monóxido de carbono (CO)	24
Dióxido de carbono (CO ₂)	22
Hidrogênio (H ₂)	10
Metano (CH ₄)	4,7
Nitrogênio (N ₂)	37,7
Oxigênio (O ₂)	1,6
Poder calorífico superior (MJ.m⁻³)	
PCS	6,2

Fonte: Trninić *et al.* (2012)

O balanço de massa e de energia da unidade de gaseificação mostrou que a eficiência do gaseificador pode ser de até 80% do teórico. Com a aplicação de recuperação, ou o uso de gás quente diretamente após o gaseificador, pode ser alcançada uma eficiência de gaseificação de 90%.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Programa experimental

A pesquisa constitui-se em um trabalho no campo experimental que visa levantar as características físico-químicas do bioRCC relacionadas aos requisitos para uso energético. Também, foi realizada uma análise documental da obra investigada para obtenção da composição gravimétrica e estimativa da geração de resíduos de madeira. Para atingir os objetivos, a metodologia divide-se em 03 (três) etapas, detalhadas na Figura 19: coleta e preparo da biomassa, caracterização físico-química e energética da biomassa, e ensaios de gaseificação da biomassa.

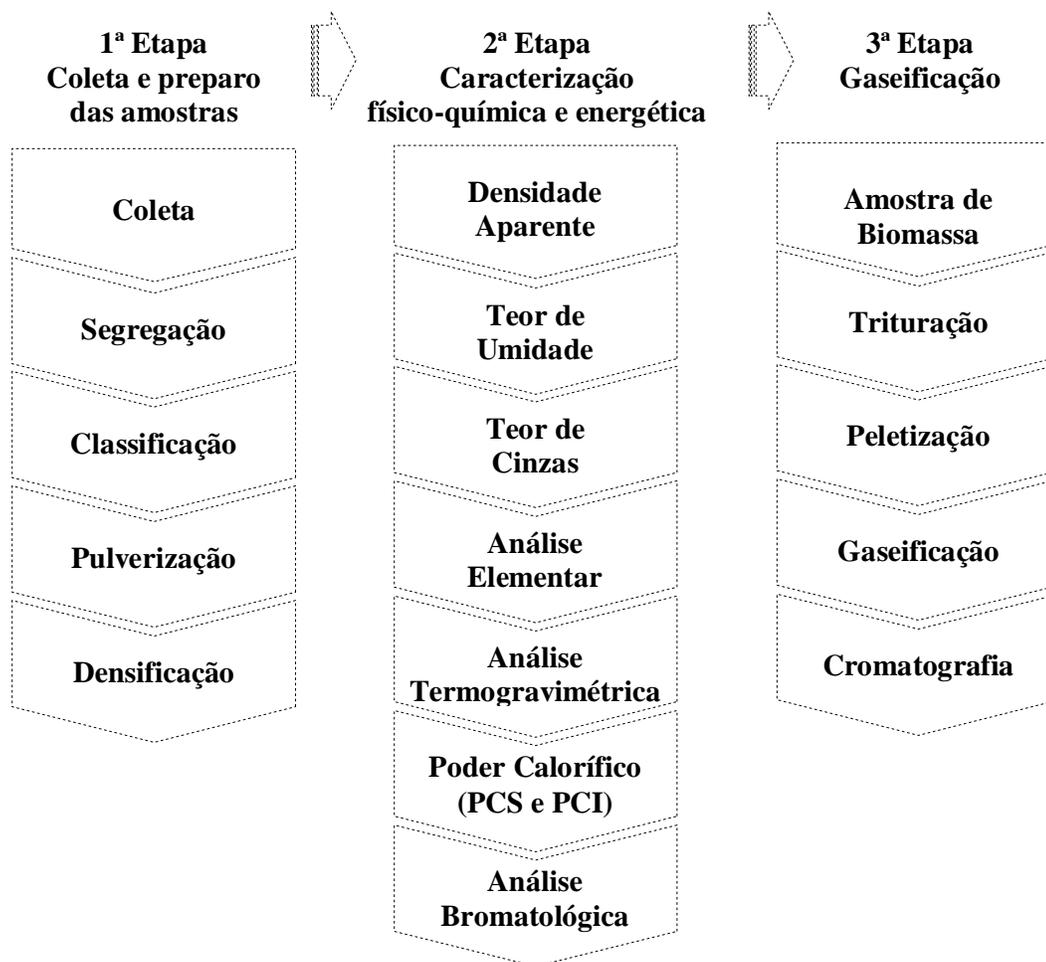


Figura 19 – Etapas da pesquisa.

4.2 Caracterização da obra

O empreendimento escolhido para realizar a pesquisa de campo foi um edifício residencial multifamiliar construído em estrutura de concreto armado, composto por pavimentos térreo, garagens, salão, 34 pavimentos tipo e cobertura; totalizando 40 pavimentos em um total de área construída de 11.416,91 m². A empresa pratica uma política de gestão de resíduos com implantação do Projeto de Gerenciamento de Resíduos que prevê uma gestão diferenciada de RCC, controle do quantitativo de RCC gerado na obra e registro da destinação final.

4.3 Estimativa de geração de resíduos de madeira no canteiro de obra

A estimativa da geração de bioRCC consistiu na consulta da documentação existente no almoxarifado do escritório da obra. Foram analisadas informações contidas nas notas fiscais de compra de madeiras e nos controles de transporte de resíduos de madeira, levantando-se a quantidade de madeira utilizada e sua geração de resíduos durante a execução da obra.

4.4 Coleta e preparo da biomassa

A primeira fase consistiu em trabalhos de campo para coleta de amostras de bioRCC no canteiro de obra durante a etapa de construção de um edifício residencial multifamiliar construído em estrutura reticulada de concreto armado, alvenarias em blocos cerâmicos e de gesso, e revestimentos em argamassa e gesso. Nesta etapa, foram avaliados vários aspectos, tais como: a composição gravimétrica do bioRCC, as dimensões das peças, o material constituinte (resina, colas, selantes, plastificantes), a presença de elementos metálicos (pregos, parafusos, grampos, arames) e impurezas (resíduos de tintas, óleos desmoldantes, pó de cimento). Após a segregação e classificação do bioRCC foi realizado o pré-tratamento das amostras para execução dos ensaios laboratoriais.

4.4.1 Coleta, segregação e classificação das amostras

A visita ao canteiro de obras foi realizada durante as etapas de transição entre a conclusão da fase de execução da estrutura e levantamento de alvenaria interna e acabamento. A coleta se deu em mais de um momento; houve uma coleta preliminar e mais duas outras, estas com

finalidade de obtenção de bioRCC necessário à produção dos pellets e à realização da gaseificação em escala piloto.

A coleta preliminar tinha como objetivo, além da identificação do tipo de madeira mais empregada durante a construção de edifícios residenciais, fazer uma avaliação inicial da biomassa existente no canteiro, separando o bioRCC por grupos, informação necessária ao planejamento e à quantificação do volume de bioRCC que deveria ser coletado para os ensaios de caracterização, peletização e gaseificação.

Na segunda coleta, foram coletadas amostras representativas para realização dos ensaios de caracterização físico-química e energética e dos ensaios de gaseificação em escala laboratorial. Finalmente, na terceira e última coleta, foram coletadas peças de bioRCC necessárias à realização dos ensaios de gaseificação em escala piloto.

A empresa implanta a gestão diferenciada dos resíduos em seus canteiros de obra, realizando a segregação dos materiais/insumos inservíveis, por meios de baias, separando plásticos, papel/papelão, metais e madeiras. As peças de madeiras maiores eram acondicionadas separadamente para possíveis reutilizações na própria obra ou em outra. A serragem (pó de serra) produzida no centro de carpintaria era acondicionada em sacos de nylon ou de plástico, sendo armazenadas junto com os resíduos menores de madeira em baias cobertas.

Observou-se que as peças de madeira usadas na obra podem ser separadas em 4 (quatro) grandes grupos (Figura 20), considerando o tipo de madeira constituinte, processo de fabricação do insumo e o seu emprego, sendo nomeadas da seguinte forma:

- (a) *RCC Misto*: são tábuas e sarrafos (1" x 3", 1" x 6", 1" x 9" e 1" x 12") e barrotes (3" x 3", 3" x 4" e 3" x 6"), utilizadas na confecção de fôrmas, escoramentos, instalações provisórias, proteções de periferia, entre outros. São madeiras serradas de espécies florestais nativas basicamente de regiões tropicais, que em sua maioria identificadas como da espécie "Louro-Rosa".
- (b) *RCC Pinus*: são tábuas (1" x 6", 1" x 9" e 1" x 12") e barrotes (3" x 3"), utilizadas em escoramento e cimbramento de lajes e vigas. Madeira serrada do gênero pinus, utilizada na construção civil como uma importante alternativa às madeiras tropicais,

por ser proveniente de florestas cultivadas. O pinus por ser uma madeira leve, possibilita um fácil manuseio e alta trabalhabilidade.

- (c) *RCC Plastificado*: são chapas de compensado multilaminado, colado com resina fenólica WBP (100% a prova d'água) revestido com filme fenólico, com dimensões de 1,22m x 2,44m com 12 e 18mm de espessura. O processo de produção utiliza madeira das espécies pinus e eucalipto. As peças de compensado plastificado são utilizadas na confecção de fôrmas de vigas e pilares, podendo ser reutilizado até 20 vezes.
- (d) *RCC Resinado*: são chapas de compensado multilaminado, colado com resina fenólica WBP (100% a prova d'água) revestido com resina fenólica, com dimensões de 1,22m x 2,44m e 18mm de espessura. O processo de produção utiliza madeira das espécies pinus e eucalipto. As peças de compensado plastificado são utilizadas na confecção de fôrmas de vigas e pilares, podendo ser reutilizado até 10 vezes.

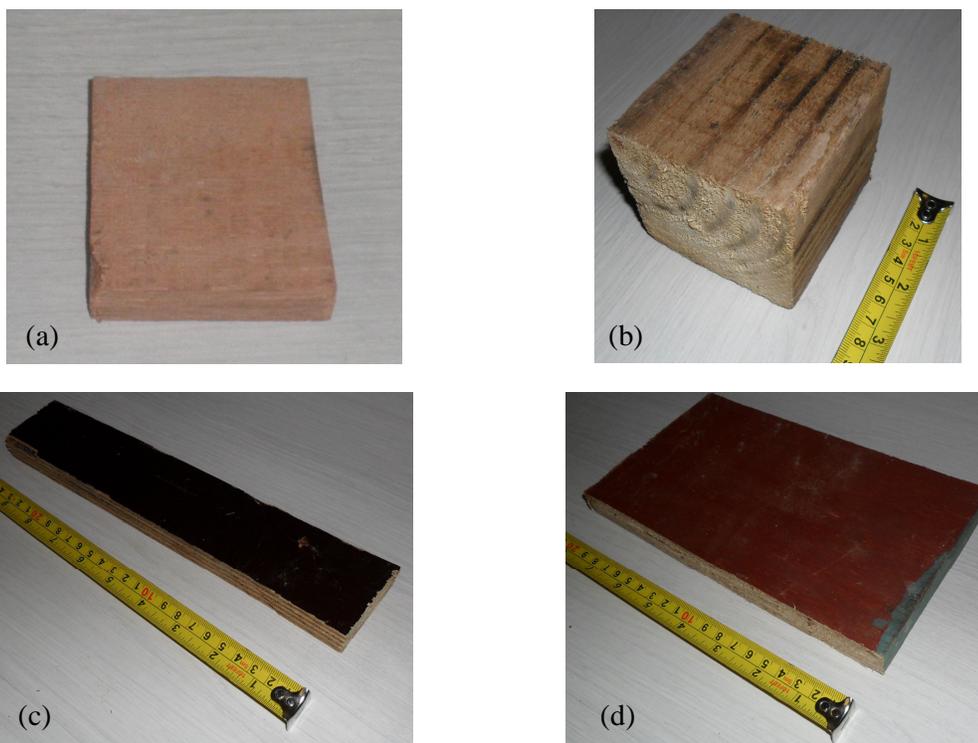


Figura 20 – (a) RCC Misto - madeira serrada mista (b) RCC Pinus - madeira serrada pinus (c) RCC Plastificado - compensado plastificado (d) RCC Resinado - compensado resinado.

(Fotos do autor)

4.4.2 Pulverização e densificação das amostras

Nos canteiros de obras, constata-se que o bioRCC encontram-se em condições impróprias para utilização direta como combustível sólido, em função da desuniformidade dimensional das peças e eventual presença de elementos metálicos (pregos, parafusos), como descrito na literatura. Outra condição desfavorável está na forma de armazenamento à céu aberto, sujeito as intempéries, resultando no aumento da umidade da madeira.

Após a coleta, as amostras representativas de cada tipo de biomassa passaram por um tratamento prévio que consistiram da redução dimensional, pulverização, homogeneização, densificação e formação de pellets. Na preparação das amostras de resíduos de biomassa, para os ensaios laboratoriais de caracterização energética e físico-química, foi necessário promover a secagem ao ar, seguido de uma moagem de pequenos volumes de material com diâmetro máximo de 1,5 mm para fins analíticos. O equipamento utilizado para pulverização foi um micromoinho de rotor vertical com facas MARCONI, modelo MA-048, Figura 21, que através da ação de facas cortantes provoca aumento na superfície de contato forçando as partículas menores a passarem através de peneira Mesh 20 (0,841 mm)² crivo circular, Figura 22.a.



Figura 21 – Micromoinho de facas, MARCONI, modelo MA-048.

(Foto do autor)

²Mesh representa o padrão americano para classificação de peneiras da ASTM utilizado em materiais granulados. A abertura da peneira é dada em milímetro (*mm*).

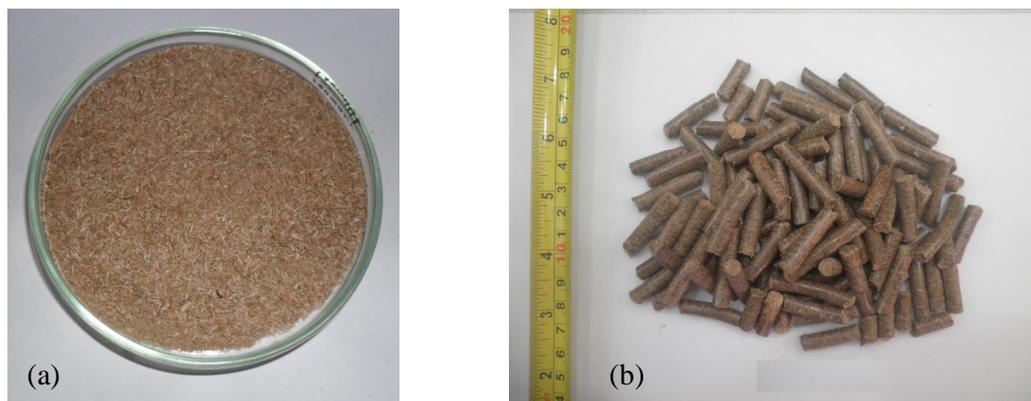


Figura 22 – Amostra de madeira (a) pulverizada (b) peletizada.
(Fotos do autor)

Para realização do ensaio do poder calorífico (PCS e PCI) e para gaseificação do bioRCC fez-se necessário, após a pulverização ou trituração, proceder a peletização (densificação) do material a fim de aumentar sua densidade energética, Figura 22.b. Para o ensaio do poder calorífico (PCS e PCI), os pellets foram produzidos em uma prensa manual, Figura 23.a, já para a gaseificação utilizou-se um peletizador de pequeno porte de capacidade de processamento de 100 kg de biomassa por hora, fabricado pela Xuzhou Orient Industry Co. Ltda, Figura 23.b para produção de pellets, por necessitar de uma maior quantidade de combustível. A pressão dos rolos compressores sobre a matriz de disco foi controlada por parafusos, ajustados com o auxílio de um Torquímetro de Estalo Reversível SATA. O monitoramento da temperatura de operação do peletizador foi realizada através de um termopar tipo K.

