



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA**  
**E ENGENHARIA DE MATERIAIS**



**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS**

Abílio José Procópio Queiroz

Campina Grande  
Agosto/2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA**  
**E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS**  
**SÓLIDOS URBANOS**

Abílio José Procópio Queiroz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientadora: Dra. Crislene Rodrigues da Silva Morais

Co-orientadora: Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima

Campina Grande  
Agosto/2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG


- Q3a      Queiroz, Abílio José Procópio.  
            Análise da degradação e do poder calorífico de resíduos sólidos urbanos  
            / Abílio José Procópio Queiroz. – Campina Grande, 2014.  
            124 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –  
            Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia,  
            2014.
- "Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Crislene Rodrigues da Silva Morais,  
            Prof.<sup>a</sup> Lenilde Mérgia Ribeiro Lima".
- Referências.
1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Poder Calorífico. 3. Degradação  
            Térmica. I. Morais, Crislene Rodrigues da Silva. II. Lima, Lenilde Mérgia  
            Ribeiro. III. Título.


CDU 628.4(043)

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS**


**ABÍLIO JOSÉ PROCÓPIO QUEIROZ**

Dissertação aprovada em 27/08/2014 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:

  
Dra. Crislene Rodrigues da Silva Moraes  
(Orientadora)  
PPG-CEMat/UAEMA/UFCG

  
Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima  
(Coorientadora Externa)  
UATC/UFCG

  
Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro  
(Examinadora Interna)  
UAEC/UFCG

  
Dr. Valderi Duarte Leite  
(Examinador Externo)  
DESA/UEPB

## **DEDICATÓRIA**

Às pessoas que, verdadeiramente, acreditam em mim e torcem por minhas conquistas,  
**DEDICO.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, o dom da vida, a saúde, a oportunidade de participar deste curso e as condições necessárias para que eu chegasse a tal momento com sabedoria.

Aos familiares, o investimento em minha carreira e a torcida.

Aos amigos e todos aqueles que contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse concluído.

À Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Moraes, a aceitação, mesmo sem me conhecer, do convite para me orientar e a dedicação, a paciência e a atenção como professora e amiga.

À Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima, o grande empenho e a atenção como co-orientadora e amiga.

À Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, o aval para que eu trabalhasse junto ao Grupo de Geotecnia Ambiental, a disponibilização de toda estrutura do Laboratório de Geotecnia Ambiental para realização das atividades e a aceitação do convite para examinar este trabalho.

Ao Prof. Dr. Valderi Duarte Leite, a aceitação do convite para examinar este trabalho e a atenção como professor e amigo.

Aos professores Dr. Walman Benício de Castro, Dr. José Jefferson da S. Nascimento, Dr. Heber C. Ferreira, Dra. Laura H. de Carvalho, Dra. Ana Maria Segadães e Dra. Lisiane N. de Lima Santana, por terem, assim como Crislene, ministrado as disciplinas que compuseram meu currículo no mestrado.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, nas pessoas do Coordenador Prof. Dr. Gelmires de A. Neves e da Secretária Márcia Lima, a credibilidade, o apoio e a presteza nas demandas.

À turma do programa, da qual fiz parte, os momentos de aprendizado e descontração.

À colega Libânia, a força dada no desenvolvimento da pesquisa dentro do GGA.

Aos colegas Francisco e Josué, o apoio impagável na realização dos ensaios.

De coração, muito obrigado!

***“Você sai em desvantagem se você não tem fé.”***

*(O Rappa)*



## **VITAE**

- Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela UEPB (2011).
- Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFCG (2014).

# ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

## RESUMO

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, atualmente feito de forma errônea na maior parte das cidades brasileiras, acelerando a degradação do meio ambiente, e a busca por fontes alternativas de energia, para suprimento da crescente demanda, são problemáticas atualmente discutidas e que precisam de soluções urgentes. Este estudo identifica características físico-químicas de RSU, depositados em biorreator que simula as condições de um aterro sanitário, e avalia a possibilidade de utilização de um material que ainda é descartado como combustível para geração de energia. O objetivo geral foi avaliar a degradação e o poder calorífico de resíduos sólidos urbanos. As amostras analisadas por FTIR, DRX, TG e DSC foram coletadas em lisímetro construído na Universidade Federal de Campina Grande e preenchido de RSU previamente caracterizados. Os ensaios de FTIR indicaram a predominância orgânica dos materiais presentes nas amostras de RSU. Pelos difratogramas de raios-X o principal pico e comum a todas amostras foi de quartzo, justificando a presença do solo de recobrimento das amostras. As amostras de RSU apresentaram baixa estabilidade térmica, ocorrendo degradação entre a temperatura ambiente e 1000 °C, sendo visível e aceitável afirmar que ocorrem em cinco etapas de perda associadas à volatilização dos solventes (água e álcoois), à queima de celulose, borracha natural, matéria orgânica putrescível e materiais plásticos, bem como dos óxidos formados durante o processo. Pelas curvas DSC foram identificadas uma reação endotérmica, associada à primeira perda de massa, e quatro reações, duas endotérmicas e duas exotérmicas, ligadas às perdas da degradação dos componentes orgânicos. Os 348.402 kg/dia de RSU produzidos em Campina Grande, amostrados pela massa do biorreator, possuem um poder calorífico médio de 3.744,86 kcal/kg e poderiam ser gerados 1.518.551,40 kW.h/dia de energia térmica ou 303.710,28 kW.h/dia de energia elétrica, com eficiência de conversão de 20%.

## ANALYSIS OF DEGRADATION AND CALORIFIC VALUE MUNICIPAL SOLID WASTE

### ABSTRACT

The management of municipal solid waste, currently done wrongly in most Brazilian cities, accelerating the degradation of the environment, and the search for alternative energy sources to supply the growing demand, are currently discussed and problems that need solutions urgent. This study identifies physical and chemical characteristics of MSW deposited in bioreactor that simulates the conditions of a landfill site, and evaluates the possibility of using a material that is still dismissed as fuel for power generation. The overall objective was to evaluate the degradation and the calorific value of municipal solid waste. The samples analyzed by FTIR, XRD, TG and DSC were collected in lysimeter constructed at the Federal University of Campina Grande and filled MSW previously characterized. FTIR tests indicated a predominance of the organic materials present in samples of MSW. By X-ray diffraction main peak and common to all samples was quartz, which explains the presence of the soil cover of the samples. MSW samples had poor thermal stability, degradation occurring between room temperature and 1000 °C, being visible and acceptable state that occurs in five steps loss associated volatilization of the solvents (water and alcohol), the combustion of cellulose, natural rubber, putrescible organic matter and plastics, as well as the oxides formed during the process. DSC curves for an endothermic reaction associated with the first weight loss and four reactions, two endothermic and exothermic two linked to the loss of the degradation of the organic components have been identified. The 348,402 kg/day of USW produced in Campina Grande, sampled by mass of the bioreactor have an average calorific value of 3,744.86 kcal/kg, and could be generated 1,518,551.40 kW.h/day of thermal energy or 303,710. 28 kW.h/day of electricity, with conversion efficiency of 20%.