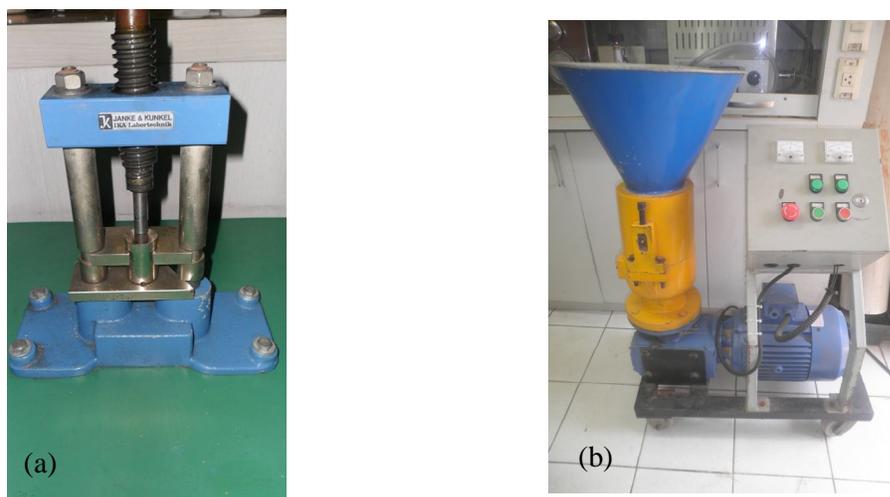


Figura 23 – (a) Prensa manual (b) Mini-peletizador.
(Fotos do autor)

4.5 Caracterização físico-química e energética da biomassa

Na segunda etapa foram realizados ensaios para caracterização físico-química e energética do bioRCC, a partir de ensaios realizados no laboratório de combustíveis e energia (POLICOM) da Universidade de Pernambuco.

Nestes ensaios foram determinados: a densidade aparente (ABNT NBR 7190, 1997), o teor de umidade (método da estufa) (ABNT NBR 7190, 1997), o teor de cinzas (método da mufla) (ABNT NBR 8289, 1983), a análise da composição química elementar (ASTM D3176-74, 1983), a análise termogravimétrica (TGA e DTA) (ASTM D 3172-73 a D 3175-73, 1983), o poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) (ASTM D 2015-77, 1983) e Análise bromatológica (Van Söest e Robertson, 1985) das amostras.

Estes ensaios laboratoriais foram repetidos, no mínimo, 5 vezes, para cálculo da média amostral e intervalo de confiança. A média amostral \bar{x} foi obtida dividindo-se a soma das observações pelo número delas. O erro associado foi calculado com o índice de confiança de 95% a partir dos dados de probabilidade da distribuição de Student com γ graus de liberdade, sendo γ o número de ensaios diminuído de uma unidade. Denominou-se Intervalo de Confiança (IC) o intervalo de valores utilizado para estimar a média da população, de maneira que se possa afirmar que o verdadeiro valor da média está contido dentro deste intervalo (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2010). O IC fornece o intervalo dentro do qual a média populacional estará contida em 95% das vezes, ao retirarem-se infinitas amostras.

A seguir são descritas em linhas gerais a metodologia dos ensaios laboratoriais previstos nesta etapa da pesquisa.

4.5.1 Densidade aparente

A densidade aparente é a relação entre a massa da biomassa pelo volume aparente ou externo da biomassa. Das amostras coletadas no canteiro de obra foram obtidos corpos de prova com formas regulares de cada grupo de bioRCC. Essas amostras foram secas na temperatura ambiente, com aproximadamente 12% de umidade. Nas amostras foram medidas suas

dimensões com paquímetro universal com sensibilidade de 0,01 mm e a massa do corpo de prova foi obtida em balança semi-analítica com sensibilidade de 0,01 g.

4.5.2 Teor de umidade (método da estufa)

O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca. Para tanto, determina-se a massa inicial da amostra com sensibilidade de 0,01 g. Após a determinação da massa inicial, coloca-se a amostra na câmara de secagem (estufa), Figura 24, com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Durante a secagem, a amostra é retirada da estufa, resfriada em um dessecador, e a massa da amostra é obtida em balança semi-analítica com sensibilidade de 0,01 g. A massa da amostra deve ser medida a cada 2 horas, até que ocorra uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Esta massa será considerada como a massa seca. Conhecida a massa seca da amostra, determina-se a umidade à base seca pela diferença em massa entre a seca e a inicial da amostra.



Figura 24 – Forno da estufa, QUIMIS.

(Foto do autor)

4.5.3 Teor de cinzas (método da mufla)

Denomina-se cinzas, o resíduo sólido inorgânico resultante da combustão completa de um combustível. Neste resíduos estão presentes a sílica, o alumínio, o ferro e o cálcio; e podem também estar presentes pequenas quantidades de magnésio, titânio, sódio e potássio.

Para determinação do teor de cinzas, a amostra de biomassa é seca em condições padronizadas em um forno de mufla, Figura 25, utiliza-se o cadinho de porcelana sem a tampa. Eleva-se lentamente a temperatura do forno até atingir entre 580°C a 600°C para evitar a formação de chamas. Quando todo o carbono é consumido (em torno de 1 hora a 2 horas), resfria-se em um dessecador e pesa-se a amostra.



Figura 25 – Forno de mufla, QUIMIS.

(Foto do autor)

4.5.4 Análise elementar CHNOS

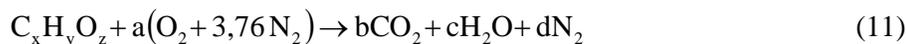
A análise elementar CHNOS consiste na determinação do percentual em massa de carbono bem como enxofre, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio. A determinação instrumental de carbono inclui o carbono orgânico e o carbono inorgânico, geralmente presente na forma de carbonatos. A determinação de hidrogênio também engloba o contido nos materiais orgânicos e o associado à água. O sistema também determina nitrogênio, na forma de N₂. Para realizar a análise da composição química elementar, utilizou-se um analisador elementar CHNOS modelo Vario El Cube, Figura 26.



Figura 26 – Analisador elementar CHNOS, ELEMENTAR, modelo Vario EL cube.

(Foto do autor)

A partir da composição química elementar, foi possível obter a fórmula molecular simplificada (desprezando-se os teores de enxofre e nitrogênio) das biomassas estudadas e, conseqüentemente, a quantidade teórica de ar, isto é, a quantidade mínima de ar que fornece oxigênio suficiente para a combustão completa de todo C e H presentes no combustível (MORAN e SHAPIRO, 2009). A quantidade de ar teórico para a combustão completa das biomassas foi calculada de acordo com a Equação 11.



Sendo $C_xH_yO_z$ a fórmula molecular simplificada do combustível; “a”, “b”, “c” e “d” os números de mol do oxigênio, do dióxido de carbono, da água e do nitrogênio, respectivamente.

A reação dada pela Equação 11 permite também o cálculo da razão ar-combustível para a combustão completa com a quantidade teórica de ar, $\overline{AC}_{teórico}$ (Equação 12).

$$\overline{AC}_{teórico} = \frac{\text{kmol de ar teórico}}{\text{kmol de combustível}} \quad (12)$$

Conhecendo-se o volume do gaseificador, determinou-se a razão ar-combustível real, \overline{AC}_{real} (Equação 13) do processo de gaseificação e a razão de equivalência, RE (Equação 14).

$$\overline{AC}_{\text{real}} = \frac{\text{kmol de ar real}}{\text{kmol de combustível}} \quad (13)$$

$$RE = \frac{\overline{AC}_{\text{real}}}{AC_{\text{teórico}}} \quad (14)$$

4.5.5 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica determina alterações da massa de amostras em função da temperatura, usando uma microbalança, Figura 27, identificando as etapas que ocorrem durante a carbonização.



Figura 27 – Balança termogravimétrica, SHIMADZU, modelo DTG-60.

(Foto do autor)

Na análise termogravimétrica, a massa das amostras é registrada em função do tempo ou temperatura. Um programa pré-estabelecido de tempo-temperatura aquece a amostra, denominado rampa de aquecimento. A taxa de aquecimento utilizada nas amostras foi de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. A amostra é aquecida numa atmosfera inerte de Nitrogênio. As reais temperaturas e as massas da TG são mostradas como uma função do tempo. A perda de água abaixo de 125°C e a perda de voláteis na faixa de 200°C a 400°C é claramente visto no gráfico TGA, Figura 28. A 900°C o oxigênio é admitido no sistema e o carbono residual é queimado, deixando cinzas. A curva de análise diferencial térmico (DTA) mostra o calor requerido para

volatilização da amostra, conforme Figura 28. A perda endotérmica de água e de materiais voláteis é representada por picos negativos, enquanto que a combustão do carbono (exotérmica) é um pico positivo (GAUR; REED, 1995).

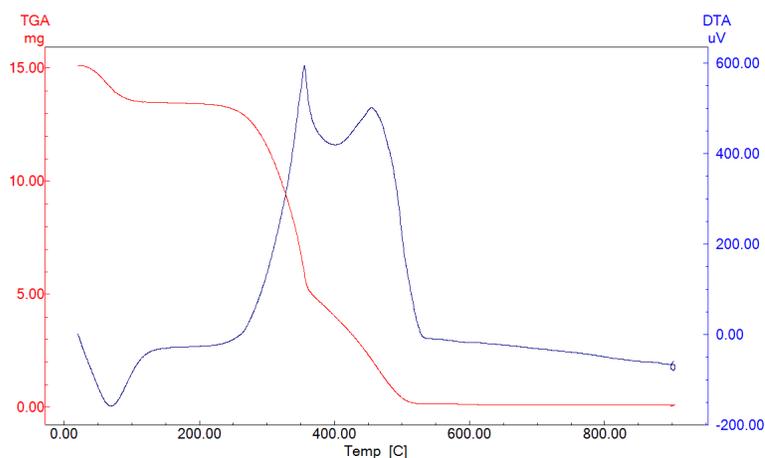


Figura 28 – Termograma de TGA e DTA.

4.5.6 Poder calorífico

Por definição poder calorífico é a quantidade de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível. A unidade mais usada no Brasil para combustíveis sólidos é a kcal.kg^{-1} ou cal.g^{-1} , porém, devem ser adotadas as unidades derivadas do Sistema Internacional (SI), que reportam os valores em termos de MJ.kg^{-1} . Para combustíveis gasosos é MJ.m^{-3} , com a opção de utilização da unidade em kcal.m^{-3} . Sua determinação pode ser teórica pelo conhecimento da composição química do combustível ou experimental com o auxílio da bomba calorimétrica (QUIRINO, 2000).

A bomba calorimétrica é um equipamento frequentemente utilizado para a determinação do poder calorífico de combustíveis sólidos e líquidos. Uma determinada quantidade de biomassa adensada é acondicionada em um cadinho (cápsula de combustão), por sua vez colocado em um suporte dentro do vaso de decomposição, que posteriormente, sofre uma injeção de oxigênio para atingir a pressão requerida pelo equipamento de teste.

Para o Calorímetro IKA C-2000, utilizado na pesquisa, esta pressão é de 30 bar. A bomba é então mergulhada em um recipiente com parede dupla contendo água em seu interior,

Figura 29. Um agitador assegura a uniformidade da temperatura da água ao redor da bomba. A temperatura da água é medida em função do tempo antes, durante e depois do processo de ignição e conhecendo-se a massa de água do sistema, massa e calor específico do recipiente e as curvas de aquecimento e resfriamento da água; a energia liberada durante o processo de combustão pode ser determinada. O calor de combustão, ou poder calorífico superior da amostra é informado diretamente na tela do equipamento.



Figura 29 – Calorímetro digital, IKA-WERKE, modelo C2000 Control, com detalhe do vaso de decomposição.

(Foto do autor)

Após a realização do ensaio, o vaso de decomposição é retirado do equipamento e a pressão liberada para que a tampa possa ser removida. Para obtenção do poder calorífico inferior (PCI) são necessárias titulações, realizadas pela análise da água de combustão presente no vaso de decomposição após o processo, conforme procedimento do fabricante. Para tanto, o vaso de decomposição foi lavado com 50 mL de água destilada e a mistura recolhida em um Erlenmeyer. Foi adicionado indicador alaranjado de metila. A mistura foi, então, titulada com solução de hidróxido de sódio a 0,1 N fatorada até a mudança de coloração; adicionou-se a seguir 20 mL de solução de carbonato de sódio 0,05 N. Por fim, a mistura foi novamente titulada, desta vez com solução de ácido clorídrico 0,1 N fatorada. As quantidades utilizadas de NaOH e HCl foram anotadas e multiplicadas pelos respectivos fatores. Esses dados foram inseridos no *software* do calorímetro, que calculou o PCI automaticamente (GERALDO, 2013).

4.5.7 Análise bromatológica (Método Van Söest)

A madeira tem como constituintes a celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e minerais. A partir do digestor de fibra, Figura 30, pode-se analisar as frações constituintes de produtos ou subprodutos de origem vegetal, por meio de reagentes específicos, denominados detergentes. A finalidade deste ensaio é solubilizar as frações, por meio de soluções ácidas e básicas, e separar o conteúdo celular constituído de proteínas, gorduras, carboidratos solúveis em água, e a parede celular que é constituída basicamente de celulose, hemicelulose, lignina e proteína lignificada (GOES, 2010).



Figura 30 – Digestor para fibra em beckers, MARCONI, modelo MA-450/6.

(Foto do autor)

O método proposto por Van Söest e Robertson (1985) fornece informações sobre importantes componentes –celulose, hemicelulose, lignina, cinza, sílica, dentre outros. Conforme pode ser visto na Figura 31, esta análise inclui três etapas: fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e lignina klason (FDA-Lignina).

O método FDN consiste na digestão em refluxo de uma amostra (1g, moída em malha de 1mm) dentro de uma solução detergente neutro, por 1 hora. O pH da solução FDN deve permanecer entre 6,9 e 7,1. O método FDN é capaz de remover todos os constituintes celulares na amostra seca, deixando apenas os constituintes das paredes das células, ou seja, celulose, hemicelulose, lignina e cinzas insolúveis. Após a digestão, a solução fervida é

filtrada sob vácuo em cadinho com placa porosa, previamente pesado, e as fibras coletadas. O conteúdo celular é calculado pela relação da fibra digerida e a massa inicial da amostra.

O método FDA é semelhante ao da análise FDN, no entanto, a solução utilizada na metodologia de análise é composta de ácido sulfúrico (H_2SO_4). A análise FDA remove a lignocelulose e a sílica (cinza insolúvel) da matéria-prima. Conhecendo-se a porcentagem dos constituintes da parede celular da FDN e da FDA do material analisado, é possível calcular a fração de hemicelulose, apenas pela diferença entre aquelas frações.

A fibra resultante da análise FDA é o passo inicial para determinar o conteúdo da lignina Klason. A metodologia se baseia no fato de que a celulose é dissolvida por ácido sulfúrico a 72%, deixando como resíduos apenas lignina e cinzas insolúveis. Inicialmente, macera-se uma mistura fibras/ácido sulfúrico durante 1 hora, em temperatura ambiente ($25^{\circ}C$). Em seguida, o material é transferido para um béquer e fervido em refluxo por 4 horas. O teor de lignina de Klason é determinado dividindo-se a massa de lignina obtida pela massa inicial de fibras.

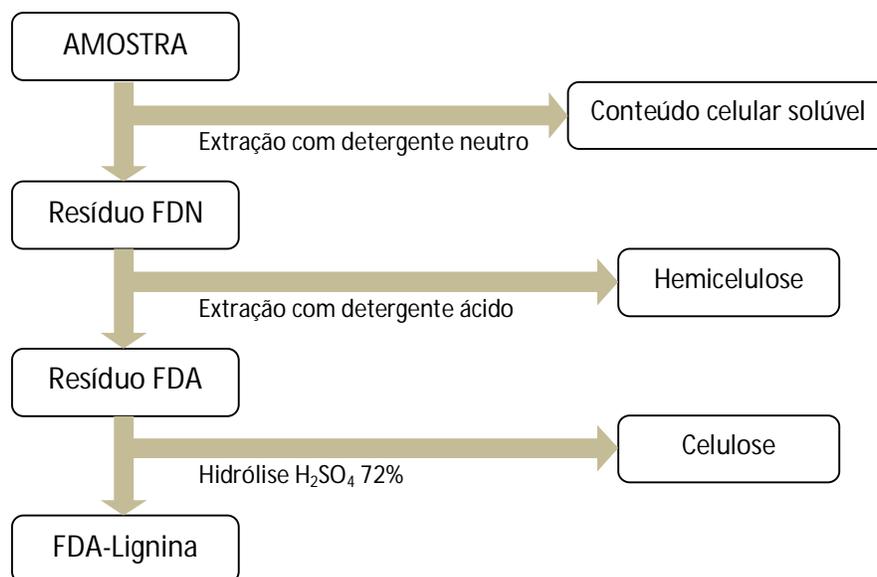


Figura 31 – Análise Van Söest e frações da biomassa seca.

(Adaptado de PERES, 1997)

Os materiais acidentais (extrativos) são responsáveis muitas vezes por certas propriedades da madeira como: cheiro, gosto, cor e durabilidade natural. Embora estes componentes

contribuam somente com uma pequena porcentagem da massa da madeira (3 a 10%), podem apresentar uma grande influência no poder calorífico especialmente quando a madeira possui elevados teores de resina.

4.6 Gaseificação da biomassa

Nesta terceira etapa, utilizou-se 02 (dois) tipos de gaseificadores, um em escala laboratorial (gaseificador de bancada), Figura 32, e um em escala piloto (gaseificador de leito fixo *downdraft* TERMOQUIP), Figura 33.a, sendo este segundo podendo ser acoplado a um grupo gerador para produção de energia elétrica. Os dois equipamentos estão instalados e em operação no laboratório POLICOM, na Universidade de Pernambuco. Foram realizados ensaios de gaseificação com amostras de bioRCC coletados na obra de referência.



Figura 32 – Mini-gaseificador laboratorial.

(Foto do autor)

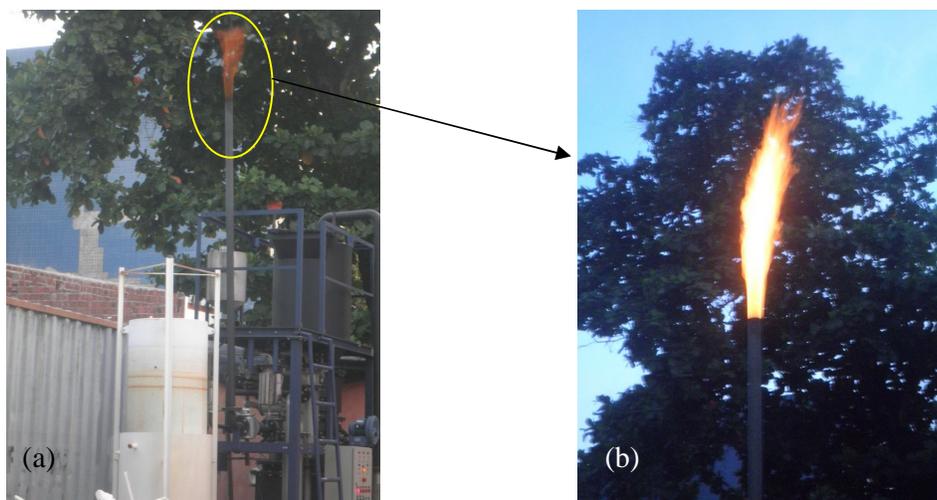


Figura 33 – (a) Chaminé do gaseificador downdraft
(b) Queima do gás resultante da gaseificação.

(Fotos do autor)

4.6.1 Descrição dos dispositivos experimentais

Para os testes de gaseificação, o gaseificador de bancada serve para investigar as vantagens comparativas da utilização de diversas matérias-primas e as variáveis de processo, tais como: tempo de residência, temperatura de operação, quantidade de matéria gaseificada e grau de adensamento. O equipamento promove uma rápida gaseificação, com a coleta do gás combustível e dos resíduos produzidos, e ao final, permite o cálculo do volume de gás gerado de modo simplificado. O gaseificador laboratorial é um equipamento que opera em regime de batelada, interessante para testes de novos processos que ainda não foram completamente desenvolvidos. Os produtos intermediários formados durante a gaseificação não necessitam ser conhecidos. Necessita-se conhecer apenas as concentrações de entrada e saída do reagente e as condições termodinâmicas iniciais e finais (GERALDO, 2013).

O gaseificador laboratorial é composto por uma fornalha, em aço Schedule 80 sem costura, disposta horizontalmente, conectada a tubulações secundárias e válvulas. Existem 03 (três) ramificações no forno, separadas entre si de 15cm, em cada uma delas existe um termopar tipo K para monitoramento da temperatura. O centro da tubulação principal pode atingir temperaturas superiores a 900°C. O forno é aquecido indiretamente por duas resistências elétricas (1000 watts) com isolamento térmico cerâmico. Em uma extremidade existe uma válvula de esfera onde são injetadas as amostras e retirados os resíduos da gaseificação. Do

lado oposto está conectado o transmissor de pressão. O gás combustível produzido deixa o equipamento através de uma válvula solenóide, que vai para um sistema de filtragem e acondicionado em sacos amostradores (bag).

O sistema de monitoramento contínuo, desenvolvido pelos pesquisadores do POLICOM, consiste na leitura da temperatura na fornalha e pressão interna do gaseificador realizada por dois *dataloggers* (NOVUS Produtos Eletrônicos) conectados a um computador através de cabos USB, utilizando o software myPCLab 1.22 para aquisição dos dados. Para o controle da temperatura na fornalha utiliza-se um compensador PID modelo N1040, fabricado pela NOVUS Produtos Eletrônicos, atuando com dois relés de 220 V.

Após os ensaios no gaseificador de bancada, o bioRCC foi utilizado no gaseificador de leito fixo downdraft ventilado, apresentado na Figura 34.



Figura 34 – Gaseificador downdraft ventilado.

(Foto do autor)

Loureiro et. al. (2012) detalha, através do diagrama esquemático mostrado na Figura 35, os componentes e o funcionamento do equipamento da seguinte forma: a câmara principal do

reator, localizada abaixo do silo de carga, é constituída de um cilindro de 0,3 m de diâmetro interno, 0,5 m de diâmetro externo e 0,9 m de comprimento. O material isolante térmico (tijolo refratário) preenche o espaço entre a parede externa e o diâmetro interno do reator. O ar atmosférico, impulsionado por um soprador, entra no reator no segundo estágio mostrado na Figura 35. Antes de chegar ao reator, o ar é pré-aquecido no trocador de calor TC1, que aproveita a energia térmica do gás produto. A vazão do ar que alimenta a zona de combustão incompleta no segundo estágio é controlada por meio de uma válvula de gaveta colocada antes de um medidor de vazão do tipo placa de orifício, situado imediatamente antes da entrada do ar no reator.

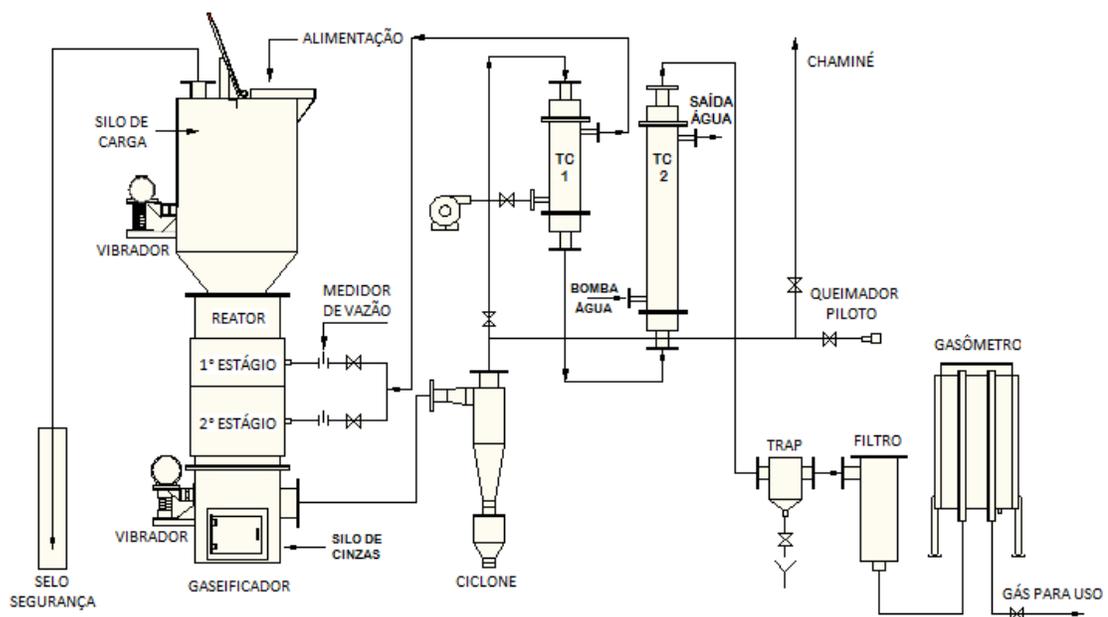


Figura 35 – Diagrama esquemático do gaseificador *downdraft* atmosférico.

(LOUREIRO *et. al.*, 2012)

O controle dessa vazão de ar desempenha papel importante na operação do gaseificador, pois influencia na qualidade do gás produzido e no consumo de matéria-prima. Na região imediatamente acima da zona de combustão incompleta situa-se a região de pirólise onde, por efeito apenas do aumento de temperatura a biomassa libera seus componentes voláteis. Acima dessa região, o aumento de temperatura proporciona a secagem da matéria-prima (LOUREIRO *et. al.*, 2012).

O gás combustível deixa a câmara principal em direção ao sistema de limpeza e filtragem por uma abertura na parede do silo de cinzas localizada abaixo da grelha que suporta o combustível sólido. Dessa forma, o gás, assim como a biomassa percorrem no reator um caminho descendente (*downdraft*) percorrendo diferentes zonas, que são: região de secagem; pirólise; região de combustão parcial e zona de redução antes da saída para o sistema de limpeza. Um termopar tipo K foi instalado no tubo de coleta do gás imediatamente após a saída do silo de cinzas e outro foi posicionado entre o trocador de calor TC2 e o filtro TRAP, Figura 35. Esses dois termopares, já instalados pelo fornecedor do gaseificador (TERMOQUIP) têm seus indicadores de temperatura no mostrador do quadro elétrico do equipamento (LOUREIRO *et. al.*, 2012).

Na parte superior do gaseificador há o silo de carga que é preenchido com o combustível sólido, Figura 35. Nota-se que o gaseificador utilizado funciona por batelada. Um sistema de coleta das cinzas está localizado na parte inferior do gaseificador. Tanto o silo de carga quanto o silo de cinzas possuem vibradores para facilitar a movimentação do combustível (LOUREIRO *et. al.*, 2012).

Ao deixar o reator em direção ao sistema de filtragem, o gás combustível passa primeiramente por um ciclone (que remove parte do particulado) e atravessa o trocador de calor TC1 onde pré-aquece o ar atmosférico e, na sequência, atravessa o trocador de calor TC2, que utiliza água corrente para resfriar o gás produto. Continuando sua trajetória no processo de limpeza, o gás passa pelo filtro TRAP, para retenção de particulado e umidade e, em seguida, pelo filtro de ar (semelhante aos utilizados em grandes motores automotivos). Após todo este trajeto, o gás é armazenado no gasômetro, cuja função é fornecer gás para uso à pressão constante (LOUREIRO *et. al.*, 2012).

Alternativamente o gás produto pode ser desviado, logo após a passagem no ciclone, para o queimador piloto ou para a chaminé por meio do manuseio de válvulas de esfera. Estas opções são oferecidas para proporcionar a avaliação da inflamabilidade do gás produzido no início da operação, bem como, para diminuir as emissões de poluentes durante o processo de conversão, queimando o gás produzido em excesso (LOUREIRO *et. al.*, 2012).

4.6.2 Análise qualitativa do gás combustível gerado

A análise qualitativa do gás consiste na determinação dos constituintes do gás combustível e o cálculo do seu poder calorífico. Para análise qualitativa do gás combustível gerado foram determinados o percentual mássico de cada constituinte dos gases encontrados na gaseificação da biomassa (hidrogênio, monóxido de carbono, oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono e metano). Dessa forma, sabendo-se o número de mols de cada gás individualmente, foi possível calcular o PCS e o PCI do gás combustível produzido, considerando os poderes caloríficos inferiores do metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) e do hidrogênio (H_2), respectivamente, como $32,08 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, $11,32 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ e $9,68 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ (PERES,1997). Cada experimento foi realizado em triplicata para cálculo da média aritmética.

A metodologia empregada para análise do gás combustível foi a cromatografia, que é um método físico de separação, no qual os componentes a serem separados são distribuídos entre duas fases: a fase estacionária e a fase móvel. A amostra é transportada por uma corrente de gás através de um tubo, chamado de coluna, com paredes revestidas com diferentes fases estacionárias. As substâncias que têm a maior interação com a fase estacionária são retidas por maior tempo e, conseqüentemente, diferenciadas daquelas com menor interação. Cada substância elui em um tempo diferente (tempo de retenção). Os componentes que saem da coluna podem ser quantificados por um detector, identificado eletronicamente, e registrado num gráfico com picos de leituras, semelhantes ao exemplo mostrado na Figura 36 (LINDE, 2008).

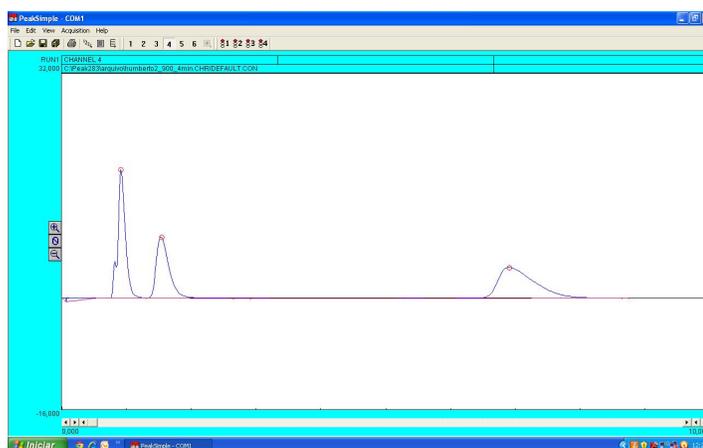


Figura 36 – Gráfico com os picos cromatográficos.
(Software PeakSimple)

O equipamento utilizado na análise cromatográfica foi o cromatógrafo a gás, modelo SRI-8610C, equipado com um detector de condutividade elétrica (TCD), Figura 37, que é utilizado para a análise quantitativa e qualitativa de misturas gasosas. O hidrogênio foi utilizado como gás de arraste para análise dos componentes gasosos, exceto para análise do próprio hidrogênio que foi utilizado o argônio como gás de arraste.



Figura 37 – Cromatógrafo de gás, SRI Instruments, modelo 8610C.
(Foto do autor)

4.6.3 Análise quantitativa do gás combustível gerado

Nos ensaios de gaseificação em escala laboratorial, foi calculada a quantidade de gás gerado com a biomassa injetada no gaseificador. A importância da análise quantitativa está na possibilidade de cálculo da quantidade de energia global do processo de gaseificação, através dos resultados do poder calorífico inferior e volume de gás gerado por unidade de massa do insumo. Com os valores da energia total é possível realizar uma análise comparativa entre a energia dos diferentes gases produzidos por diversas biomassas, visto que, obtendo apenas o poder calorífico, não permite uma análise mais detalhada do seu potencial energético.

O volume de gás gerado pode ser calculado usando o aumento da pressão como forma de medida, pois conhecendo o volume do gaseificador, a temperatura interna e a pressão final, foi possível determinar o volume aproximado de gás produzido pela amostra assumindo que tanto o ar quanto o gás comportam-se como gases ideais, e seguem a Lei do Gás Ideal.