## PUBLICAÇÕES

– QUEIROZ, A. J. P.; MORAIS, C. R. da S.; LIMA, L. M. R. de. **Análise da degradação e do poder calorífico de resíduos sólidos urbanos.** In: Revista Eletrônica de Materiais e Processos (REMAP). Campina Grande – PB. Agosto, 2014.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Participação dos materiais no total de RSU coletado no Brasil .....	<b>28</b>
<b>Figura 2.</b> Biorreator construído em 2009 .....	<b>34</b>
<b>Figura 3.</b> Aspectos construtivos do lisímetro .....	<b>35</b>
<b>Figura 4.</b> Composição gravimétrica dos resíduos depositados no biorreator ..	<b>36</b>
<b>Figura 5.</b> Composição volumétrica dos RSU soltos depositados no biorreator	<b>36</b>
<b>Figura 6.</b> Composição volumétrica dos RSU compactados depositados no biorreator .....	<b>37</b>
<b>Figura 7.</b> Composição gravimétrica dos RSU de Campina Grande .....	<b>38</b>
<b>Figura 8.</b> Esquema de um aterro sanitário .....	<b>39</b>
<b>Figura 9.</b> Fluxograma da pirólise .....	<b>45</b>
<b>Figura 10.</b> Desenho de um equipamento de termogravimetria .....	<b>47</b>
<b>Figura 11.</b> Exemplo de curvas TG/DTG .....	<b>48</b>
<b>Figura 12.</b> Exemplo de curva DSC de um polímero – identificação de picos e reações .....	<b>50</b>
<b>Figura 13.</b> Exemplo de curva DSC .....	<b>51</b>
<b>Figura 14.</b> Fluxograma da metodologia empregada .....	<b>55</b>
<b>Figura 15.</b> Ferramenta para coleta de amostras de RSU .....	<b>56</b>
<b>Figura 16.</b> Moinho analítico Quimis Q298A .....	<b>57</b>
<b>Figura 17.</b> Difratorômetro de raios-X Shimadzu XDR-6000 .....	<b>59</b>
<b>Figura 18.</b> IR Spectrum 21 Shimadzu .....	<b>59</b>
<b>Figura 19.</b> TA SDT Q600 Simultaneous TGA/DSC .....	<b>60</b>
<b>Figura 20.</b> Espectrogramas das amostras de RSU do biorreator .....	<b>64</b>
<b>Figura 21.</b> Difratogramas das amostras de RSU do biorreator .....	<b>69</b>
<b>Figura 22.</b> Curvas TG/DTG da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>71</b>
<b>Figura 23.</b> Curvas TG/DTG da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>72</b>
<b>Figura 24.</b> Curvas TG/DTG da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>72</b>
<b>Figura 25.</b> Curvas TG/DTG da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica	

de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>73</b>
<b>Figura 26.</b> Curvas TG das amostras de RSU estudadas sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>73</b>
<b>Figura 27.</b> Curva DSC da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>77</b>
<b>Figura 28.</b> Curva DSC da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>77</b>
<b>Figura 29.</b> Curva DSC da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>78</b>
<b>Figura 30.</b> Curva DSC da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>78</b>
<b>Figura 31.</b> Curvas DSC das amostras de RSU estudadas sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim .....	<b>79</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Características dos principais componentes dos RSU .....	<b>29</b>
<b>Tabela 2</b> – Componentes putrescíveis, recicláveis e combustíveis dos RSD	<b>33</b>
<b>Tabela 3</b> – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia .....	<b>40</b>
<b>Tabela 4</b> – Eficiência de conversão de energia pelas tecnologias .....	<b>41</b>
<b>Tabela 5</b> – Desvio de aterro esperado .....	<b>41</b>
<b>Tabela 6</b> – Classificação simplificada das modalidades de pirólise .....	<b>44</b>
<b>Tabela 7</b> – Efeitos da temperatura na pirólise de RSU .....	<b>44</b>
<b>Tabela 8</b> – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia .....	<b>44</b>
<b>Tabela 9</b> – Poder calorífico inferior (PCI) de alguns resíduos sólidos urbanos	<b>46</b>
<b>Tabela 10</b> – Poder calorífico de materiais encontrados em RSU .....	<b>46</b>
<b>Tabela 11</b> – Cronograma de coleta das amostras .....	<b>56</b>
<b>Tabela 12</b> – Grupos funcionais identificados pelos estiramentos característicos nos espectrogramas das amostras de RSU .....	<b>65</b>
<b>Tabela 13</b> – Dados dos difratogramas das amostras de RSU .....	<b>70</b>
<b>Tabela 14</b> – Dados de decomposição térmica de RSU das curvas obtidas sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/min .....	<b>74</b>
<b>Tabela 15</b> – Dados observados para etapas de perdas ocorridas com os RSU nos ensaios .....	<b>75</b>
<b>Tabela 16</b> – Dados de decomposição térmica de RSU das curvas obtidas sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/min .....	<b>79</b>
<b>Tabela 17</b> – Dados das análises das curvas DSC dos RSU obtidas sob atmosfera dinâmica de N <sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/min	<b>80</b>
<b>Tabela 18</b> – Produção diária de RSU estimada para Campina Grande .....	<b>82</b>