A técnica utilizada para cálculo do número de mols de ar em função da temperatura está descrita em Peres (1997), e sendo repetida por Geraldo (2013) para o gaseificador estudado, encontrando os valores apresentados na Tabela 9. O número de mol de ar dentro do gaseificador foi calculado pela lei do gás ideal, conhecendo-se a distribuição de temperatura ao longo da fornalha, conforme Figura 38 e o volume interno do equipamento (900 ml). Como observado por Peres (1997) e Geraldo (2013), o número de mol de ar dentro do gaseificador em escala laboratorial não varia significativamente entre 700°C e 900°C, uma vez que uma porção limitada do equipamento é aquecida e permanece isolada pela manta cerâmica. As demais partes do gaseificador permaneceram em contato com o ar atmosférico, o que intensifica a troca de calor.

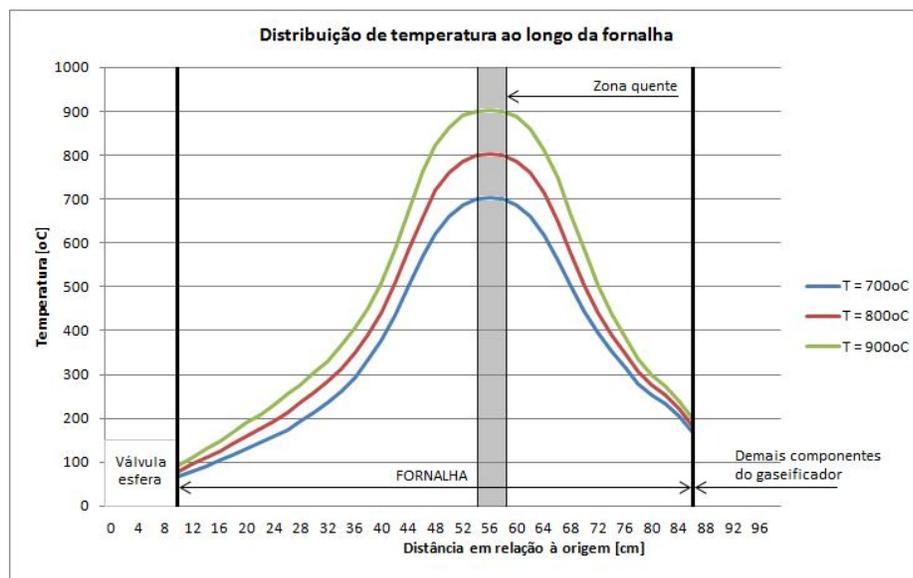


Figura 38 – Distribuição de temperatura ao longo da fornalha.

(GERALDO,2013)

Tabela 9 – Número de mol de ar dentro do gaseificador em função da temperatura na zona quente

Temperatura na zona quente (°C)	Número de mol de ar
700	0,019849
800	0,018696
900	0,017553

Fonte: Geraldo (2013).

Estes resultados deixam claro que o número de mol de ar no interior do reator é inversamente proporcional à temperatura da zona quente.

4.6.4 Planejamento de gaseificação

Foram feitos os primeiros testes com o gaseificador de bancada em escala laboratorial utilizando amostras de pellets, produzidos com RCC, com o objetivo de quantificar os gases presentes após a conversão térmica, como também estudar os efeitos da variação da temperatura interna do reator, da massa inicial de matéria-prima gaseificada, do grau de adensamento e do tempo de residência do insumo no interior do reator. Foram gaseificados 5g de amostras de pellets de RCC, em uma sequência de temperatura de 700°C, 800°C e 900°C, e em cada temperatura, o tempo de residência de 0,5 min, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min e 5 min, com a finalidade de observar a qualidade do gás em função da temperatura e tempo.

Com a definição destes parâmetros iniciais (temperatura, massa inicial, grau de adensamento e tempo de residência), os ensaios de gaseificação para cada tipo de bioRCC estudado foram realizados nas seguintes condições: temperaturas de 700, 800 e 900°C, massa inicial injetada de 5g, grau de adensamento igual a zero (amostra pulverizada) e tempo de residência de 3 (três) minutos. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

Para gaseificação em escala piloto (gaseificador de leito fixo *downdraft* TERMOQUIP), a amostra utilizada possuía a mesma proporção em massa dos tipos de madeira adquirida pela obra de referência. A coleta do gás produzido realizada em intervalos de tempo programada, através de uma válvula de coleta situada no gasômetro, passando por um sistema semelhante ao utilizado no gaseificador de bancada, composto de um filtro e saco amostrador (bag). O gás coletado do gaseificador foi analisado no cromatógrafo a gás, modelo SRI 8610C, para determinação da composição do “*syngas*”.

Na Tabela 10 apresenta-se um resumo dos ensaios de caracterização físico-química e energético previstos para realização nos bioRCC's coletados no canteiro de obra.

Tabela 10 – Ensaios de caracterização físico-química e energética do bioRCC

Equipamento	Foto	Finalidade	Índices
Calorímetro digital		Obter a quantidade de energia liberadas na forma de calor durante a combustão completa de uma unidade de massa do combustível.	Poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).
Balança termogravimétrica		Medição contínua do peso de uma amostra submetida a um processo de aquecimento.	Teor de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas.
Analizador elementar		Obter o percentual em massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e Cloro (Cl).	Teor de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre e Cloro.
Digestor de fibras		Determinação de fibra bruta (FB), fibra detergente ácido (FDA) e fibra detergente neutro (FDN) pelo método de Van Söest.	Teor de celulose, hemicelulose e lignina.
Gaseificador		Conversão termoquímica da biomassa ou qualquer combustível sólido em um gás combustível (CO e H ₂), e observação da concentração de Alcatrão e Particulados.	Consumo de biomassa no processo (kg por hora), e coleta de amostras do gás gerado para análise físico-química.
Cromatógrafo de gás		Identifica e quantifica os gases de combustão provenientes da gaseificação dos resíduos de madeira.	Teor de oxigênio (O ₂), monóxido de carbono(CO), dióxido de carbono(CO ₂), metano(CH ₄), entre outros.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados e as correspondentes análises dos ensaios descritos no Capítulo 4 são apresentados a seguir.

5.1 Estimativa de geração de resíduos de madeira no canteiro de obra

Na análise da documentação existente no escritório da obra, foi possível levantar a quantidade de madeira utilizada e sua geração de resíduos durante a execução da obra. Na Tabela 11 apresenta a quantidade de madeira adquirida por tipo pela obra estudada.

Tabela 11 – Quantidade adquirida por tipo de madeira

Tipo de Madeira	Densidade * aparente (kg.m⁻³)	Massa (t)	Composição percentual
Madeira Mista	866	110	67
Pinus	447	18	11
Compensado Plastificado	579	24	14
Compensado Resinado	574	12	8
TOTAL		164	100

* b.w.=base de trabalho

Como pode ser visto na Tabela 11, a madeira mista (RCC Misto) é o grupo de madeira identificado com a maior quantidade adquirida pela obra. Esta composição gravimétrica possibilitou estimar a taxa de utilização de madeira relativa à área total construída (m²) e ao volume total de concreto (m³) empregado na superestrutura, conforme indicado na Tabela 12.

Tabela 12 – Estimativa da taxa de utilização de madeira na obra

Dados da obra	
Área construída	11.416,91 m ²
Volume de concreto	2.652 m ³
Quantidade de madeira adquirida	164 toneladas
Taxa de utilização de madeira (em massa)	
Em área construída	14,4 kg.m ⁻²
Em volume de concreto aplicado	62,0 kg.m ⁻³

A Figura 39 apresenta o resultado da quantidade de resíduos de madeira retirada da obra pela empresa coletora (17,23 toneladas), relacionando com as etapas construtivas da obra, conforme detalhado na Figura 40. Observa-se que a quantidade de resíduos retirados da obra

corresponde a 10,5% da quantidade total de madeira adquirida, esta redução é justificada pelos gestores do empreendimento, pelo fato deles realizarem o reaproveitamento do insumo em outras obras/serviços, ou mesmo pelo recolhimento realizado por catadores para abastecer os fornos de padarias e pizzaria da cidade.

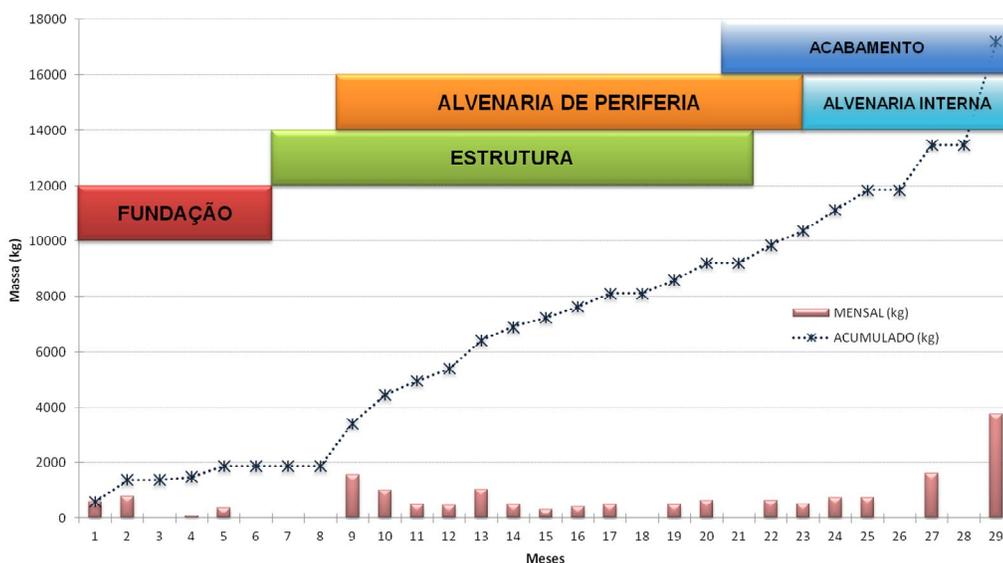


Figura 39 – Controle de transporte de resíduos de madeira.

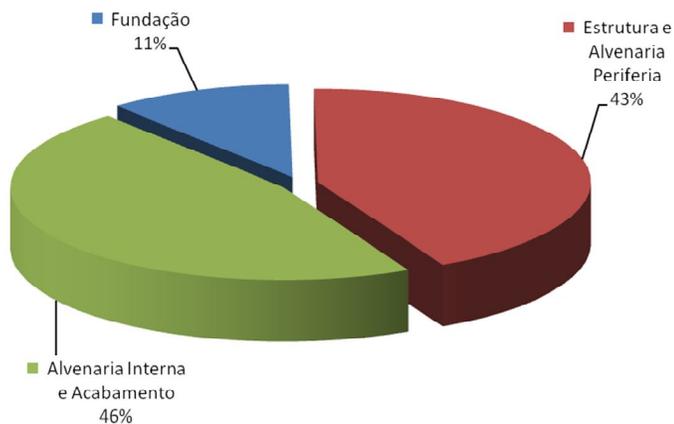


Figura 40 – Geração de Resíduos de Madeira por fase de construção.

Nas visitas ao canteiro de obra, constatou-se que o bioRCC se encontravam em condições impróprias para utilização direta como combustível sólido, em função da desuniformidade dimensional das peças e eventual presença de elementos metálicos (pregos, parafusos), conforme descrito na literatura.

5.2 Caracterização físico-química e energética da biomassa

A Tabela 13 mostra os resultados obtidos pela caracterização físico-química e energética para cada tipo de bioRCC encontrado no canteiro da obra estudada. Para cálculos das médias utilizou-se a ponderação com base na composição dos tipos de madeira adquirida pela obra de referência.

Tabela 13 – Características físico-química e energética do RCC estudado

Parâmetros	RCC Misto	RCC Pinus	RCC Plastificado	RCC Resinado	MÉDIA
Densidade aparente (kg.m ⁻³)*	800 ± 12	414 ± 21	519 ± 17	521 ± 3	696
Teor de umidade (%)*	7,6 ± 0,1	7,4 ± 0,1	10,3 ± 0,1	9,2 ± 0,1	8,1
Teor de cinzas (%) (600°C)*	1,08 ± 0,07	0,94 ± 0,01	2,09 ± 0,10	2,11 ± 0,12	1,29
Análise imediata (%)					
Matéria volátil*	98,59±0,19	98,68±0,04	99,42±0,13	99,4±0,16	98,78
Carbono fixo*	0,53±0,11	0,50±0,03	0,41±0,07	0,34±0,05	0,49
Cinzas (900°C)*	0,88±0,11	0,82±0,06	0,17±0,03	0,26±0,07	0,72
Umidade	11,35±0,32	13,68±0,34	11,88±0,78	12,78±0,22	11,79
Análise elementar (%)*					
Carbono (C)	46,27±0,55	46,29±0,19	48,08±1,03	47,60±0,50	46,63
Hidrogênio (H)	6,59±0,03	6,58±0,03	6,57±0,13	6,56±0,08	6,58
Oxigênio (O)	45,67±0,56	46,32±0,22	43,72±1,17	44,04±0,59	45,34
Nitrogênio (N)	0,16±0,01	0,10±0,01	0,24±0,01	0,21±0,01	0,17
Enxofre (S)	0,21±0,02	0,11±0,01	0,10±0,01	0,11±0,01	0,18
Relação O/C	0,74±0,02	0,75±0,01	0,68±0,03	0,69±0,02	0,73
Relação H/C	1,71±0,03	1,71±0,00	1,64±0,01	1,65±0,00	1,70
Análise Bromatológica (%)*					
Celulose	42,98±0,30	45,37±0,66	40,36±1,28	41,01±1,00	42,72
Hemicelulose	19,11±0,36	24,33±0,35	22,52±1,25	22,85±0,76	20,46
Lignina	30,53±0,21	26,60±0,40	31,50±0,80	30,21±0,89	30,21
Extrativos	6,3±0,22	3,36±0,30	3,53±0,27	3,91±0,37	5,40
Poder calorífico (kJ.kg⁻¹)					
PCS	18.205±97	17.701±153	17.723±101	17.804±84	18.050
PCI	17.988±113	17.509±172	17.487±124	17.560±88	17.831
Densidade Energética (MJ.m⁻³)					
PCS	15.766	7.912	10.262	10.219	13.652
PCI	14.390	7.249	9.076	9.149	12.408

*b.s.=base seca

As primeiras observações dos resultados obtidos pelos diferentes ensaios realizados no bioRCC é relativa às características físicas. No gráfico da Figura 41 observa-se que a densidade aparente do RCC Misto apresenta o maior valor com 800 kg.m^{-3} comparado aos demais, que foi da ordem de 414 e 521 kg.m^{-3} . Entretanto, quando o bioRCC é peletizado, a densidade aparente passa para 1.250 kg.m^{-3} , apresentando desta forma um valor 3 vezes maior que o encontrado no RCC Pinus (414 kg.m^{-3}) e 7 vezes maior que o pó de serra (170 kg.m^{-3}). Comprovando, desta forma, que seria possível aumentar a densidade de energética do bioRCC com a utilização do processo de densificação (peletização ou briquetagem).

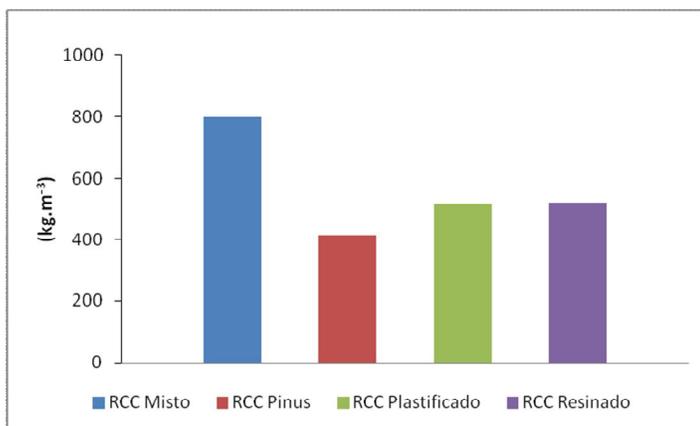


Figura 41 – Gráfico da densidade aparente.

Com relação ao teor de umidade das amostras de bioRCC, apresentada na Figura 42, verifica-se a umidade média dos bioRCC ficaram abaixo de 10%. Desta forma como se encontra a biomassa não necessita de tratamento termo-mecânico para utilização como combustível, e possibilitando uma eventual peletização.

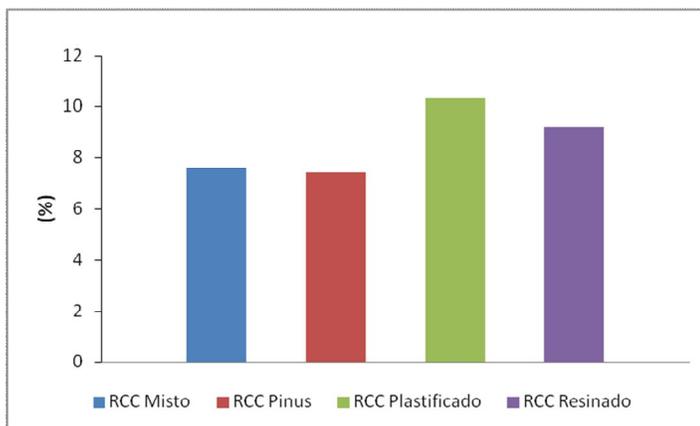


Figura 42 – Gráfico do teor de umidade.

Os resultados do teor de cinzas, Figura 43, indicam um baixo volume de resíduos gerados após o processo termoquímico de conversão, facilitando a operação e manutenção do equipamento utilizado.

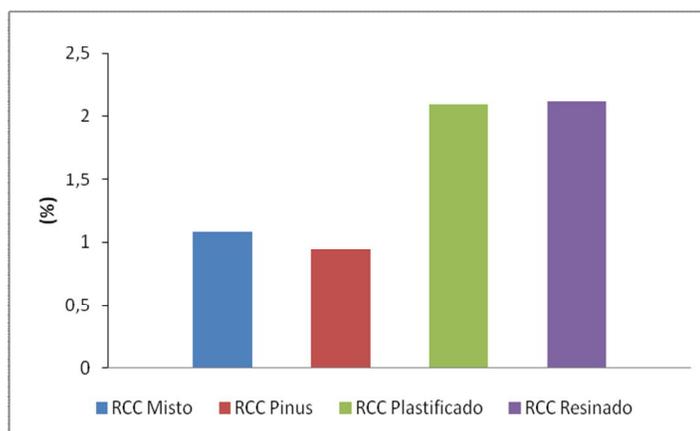


Figura 43 – Gráfico do teor de cinzas.

As curvas termogravimétricas (TGA), ilustrados da Figura 44 a Figura 47, mostram a perda média de massa das amostras de bioRCC de 98,78%, ocorrendo em temperaturas inferiores a 600 °C. Nesta gama de temperaturas, além da liberação de CO₂, ocorrerem fenômenos como a perda da matéria orgânica e umidade remanescente. A temperatura de degradação da biomassa diminui com o aumento do teor de matéria orgânica, e isso pode ser explicado devido à decomposição massiva de biocombustíveis (TÔRRES FILHO, 2005).

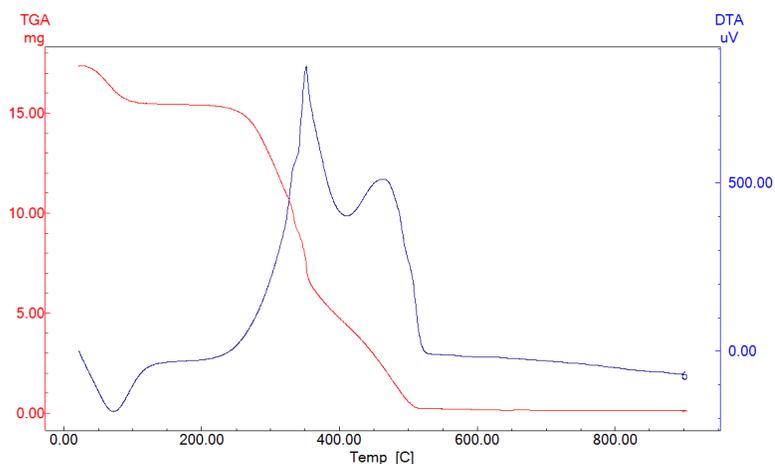


Figura 44 – Termograma do RCC Misto.

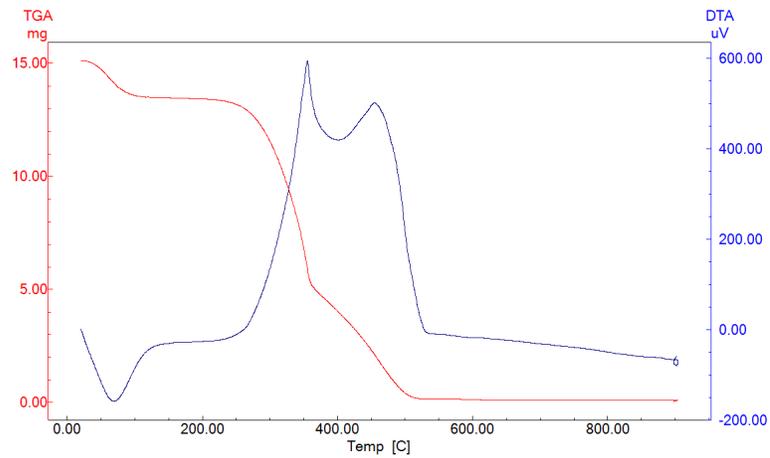


Figura 45 – Termograma do RCC Pinus.

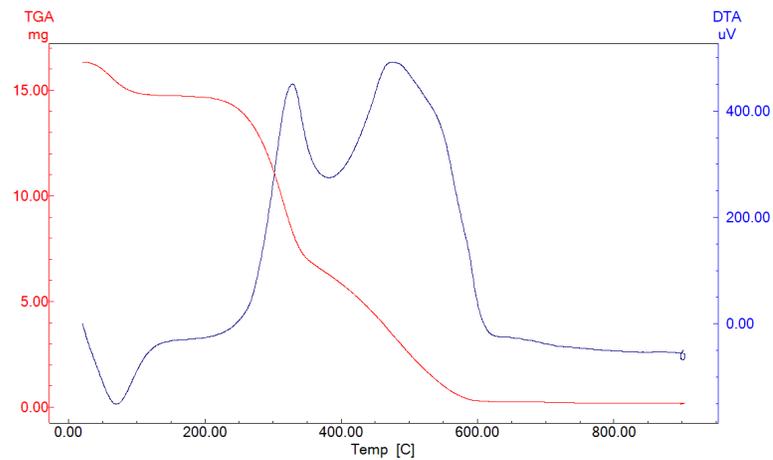


Figura 46 – Termograma do RCC Plastificado.

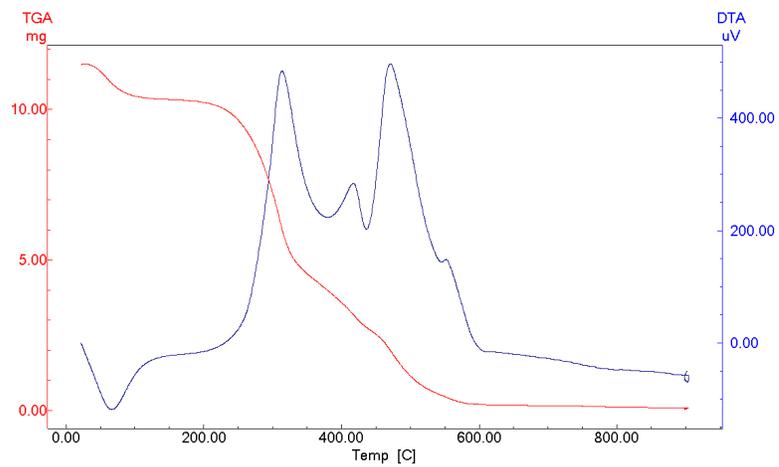


Figura 47 – Termograma do RCC Resinado.

A curva de análise diferencial térmico (DTA) mostra o calor requerido para volatilização da amostra. O pico endotérmico pôde ser encontrado aos 70 °C (água e compostos orgânicos de baixo peso molecular) e dois picos exotérmicos característicos em torno de 350 °C e 460 °C relacionados à combustão da matéria orgânica.

Na análise detalhada das curvas TGA observa-se em seu primeiro trecho a liberação da água livre até 125 °C, e umidade remanescente e compostos orgânicos voláteis em torno de 250 °C, correspondendo ao teor de umidade médio de 11,79%. Em seguida, uma perda de massa até 600 °C, associada à quantidade de matéria orgânica, a qual corresponde a uma perda média de 98,78%. Finalmente, a perda de massa a 600-900 °C se deve à decomposição do carbono fixo, a qual corresponde a uma perda média de 0,49% da massa total. O resíduo da perda mássica entre 0,17% e 0,88%, corresponde ao material mineral (cinzas). Os valores médios de cada amostra de bioRCC estão apresentados na Figura 48.

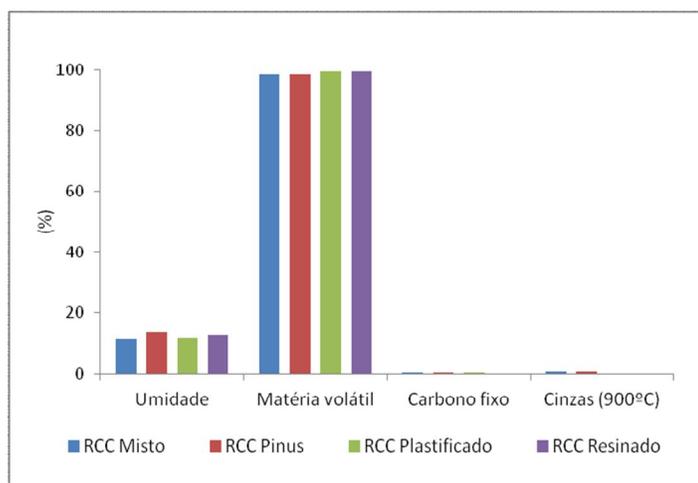


Figura 48 – Gráfico da análise imediata.

Na análise imediata, verifica-se que as amostras de bioRCC estudadas possuem elevado teor de matéria volátil (98,78%) e um baixo teor de cinzas (máximo de 0,88% no RCC Misto). Estas características conferem boas condições de inflamabilidade e queima para os coprodutos estudados e favorece a sua utilização como matéria-prima em processos termoquímicos de conversão.

No gráfico da composição elementar dos bioRCC, Figura 49, é possível verificar que carbono e oxigênio representam mais de 90% da biomassa, e os percentuais médios de nitrogênio e enxofre (0,17 e 0,18, respectivamente) estão compatíveis com outros tipos de biomassa, como

os resíduos agrícolas da produção de milho (espiga de milho) encontrados em Trninić *et al.* (2012). O alto teor de oxigênio não contribui para elevar o poder calorífico da biomassa, tornando difícil a conversão energética da biomassa, devido ao oxigênio consumir parte do hidrogênio da biomassa para produção de água, reduzindo o rendimento na produção de gás.

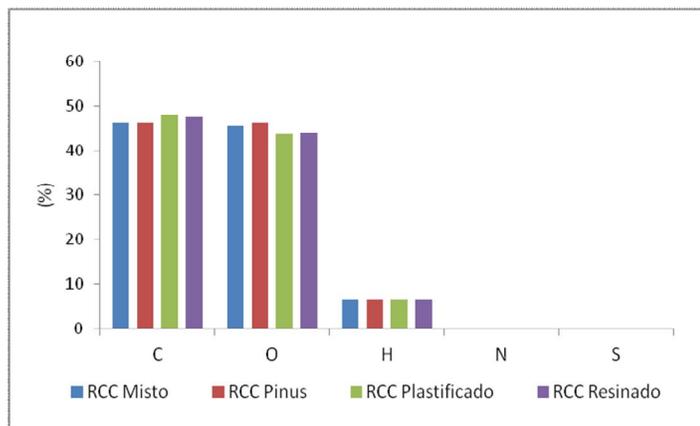
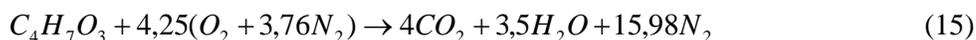


Figura 49 – Gráfico da análise elementar.

As relações O/C e H/C, apresentadas na Tabela 13, também explicam o menor PC do bioRCC. A maior proporção de oxigênio e hidrogênio em relação ao carbono no bioRCC (0,73 e 1,70, respectivamente) reduz a energia total disponível nesta biomassa, comparando aos combustíveis fósseis, que apresentam razões bem menores, como podem ser verificadas no diagrama de Carbonificação da Figura 9.

Os resultados da análise elementar, também, são importantes para determinação da relação ar-combustível em processos de termoconversão teóricos, para o cálculo da taxa de aquecimento e também para verificar o potencial poluidor da biomassa. A composição orgânica do RCC não difere muito das outras biomassas, devido à origem liginocelulósica. A equação química simplificada, balanceada para a combustão completa (100% de ar teórico) para o bioRCC estudado ($C_4H_7O_3$), está apresentada a seguir (Equação 15).



A razão ar-combustível em base molar para o bioRCC estudado está expressa pela Equação 16.

$$\overline{AC}_{teórico} = \frac{4,25 + 4,25(3,76)}{1} = \frac{4,25(4,76)}{1} = 20,23 \frac{kmol(ar)}{kmol(combustível)} \quad (16)$$

Uma vez conhecida a razão molar ar-combustível e o número de mol de ar no interior do gaseificador em função da temperatura na zona quente, calculados conforme metodologia descrita no capítulo de materiais e métodos, foi possível obter a quantidade mássica do bioRCC investigado para a condição de combustão completa, visto na Tabela 14.

Tabela 14 – Massa de madeira de RCC necessárias para combustão completa em função da temperatura na zona quente

Temperatura na zona quente (°C)	Massa de RCC (mg)
700	101
800	95
900	89

Como a massa injetada foi superior à quantidade necessária para a combustão completa dos insumos estudados, houve deficiência de ar no interior do reator (condição subestequiométrica), definindo o processo como gaseificação.

Na Figura 50, da análise dos constituintes da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) que estão presentes no bioRCC, a proporção de lignina entre 26,6% e 31,5%, caracteriza madeiras do tipo coníferas (softwoods).

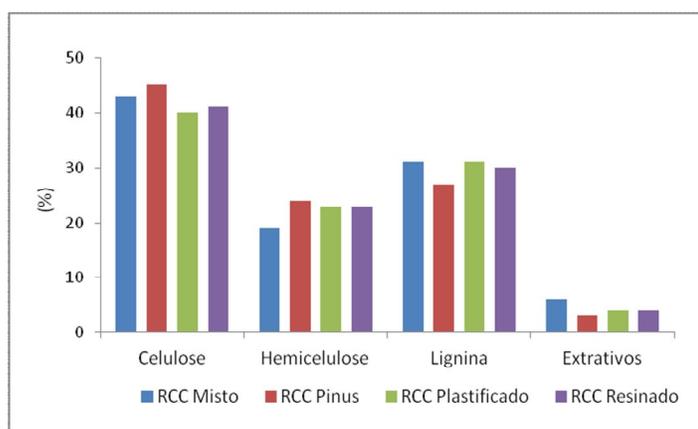


Figura 50 – Gráfico da análise bromatológica.

Na amostra de RCC Misto observa-se a maior fração de extrativos (6,3%) e a soma das porções dos constituintes poliméricos da parede celular ficaram em média 93%. Estes valores indicam que a espécie de madeira do RCC Misto (louro-rosa) deve ser oriunda de florestas tropicais. Nas outras amostras de bioRCC estas porções poliméricas aumentaram e a fração de

extrativos diminuiu, indicando que estas madeiras podem ser de zonas temperadas, as quais são de origem de reflorestamento nas regiões sul e sudeste.

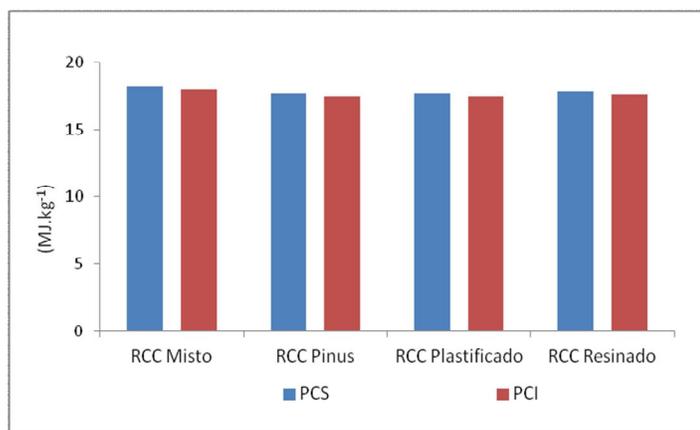


Figura 51 – Gráfico da calorimetria dos bioRCC.

Com os resultados obtidos nos ensaios de calorimetria realizados para cada tipo de bioRCC, mostrado na Figura 51, permite evidenciar que o poder calorífico das amostras se manteve constante ($17.831 \text{ kJ.kg}^{-1}$ PCI médio), e compatível com os valores encontrados em outras biomassas. Silva (2008) obteve o resultado médio de $17.700 \text{ kJ.kg}^{-1}$ em ensaios para análise do potencial calorífico dos resíduos de madeiras utilizadas em canteiros de obra na cidade do Recife. Neste estudo, foram selecionadas 09 (nove) amostras de tipos de madeiras utilizadas em canteiros de obra (bioRCC). Estes ensaios, também, foram realizados no Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Universidade de Pernambuco (UPE). Podem ocorrer variações nos resultados do poder calorífico entre as biomassas. Isto é explicado devido à combinação da quantidade de carbono e do teor de umidade das amostras, pois aumenta com a quantidade de carbono presente na biomassa, mas também é afetado devido à presença de umidade.

Com base nos dados da composição elementar, foi possível calcular o poder calorífico empírico das biomassas analisadas. A fórmula desenvolvida por D. I. Mendeliev (Equação 1) estimou o PCI empírico médio na base seca do bioRCC em $17.842 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Isto representa um desvio de 0,06% em relação ao poder calorífico inferior médio ($17.831 \text{ kJ.kg}^{-1}$) obtido experimentalmente.

A correlação desenvolvida por Jenkins (Equação 2) proporcionou previsões de $18.809 \text{ kJ.kg}^{-1}$ para o PCS empírico médio na base seca do bioRCC. Consoante essa fórmula, os desvios encontrados entre o valor experimental e teórico foi de 4,20%. Os desvios apresentados pelas equações são considerados baixos, mesmo a Equação 1 sendo mais genérica, isto é, válida para todo tipo de combustível, seja ele sólido ou líquido, ao passo que a Equação 2 utiliza-se apenas para biomassas.

Conhecendo-se o poder calorífico inferior e a densidade aparente do bioRCC, foi possível calcular a densidade energética para cada amostra estudada. A Figura 52 apresenta os valores de energia disponível para cada metro cúbico de bioRCC. A densidade energética de madeira de RCC Misto é maior se comparada aos outros bioRCC. Por exemplo, enquanto a queima de 1m^3 de madeira de RCC Pinus disponibiliza 7,2 GJ, a combustão do mesmo volume de RCC Misto libera 2 vezes mais energia (14,4 GJ).

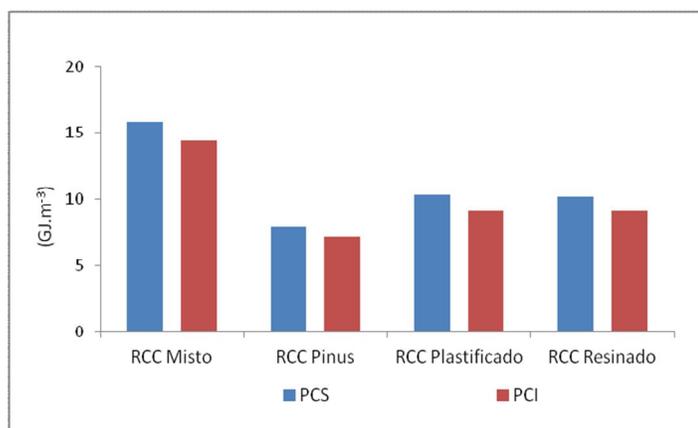


Figura 52 – Gráfico da densidade energética dos bioRCC.

5.3 Conversão termoquímica da biomassa

A etapa de conversão termoquímica do bioRCC (gaseificação) iniciou com os primeiros testes com o gaseificador de bancada, em escala laboratorial, utilizando amostras de pellets de serragem bioRCC. O objetivo inicial, além, de quantificar os gases presentes após a conversão térmica, foi estudar os efeitos da variação de temperatura interna no reator, da massa inicial de matéria-prima gaseificada, do grau de adensamento e do tempo de residência do insumo no interior do reator.

Os resultados obtidos da composição dos gases resultantes da gaseificação das amostras de pellets de serragem RCC, no gaseificador em escala laboratorial são mostrados na Tabela 15. Na análise por cromatografia gasosa das amostras coletadas forneceu as concentrações molares individuais dos gases hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrogênio e oxigênio, componentes do gás combustível. Nas amostras coletadas não se detectou traços de metano (CH_4).

Tabela 15 – Composição dos gases resultantes de pellets de bioRCC

Temperatura = 700°C						
Tempo de Residência	Composição (%)					PCI (MJ.Nm⁻³)
	H₂	CO	CO₂	CH₄	N₂*	
0,5 minuto	0,2	4,0	2,8	n.d.	93,0	0,47
1 minuto	4,2	9,2	16,2	n.d.	70,4	1,45
2 minuto	14,3	18,2	31,7	n.d.	35,8	3,44
3 minuto	14,3	25,9	37,3	n.d.	22,4	4,32
4 minuto	12,7	16,8	29,3	n.d.	41,1	3,14
5 minuto	10,5	24,6	32,6	n.d.	32,3	3,80
Temperatura = 800°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm⁻³)
	H₂	CO	CO₂	CH₄	N₂*	
0,5 minuto	5,1	21,9	26,0	n.d.	47,1	2,97
1 minuto	8,0	33,7	27,0	n.d.	31,3	4,59
2 minuto	9,1	37,2	32,2	n.d.	21,5	5,10
3 minuto	8,4	35,5	32,1	n.d.	24,0	4,83
4 minuto	6,5	34,6	32,8	n.d.	26,1	4,55
5 minuto	6,0	30,2	28,8	n.d.	35,1	4,00
Temperatura = 900°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm⁻³)
	H₂	CO	CO₂	CH₄	N₂*	
0,5 minuto	5,2	30,5	26,7	n.d.	37,6	3,95
1 minuto	8,9	39,3	31,1	n.d.	20,7	5,31
2 minuto	8,0	36,8	34,2	n.d.	21,0	4,94
3 minuto	8,8	40,4	30,5	n.d.	20,3	5,43
4 minuto	6,2	29,4	31,3	n.d.	33,0	3,93
5 minuto	6,2	29,5	31,8	n.d.	32,4	3,94

* N₂ = corresponde a soma das frações de nitrogênio e oxigênio

Os valores das concentrações molares individuais dos gases, para cada temperatura e tempo de residência, estão apresentados na Figura 53 a Figura 55. Nos gráficos observa-se que com o aumento da temperatura e do tempo de residência ocorreu a redução da concentração de N₂ e o correspondente aumento nas concentrações de CO e CO₂, caracterizando as reações de oxidação do carbono, as quais são importantes durante o processo de gaseificação.

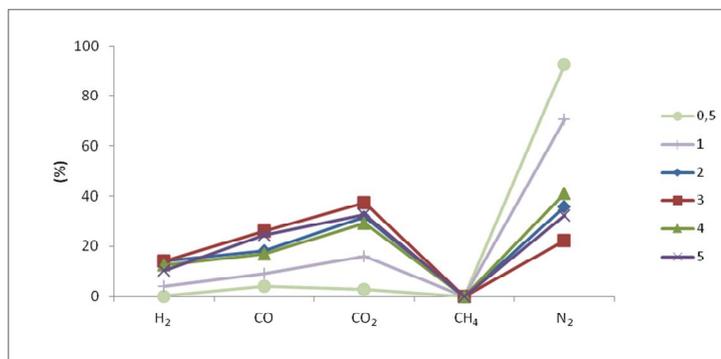


Figura 53 – Composição do gás produzido à 700°C por tempo de residência.

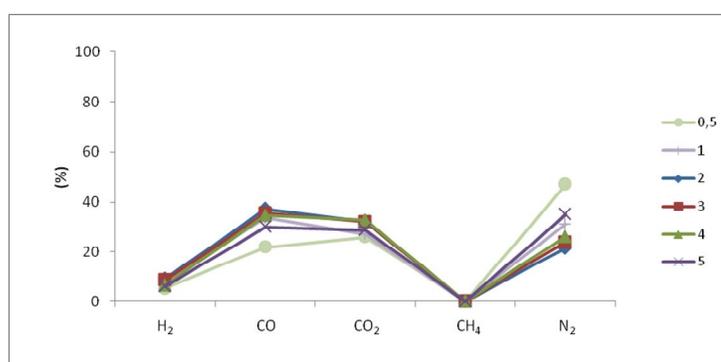


Figura 54 – Composição do gás produzido à 800°C por tempo de residência.

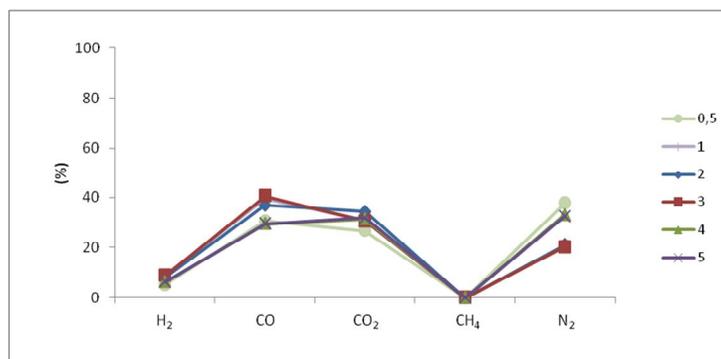


Figura 55 – Composição do gás produzido à 900°C por tempo de residência.

O PCI do gás combustível produzido está representado na Figura 56. A partir da análise destes resultados, pode-se observar que com o aumento da temperatura e do tempo de residência ocorreram melhoras nos resultados do poder calorífico. O resíduo resultante da gaseificação das amostras foi quantificado, e calculado os percentuais de biomassa gaseificável, ilustrado na Figura 57.

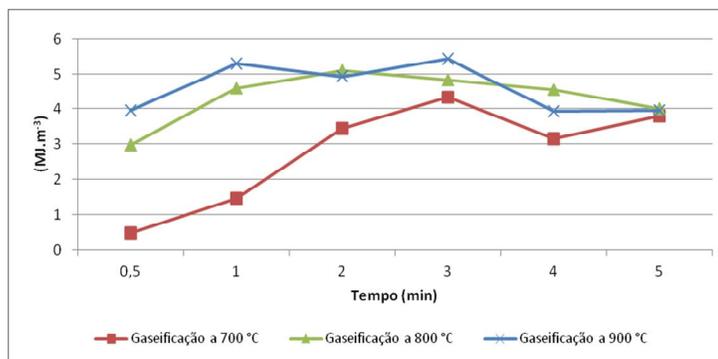


Figura 56 – PCI do gás produzido.

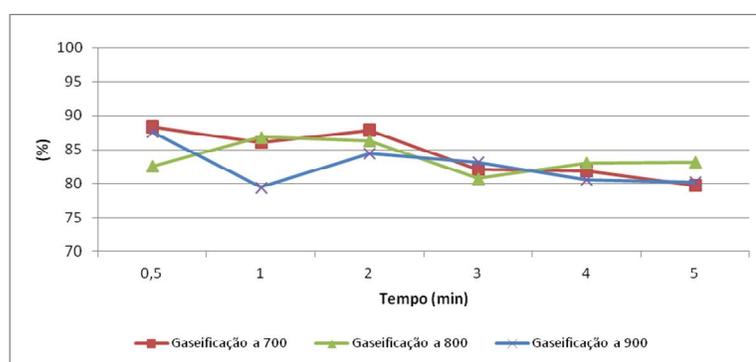


Figura 57 – Massa gaseificável da biomassa.

Os resultados encontrados, nesta fase da pesquisa, não foram conclusivos quanto ao potencial energético do bioRCC, entretanto, foram necessários para determinação dos parâmetros de gaseificação utilizados no gaseificador de bancada, como também realizar ajustes operacionais nos equipamentos.

Com relação ao tempo de permanência do insumo no interior do reator, antes de iniciar a coleta do gás produzido, foi possível determinar o tempo de residência ótimo de 3 minutos. Como pode ser visto na Figura 56, na temperatura de 900°C obteve o maior poder calorífico (PCI igual a 5,43MJ.m⁻³), ocorrendo no tempo de 3 minutos. Este tempo de residência é o mesmo utilizado por Geraldo *et. al.* (2012) ao gaseificar co-produto de mamona nas temperaturas de 800°C e 900°C. Outra evidência é comportamento do gráfico de massa gaseificável, da Figura 57, onde mostra a estabilização da quantidade de massa gaseificada das amostras a partir do tempo de 3 minutos.

Foram realizados testes aumentando a massa inicial da amostra para 10g. Observou-se que na temperatura de 700°C a pressão interna do reator atingiu 10 bar. Prevendo pressões maiores nas temperaturas de 800°C e 900°C e por questões de segurança, ficou definido 5g para massa inicial da amostra bioRCC, nos próximos ensaios. Geraldo *et. al.* (2012) concluiu, também, que o grau de adensamento não foi fator significativo para a formação de nenhum componente individual do gás gerado a partir da gaseificação dos co-produtos da mamona, por isso, ele praticamente não exerce influência no poder calorífico inferior do gás.

Determinados os parâmetros experimentais para a gaseificação em escala laboratorial, como a variação de temperatura interna no reator, a massa inicial das amostras, o grau de adensamento e o tempo de residência do insumo no interior do reator; foi possível iniciar a segunda fase dos ensaios de gaseificação para formação do gás de síntese para cada tipo de bioRCC injetado. Os resultados médios obtidos da composição dos gases resultantes do gaseificador em escala laboratorial são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Composição dos gases resultantes do gaseificador de bancada

Temperatura = 700°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm ⁻³)
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂ *	
RCC Misto	25,2 ± 0,8	13,1 ± 1,3	27,5 ± 1,2	11,7 ± 0,1	21,8 ± 1,3	8,07 ± 0,15
RCC Pinus	22,5 ± 2,2	14,1 ± 1,0	28,1 ± 0,9	13,9 ± 0,3	20,0 ± 1,0	8,99 ± 0,47
RCC Plastificado	24,1 ± 1,5	11,7 ± 0,2	28,4 ± 0,5	13,3 ± 0,7	21,3 ± 0,3	8,55 ± 0,22
RCC Resinado	22,8 ± 2,0	12,4 ± 0,9	27,2 ± 2,0	13,3 ± 0,9	23,1 ± 1,9	8,53 ± 0,41
MÉDIA	24,6 ± 1,1	13,0 ± 0,9	27,6 ± 0,5	12,3 ± 0,8	21,6 ± 1,1	8,28 ± 0,35
Temperatura = 800°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm ⁻³)
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂ *	
RCC Misto	25,4 ± 2,4	14,9 ± 0,6	31,1 ± 2,0	14,8 ± 0,3	12,3 ± 1,0	9,72 ± 0,43
RCC Pinus	21,8 ± 1,7	15,9 ± 0,3	31,9 ± 2,4	16,8 ± 1,6	12,0 ± 0,8	10,18 ± 0,68
RCC Plastificado	31,5 ± 0,4	13,4 ± 0,5	25,8 ± 2,4	16,1 ± 0,3	11,4 ± 0,9	10,70 ± 0,11
RCC Resinado	30,2 ± 2,3	14,5 ± 1,3	24,1 ± 2,4	15,5 ± 0,3	14,3 ± 0,8	10,28 ± 0,40
MÉDIA	26,2 ± 3,9	14,7 ± 0,9	29,9 ± 3,3	15,3 ± 0,7	12,3 ± 1,1	9,95 ± 0,39
Temperatura = 900°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm ⁻³)
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂ *	
RCC Misto	19,7 ± 1,9	20,4 ± 1,4	18,9 ± 1,0	17,0 ± 0,2	23,5 ± 1,3	9,97 ± 0,21
RCC Pinus	19,1 ± 1,8	21,4 ± 1,3	20,4 ± 1,6	17,0 ± 1,4	21,0 ± 1,8	10,31 ± 0,68
RCC Plastificado	24,8 ± 1,9	23,3 ± 1,7	20,7 ± 1,2	14,4 ± 1,0	14,7 ± 1,3	10,74 ± 0,29
RCC Resinado	24,6 ± 2,1	21,8 ± 1,6	19,0 ± 0,8	13,1 ± 0,6	19,2 ± 1,9	10,28 ± 0,26
MÉDIA	20,7 ± 2,7	21,0 ± 1,1	19,3 ± 0,8	16,3 ± 1,7	21,6 ± 2,2	10,14 ± 0,31

* N₂ = corresponde a soma das frações de nitrogênio e oxigênio

A análise por cromatografia gasosa das amostras coletadas nos sacos amostradores forneceu as concentrações molares individuais dos gases hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrogênio, oxigênio e metano, componentes do gás de síntese. No gráfico da Figura 58, observa-se que nas temperaturas de 700°C e 800°C não ocorre variações nas proporções gasosas do gás produzido, entretanto, na temperatura de 900°C ocorreu a redução da concentração de CO₂ e o correspondente aumento na concentração de CO.

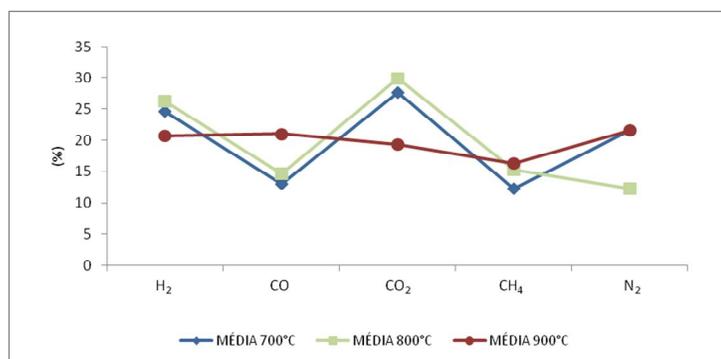


Figura 58 – Composição média do gás produzido (bancada).

A Figura 59 e Figura 60 mostram, respectivamente, os gráficos dos valores médios encontrados do poder calorífico inferior e volume de gás produzido no gaseificador de bancada para as diversas temperaturas das amostras de bioRCC estudadas.

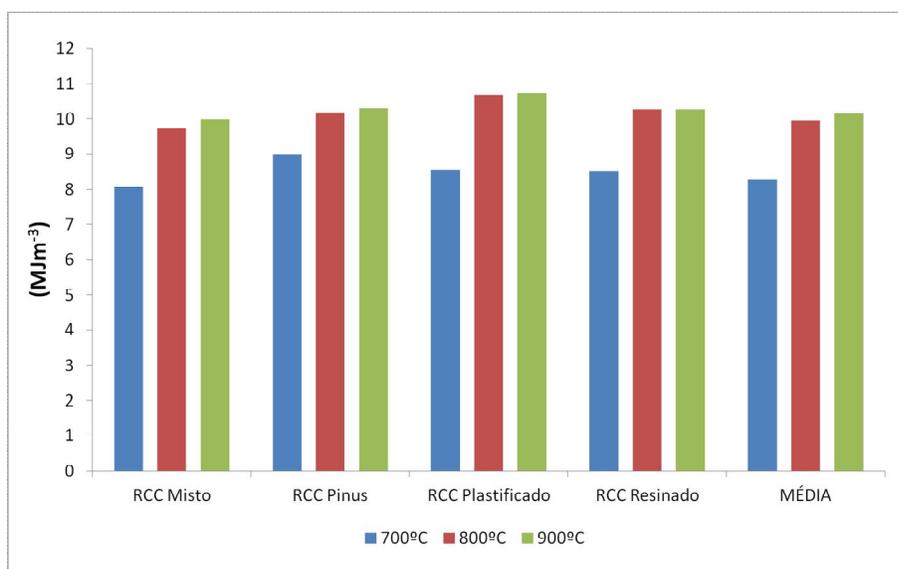


Figura 59 – Poder calorífico inferior vs temperatura.

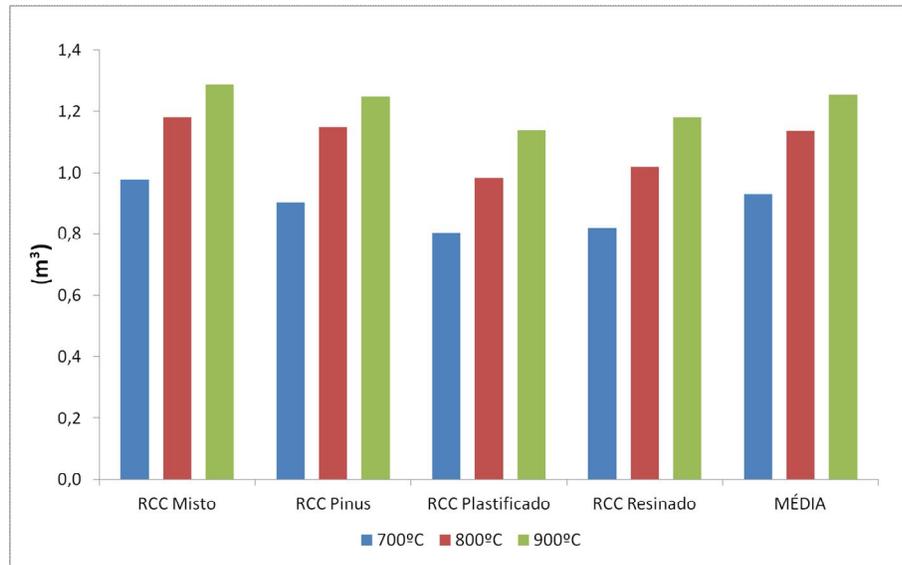


Figura 60 – Volume produzido vs temperatura.

O resultado do PCI médio obtido a 900°C no gaseificador de bancada ($10,1 \text{ MJ.m}^{-3}$) corresponde a 30% do poder calorífico do gás natural. Os valores encontrados são semelhantes aos obtidos por Geraldo (2013), utilizando co-produto da mamona. Conhecendo-se o poder calorífico inferior e o volume de gás produzido, foi possível calcular a energia total disponível em cada situação experimental. A Figura 61 apresenta os valores de energia total disponível para cada tonelada de bioRCC gaseificado.

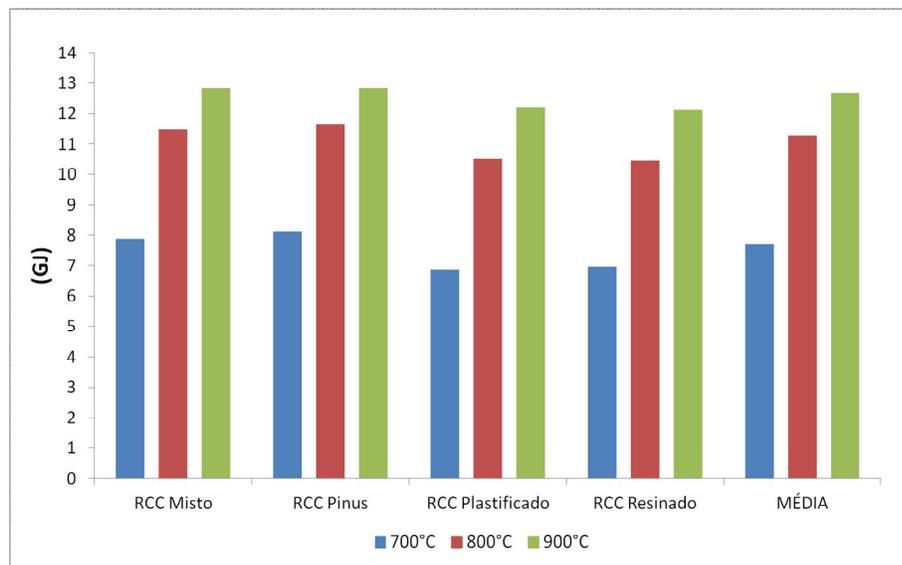


Figura 61 – Energia gerada vs temperatura.

Por meio da análise dos resultados acima, verificou-se que apesar das amostras de madeiras compensadas (RCC Plastificado e RCC Resinado) apresentarem poder calorífico acima das amostras de madeira serrada (RCC Misto e RCC Pinus), estas últimas produziram um volume de gás maior que as primeiras, e, conseqüentemente, um aumento no aporte energético.

A partir da análise da energia total disponível do gás gerado, observou-se que a gaseificação do bioRCC a 900°C produziu uma energia média de 12,7 MJ.kg⁻¹. Neste caso, fazendo o balanço de massa e energia do gaseificador de bancada, relacionando a energia média disponível com o poder calorífico inferior médio do bioRCC (17,8 MJ.kg⁻¹), isto correspondeu a uma eficiência de conversão de 71%.

Para se ter uma idéia de grandeza do potencial energético envolvido, no caso de se aproveitar as 200 toneladas de bioRCC produzidas diariamente na Região Metropolitana do Recife (RMR), a energia produzida, experimentalmente, indica um aporte energético de 6.400 MWh por mês ou 76.000 MWh por ano, suficiente para suprir aproximadamente 50.000 casas populares.

Na última fase dos ensaios de gaseificação foi utilizado o gaseificador de leito fixo *downdraft* TERMOQUIP, para realização de experimentos em escala piloto. Foram realizados ensaios de gaseificação com amostras de bioRCC na proporção de cada tipo adquirido pela obra de referência. A média dos resultados de 07 (sete) amostras do gás combustível produzido está apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Composição dos gases resultantes do gaseificador *downdraft*

Tecnologia	Composição (%)					PCI (MJ.Nm ⁻³)
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	
Gaseificador <i>Downdraft</i>	16,6 ± 0,4	20,5 ± 0,8	11,8 ± 0,7	1,4 ± 0,2	49,6 ± 1,1	4,40 ± 0,13

No gráfico da Figura 62, mostra os resultados da análise por cromatografia gasosa das amostras coletadas nos tempos programados, onde não se verifica variações nas proporções gasosas do gás produzido durante todo funcionamento do equipamento. A composição dos gases obtida pelo gaseificador de leito fixo *downdraft* do POLICOM está coerente com aqueles achados na literatura (Bridgwater *et al.*, 2002).

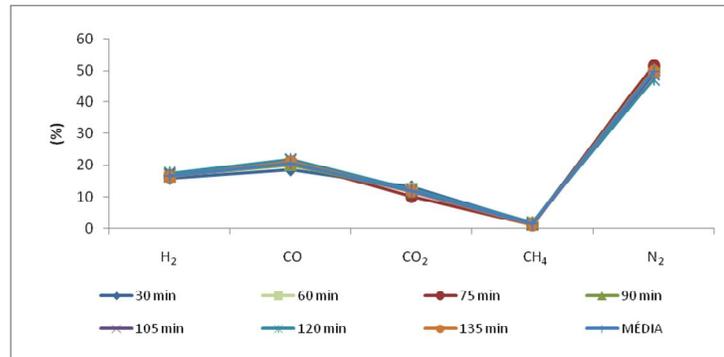


Figura 62 – Composição média do gás produzido (downdraft).

Considerando os poderes caloríficos inferiores do metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) e do hidrogênio (H₂), respectivamente, como 32,08 MJ.Nm⁻³, 11,32 MJ.Nm⁻³ e 9,68 MJ.Nm⁻³ (PERES,1997), um normal metro cúbico do gás gerado produz, em média, 4,40 MJ de energia. No gaseificador de leito fixo downdraft, o poder calorífico inferior reduziu para 40% em relação à média dos resultados alcançados no gaseificador de bancada. Diante disto, pode se estimar que a eficiência de conversão termoquímica reduza na mesma proporção. Os resultados dos poderes caloríficos de cada amostra coletada estão apresentados na Figura 63.

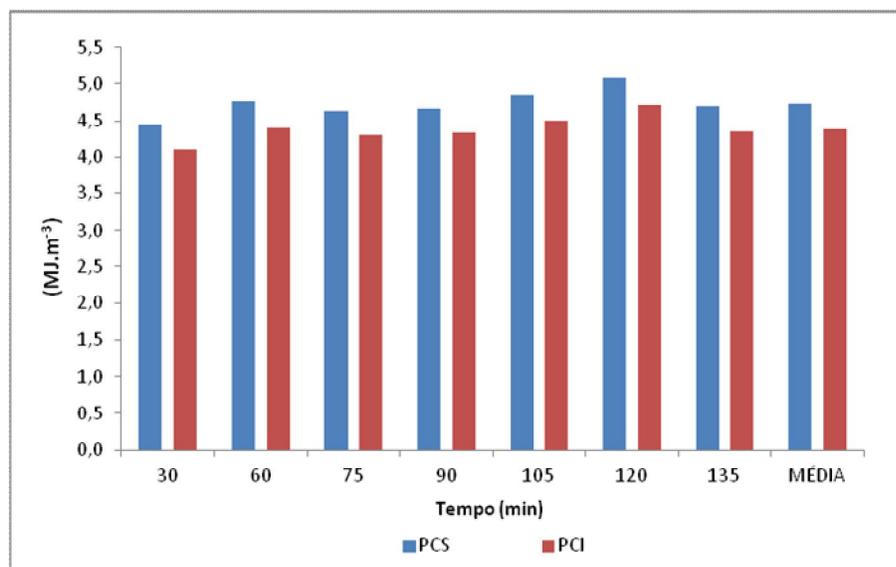


Figura 63 – Poder calorífico do gás produzido (gaseificador downdraft).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Na análise gravimétrica das madeiras adquiridas pela obra foi verificada que 67% correspondem à madeira mista (RCC Misto), as quais são madeiras serradas (tábuas, sarrafos e barrotes), utilizadas na confecção de fôrmas, escoramentos, instalações provisórias, proteções de periferia, entre outros. Estas madeiras são produzidas sem nenhum tratamento químico ou associação com outros produtos químicos, os quais poderiam de alguma forma emitir gases tóxicos durante a gaseificação. Durante a coleta das amostras foi evidenciada a heterogeneidade das peças de madeira (formas e tamanhos irregulares) e, eventualmente, a presença de elementos metálicos, visto que existia o cuidado de retirar todos os pregos na desmontagem das peças.

A estimativa da taxa de utilização de madeira na obra pesquisada foi de $14,4 \text{ kg.m}^{-2}$ de área construída ou 62 kg.m^{-3} de volume de concreto aplicado na superestrutura. Por outro lado, observou-se a quantidade de resíduos de madeira retirados da obra pela empresa coletora corresponde a 10,5% da quantidade total de madeira adquirida, devido ao reaproveitamento ou recolhimentos clandestinos. Entretanto, considera-se que todo volume de madeira adquirida pelas obras em algum momento ocorrerá seu descarte definitivo como bioRCC.

Nos ensaios para caracterização física do bioRCC verifica-se baixo valor de umidade (máximo 10%), evidenciando a boa condição que os resíduos de madeiras foram armazenado no canteiro visitado, não necessitando de tratamento prévio para sua utilização como combustível. O baixo teor de cinzas, também, facilita a operação e manutenção do equipamento utilizado, quanto ao seu sistema de remoção e limpeza das cinzas. Com relação a densidade aparente, o RCC Misto se destaca pelo maior valor (800 kg.m^{-3}), contudo, o bioRCC tem condições de receber um tratamento mecânico (peletização) e aumentar sua densidade energética.

Na composição elementar do bioRCC foi possível verificar que carbono e oxigênio representam mais de 90% da biomassa, e os percentuais médios de nitrogênio e enxofre (0,17

e 0,18, respectivamente) estão compatíveis com outros tipos de biomassa. Na análise imediata das amostras de RCC foram observados alto conteúdo de material volátil (média de 98,8%) e baixo teor de cinzas (média de 0,7%), fatores considerados importante durante a queima total e gaseificação do combustível. Na análise dos constituintes celular, observa-se um maior teor de lignina em relação à hemicelulose, indicando que as madeiras utilizadas na obra são do tipo conífera (softwood). Verifica-se também que o RCC Misto apresenta um teor de extrativo (6,3%) mais elevado em relação aos demais tipos de bioRCC (em média 3,6%).

Os resultados dos ensaios de calorimetria realizados para cada tipo de bioRCC mostrou que o poder calorífico das amostras se manteve constante (17.8 kJ.kg^{-1} PCI médio), e a densidade energética da madeira de RCC Misto ($14,4 \text{ GJ.m}^{-3}$) é maior se comparada aos outros bioRCC ($7,2 \text{ GJ.m}^{-3}$ do RCC Pinus) e acima dos valores encontrados por Geraldo (2013) utilizando co-produto de mamona peletizado ($13,8 \text{ GJ.m}^{-3}$).

Durante a etapa de gaseificação das amostras de bioRCC foi possível observar a maior concentração média de CO e CH₄ obtida foi de 21,0% e 16,3%, na temperatura de 900°C. A maior concentração média de H₂ (26,2%) e CO₂ (29,9%) foi observada na temperatura de 800°C, e menor concentração de N₂, em média 12,3%. Os melhores resultados de poder calorífico dos gases produzidos ocorreram na temperatura do reator de 900°C, utilizando tempo de residência igual a 3 minutos. Conforme relatado em Geraldo et. al. (2012), o grau de adensamento das amostras de bioRCC não exerceu influência significativa no poder calorífico inferior.

O resultado energético médio, em termos de PCI, foi de $10,1 \text{ MJ.m}^{-3}$ para o gás formado a partir da gaseificação à 900°C do bioRCC. Este valor corresponde a 30% do poder calorífico do gás natural. A maior quantidade de energia total disponível, obtida pela gaseificação de bioRCC, também ocorreu nesta temperatura, em média $12,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Se convertida esta energia em eletricidade seria suficiente para suprir aproximadamente 50.000 casas populares na RMR, considerando uma geração diária de 200 toneladas de bioRCC.

Com base nos resultados médios da energia total disponível ($12,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$) e do poder calorífico inferior do bioRCC ($17,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$) foi possível realizar o balanço de massa e energia do gaseificador de bancada, correspondendo a uma eficiência de conversão de 71%.

Nos ensaios realizados no gaseificador em escala piloto (unidade de gaseificação *downdraft* de leito fixo), o gás gerado produziu, em média, $4,40 \text{ MJ.m}^{-3}$ de PCI, reduzindo para 40% em relação à média dos resultados do PCI médio obtido a 900°C no gaseificador de bancada. Estimou-se que a eficiência de conversão termoquímica, também, reduza na mesma proporção.

Os resultados experimentais demonstram a boa qualidade do bioRCC para geração de energia elétrica do combustível gasoso produzido pelo bioRCC, utilizando a gaseificação como processo de conversão.

As atividades do setor da construção civil têm mostrado tendências de crescimento no país com conseqüente aumento na produção de resíduos. A busca de alternativas para redução, reaproveitamento e reciclagem é necessária para o desenvolvimento sustentável do setor. A possibilidade da utilização de uma nova alternativa de geração de energia elétrica no Brasil vem de encontro às atuais necessidades da sociedade. A valorização energética do bioRCC se mostra promissora pelo volume considerável de material ligno-celulósico gerado pela construção civil, aliado a ampla possibilidade de utilização nos mais variados métodos para geração de energia (térmica, mecânica e elétrica). Apesar de apresentar um poder calorífico menor em comparação com os combustíveis fósseis, a madeira torna-se um combustível altamente competitivo pelo fato de ser um recurso renovável, se aproveitado de maneira sustentável, e serve como uma fonte infinita de recursos.

Esta pesquisa contribuiu para determinação de parâmetros de avaliação do potencial energético dos resíduos gerados pelas atividades da construção civil na cidade do Recife, podendo ser estendida para outras cidades no Brasil, assim como para subsidiar os processos de reciclagem e conseqüentemente a redução dos impactos ambientais gerados pela disposição inadequada de tais resíduos.

6.2 Sugestões

A tecnologia de gaseificação proposta para conversão térmica do bioRCC apresentada neste trabalho demonstra uma necessidade de aprimoramento técnico e pesquisas complementares envolvendo o fluxo de operação e dos processos utilizados. Associados à otimização dos processos, seria recomendável estudos complementares em tecnologias mais avançadas em escala industrial.

Por se tratar de um trabalho de pesquisa aplicada, justificam-se as sugestões para futuras pesquisas, englobando as seguintes propostas:

- Atualização dos indicadores de participação dos resíduos da construção civil (RCC) na massa total de resíduos sólidos urbanos (RSU);
- Estudos específicos da participação do bioRCC na massa total de resíduos da construção civil (RCC) na RMR;
- Quantificação da geração de bioRCC por fase da construção (fundação, estrutura, alvenaria e acabamento);
- Estudo da viabilidade técnica do reaproveitamento energético das embalagens de papel existentes nos RCC, através de processo de conversão termoquímica;
- Estudo cinético do processo de gaseificação e mecanismos de formação dos gases componentes do *syngas*;
- Modelagem matemática do gaseificador de bancada (escala laboratorial);
- Desenvolvimento de métodos para medição de vazão do gás produzido, do teor de particulados e de alcatrão formado durante o processo de gaseificação;
- Aperfeiçoamento do sistema de aquecimento da fornalha do gaseificador de bancada para atingir temperaturas acima de 900°C;
- Desenvolvimento de sistema de acoplamento para adaptação de um grupo gerador no gaseificador *downdraft* (escala piloto);
- Realização de análises químicas das cinzas resultantes do processo de gaseificação, para dentre outros aspectos, verificar a presença de metais pesados como cromo, bromo e arsênio, devido à presença de madeiras tratadas;
- Análise de viabilidade econômica para geração de energia elétrica a partir da tecnologia de gaseificação utilizando diversas biomassas disponíveis nos centros urbanos;

- Aplicação das condições encontradas neste trabalho em gaseificações de maior escala;
- Estudos de produção de combustível líquido utilizando o processo de conversão biológico em material celulósico da construção civil;
- Estudos de produção de combustível gasoso utilizando o processo de pirólise em material celulósico da construção civil.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standards Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke**, in Annual Book of ASTM Standards, section D3176-74, 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standards Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke**, in Annual Book of ASTM Standards, section D3172-73 a D3175-73, 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standards Methods for Gross Calorific Value of Solid Fuel by the Adiabatic Bomb Calorimeter**, in Annual Book of ASTM Standards, section D2015-77, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. ABNT: Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Anexo B - Determinação das propriedades das madeiras para projetos de estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8289**: Carvão mineral - Determinação do teor de cinzas - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1983 Versão Corrigida: 1987.

AUSTRÁLIA. National Association of Forest Industries. **Report 4 – Converting wood waste into renewable energy: a summary of biomass energy conversion technologies**. Canberra. Austrália, 2005.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.; BRUNS, R. **Como fazer experimentos**. 4. ed. São Paulo: Bookman, 2010. 414p.

BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory**. UK: Elsevier, 2010. 365 p.

BERGSDAL, H.; BOHNE, R. A.; BRATTEBØ, H. **Projection of Construction and Demolition Waste in Norway**. Journal of Industrial Ecology, 2007. v.11, nº 3, p. 27–39. doi: 10.1162/jiec.2007.1149.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 307, de 05 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil.**

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

BRASIL. Decreto n. 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial do Município Cadernos do Poder Executivo. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 431, de 24 de maio de 2011. **Revisão da Resolução CONAMA nº 307/2002 - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.**

BRIDGWATER, A.V. **The technical and economic feasibility of biomass gasification for Power generation.** Fuel, vol 74, n. 5, 631-653, 1995.

BRIDGWATER, A.V., TOFT, A.J., BRAMMER, J.G. **A technoeconomic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion.** Renewable & Sustainable Energy Reviews 6 (3). pp 181–248, 2002.

BRIDGEWATER, A.V. **Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass.** Chemical Engineering and Applied Chemistry Department, Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK: Chemical Engineering Journal, vol.91, pp 87-102, 2003.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira.** Estudos Avançados, vol.21, n.59, pp. 185-193, 2007.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife.** 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico de Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da Cogeração de Energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana de açúcar e gás natural**. 2001. Dissertação (Mestrado). Programa de Planejamento Energético /COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

CORTEZ, L. A. B. (org.); LORA, E. E. S. (org.); GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. 736p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balço energético nacional 2013: Ano Base 2012**. Rio de Janeiro: EPE, 2013. 288p.

FALCÃO, N. C. B. **Diagnóstico da situação atual dos resíduos da construção civil no município de Olinda**. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO (FIEPE). **Índice de velocidade de vendas – IVV**. Ano XIX, nº . 01. Recife: UPTEC - Unidade de Pesquisas Técnicas, Janeiro/2014.

GAUR, S.; REED, T. B. **An atlas of thermal data for biomass and other fuels**. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1995.

GERALDO, B. C.; PERES, S.; SILVA, F.; LOUREIRO, E.; BENACHOUR, M. Adensamento energético pela pelletização da casca da mamona. In: Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, 5, 2012, Salvador, BA. **Anais...** Brasília, DF: MCTI, 2012, v.3, p.1655-1656.

GERALDO, B. C. **Gaseificação da casca e da torta da mamona para produção de gás combustível**. 2013. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

GOES, R. H. T. B.; LIMA, H. L. **Técnicas laboratoriais na análise de alimentos**. Dourados: Ed.UFGD, 2010. 52p. (Cadernos acadêmicos UFGD. Ciências agrárias).

GUSMÃO, A. D. **Manual de gestão dos resíduos da construção civil**. Camaragibe: CCS Grafica Editora, 2008. 140p.

HIGMAN, Christopher.; BURGT, Maarten. **Gasification**. 2. ed. United Kingdom: Elsevier, 2008. 435p.

HOLZ, E. D. **Avaliação do potencial energético dos resíduos da construção civil**. 2008. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia civil) - Departamento de Engenharia de Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES Jr., T. R.; MILES, T. R. **Combustion properties of biomass**. Fuel Processing Technology, v. 54, p.17-46, 1998.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 2005. 3ª. Edição revisada. 86p.

KOCASOY, G. Gerenciamento de resíduos sólidos na Turquia. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**. São Paulo, 2005.

LAGE, I. M.; ABELLA, F. M.; HERRERO, C. V.; ORDÓÑEZ, J. L. P. **Estimation of the annual production and composition of C&D Debris in Galicia (Spain)**. Waste Management, 2010. v. 30, Issue 4, p. 636-645, ISSN 0956-053X, doi: 10.1016/j.wasman.2009.11.016.

LINDE Gases Ltda. **Técnicas Analíticas: Cromatografia Gasosa**. The Linde Group, 2008.

LIODAKIS S., BAKIRTZIS D., DIMITRAKOPOULOS A. **Ignition characteristics of forest species in relation to thermal analysis data**. Thermochemica Acta. pp 83–91, 2002.

LOUREIRO, E. C. M.; AZEVEDO, B. C.; PERES, S.; SILVA, F. M. V. Produção de syngas utilizando madeira em um gaseificador downdraft ventilado e sua aplicação em grupo gerador do ciclo otto. In: Rio Oil and Gas 2012, 2012, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro, 2012.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 3): gasification technologies**. Bioresource Technology, vol. 83, 55-63, 2002.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 800p.

OH, D. Y.; GONÇALVES, V. C.; MIKOS, W. L. Análise da situação de destinação dos resíduos sólidos oriundos da construção civil em Curitiba e Região Metropolitana. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., 2003, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ENGEP, 2003.

PERES, S. R. **Catalytic indirect heated gasification of sugarcane bagasse**. Ph.D. Thesis. University of Florida, Gainesville-USA, 1997.

PERNAMBUCO. Lei nº 14.236, de 13 de dezembro de 2010, Dispõe sobre a política estadual de resíduos sólidos, e dá outras providências. Recife, 2010.

PINTO, T. P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PRIORI JÚNIOR, L. (coord.) **Construção Sustentável: Potencialidades e Desafios para o Desenvolvimento Sustentável na Construção Civil**. Recife: Sinduscon/PE, 2008. 32p.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Laboratório de produtos florestais LPF/IBAMA. Módulo do Curso “Capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e dos resíduos vegetais”, 2000.

RECIFE. Decreto n. 18.082, de 13 de novembro de 1998. Regulamenta a Lei nº 16.377/98 no que tange ao transporte e disposição de resíduos de construção civil e outros resíduos não abrangidos pela coleta regular e dá outras providências. Recife, 1998.

RECIFE. Lei nº 17.072, de 04 de janeiro de 2005. Estabelece as diretrizes e critérios para o programa de gerenciamento de resíduos da construção civil. Diário Oficial do Município Cadernos do Poder Executivo. Recife, 2005.

RENDEIRO, G. (coord.); NOGUEIRA, M. F. M. (ed.); BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; ICHIHARA, J. A. **Combustão e gaseificação de biomassa sólida**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 192p.

SALES, C. V. B.; ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. **Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas.

SAMPAIO, Liliane Lima. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto e estabilização de solos**. 2013. 100p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Programa de pós-graduação em engenharia civil, Recife, 2013.

SANTOS, S. M. A. **Geração de eletricidade em comunidades isoladas na região amazônica com a utilização de gaseificadores de biomassa.** 2006. 185f. Dissertação (Mestrado), Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/FEA/IEE/IF USP, São Paulo, 2006.

SANTOS, A. N. **Diagnóstico da situação dos resíduos de construção e demolição (RCD) no município de Petrolina (PE).** 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2008.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo.** 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. São Paulo.

SILVA, E. N. **Panorama da gestão dos resíduos da construção civil na cidade do Recife.** 2008. 72f. Projeto final de curso (Graduação em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife.

STASSEN, H. E. **Small-scale biomass gasifiers for heat and power: a global review.** World Bank Technical Paper Number 296, Energy Series. Washington, D.C., 1995.

STATE OF CALIFORNIA (USA). **Targeted Statewide Waste Characterization Study: Detailed Characterization of Construction and Demolition Waste.** Sacramento, CA: Integrated Waste Management Board Public Affairs Office, Publications Clearinghouse, 2006. 129p.

TÔRRES FILHO, A. **Viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos de madeira para produção de um combustível alternativo.** 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TRNINIĆ, M.; JANKES, G.; STAMENIĆ, M.; SIMONOVIĆ, T.; TANASIĆ, N. **Industrial scale demonstration plant with downdraft gasifier coupled to pebble bed regenerative heater for chp production.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 25., 2012, Perugia, Italy.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONFERENCE ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC), 2005. **Reducing emissions from deforestation in developing countries: Approaches to stimulate action.** Conference of the Parties, Montreal, 28 November to 9 December 2005. FCCC/CP/2005/L.2, UNFCCC, Bonn, Germany.

VALENÇA, M.; MELO, I.; WANDERLEY, L. A degradação de corpos d'água e a deposição irregular de resíduos da construção civil na cidade do Recife, Pernambuco, Brasil. **Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, São Paulo, Vol. 1, n.º 1, p.45-58. Out. 2008.

VAN SÖEST, R.; ROBERTSON, J. **Analysis of forages and fibrous foods: a laboratory manual**. Ithaca, NY: Cornell University, 1985.

WWF-Brasil; SINDUSCON-SP. **Aquisição responsável de madeira na construção civil: guia prático para as construtoras**. São Paulo: SINDUSCON-SP, 2011. 67p.

ZUNATTA, Fábio L. **Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura**. Tese de Doutorado. Viçosa, MG: UFV, 2011. 87p.