## ABREVIATURAS E SIGLAS

$\Delta T$	Diferença de temperatura
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$^{\circ}C/min$	Graus Celsius por minuto
$\mu V$	Microvolts
$\mu V/mg$	Microvolts por miligrama
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
B.E.M.	Biomassa-Energia-Materiais
Certibio	Certificação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste
CG	Campina Grande
$CH_4$	Metano
CO	Monóxido de carbono
$CO_2$	Dióxido de carbono
DEFRA	Department for Environment Food & Rural Affairs
DRX	Difração de Raios-X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria Diferencial
EESI	Environmental and Energy Study Institute
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	Etileno-vinil acetato
FTIR	Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GDL	Gás do Lixo
GGA	Grupo de Geotecnia Ambiental
g/mol	Gramas por mol
GW.h	Gigawatt-hora
$H_2$	Hidrogênio
$H_2O$	Água
Hab./dom	Habitantes por domicílio
hab./km <sup>2</sup>	habitantes por quilômetro quadrado
HC	Hidrocarboneto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IQ	Instituto de Química



IV	Infravermelho
J	Joules
J/g	Joules por grama
KBr	Brometo de potássio
kcal	Quilocaloria
kcal/kg	Quilocaloria por quilograma
kg/dia	Quilograma por dia
kg/habitante/dia	Quilograma por habitante por dia
km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
kW.h	Quilowatt-hora
kW.h/ton	Quilowatt-hora por dia
kW.h/ton	Quilowatt-hora por tonelada
LABCOM	Laboratório de Conversão Termoquímica
LACOM	Laboratório de Combustíveis e Materiais
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
mf	massa final
mg	Miligrama
mi	massa inicial
ml/min	Mililitros por minuto
MMf	massa molecular final
MMi	massa molecular inicial
MOP	Matéria orgânica putrescível
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NUFOR	Núcleo de Formação Contínua
NBR	Norma Brasileira
O <sub>2</sub>	Oxigênio
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Polietileno tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PC	Poder calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PI	Ponto de ignição
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional do Saneamento Básico
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RCC	Resíduos da construção civil
RSD	Resíduos Sólidos Domésticos
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SMA	Secretaria do Meio Ambiente

SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
Tf	Temperatura final
TG	Termogravimetria
Ti	Temperatura inicial
Tp	Temperatura de pico
ton/ano	Toneladas por ano
ton/mês	Toneladas por mês
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPB	Universidade Federal da Paraíba

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	20
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
1.1 OBJETIVOS .....	23
1.1.1 Objetivo geral .....	23
1.1.2 Objetivos específicos .....	23
<b>Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	24
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	25
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	25
2.1.1 Constituição dos RSU .....	25
2.1.2 Classificação dos RSU .....	28
2.1.3 Produção ‘per capita’ de RSU .....	28
2.1.4 Resíduos Orgânicos .....	30
2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RSU DE CAMPINA GRANDE .....	31
2.3 UNIDADES DE DEPOSIÇÃO DE RSU .....	37
2.4 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RSU .....	38
2.4.1 Incineração .....	40
2.4.2 Pirólise .....	41
2.5 RSU E SEU POTENCIAL ENERGÉTICO .....	43
2.6 TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS RSU .....	45
2.6.1 Termogravimetria e termogravimetria derivada .....	45
2.6.2 Calorimetria exploratória diferencial .....	47
2.6.3 Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) .....	49
2.6.4 Difração de Raios-X (DRX) .....	50
<b>Capítulo 3 – MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	52
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	53
3.1 COLETA E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS .....	54
3.2 CARACTERIZAÇÃO POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA	

REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X .....	56
3.3 ENSAIOS POR TERMOGRAVIMETRIA E CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL .....	58
3.3.1 Determinação da estabilidade térmica das amostras de RSU .....	59
3.3.2 Estimativa do poder calorífico dos RSU de Campina Grande .....	59
<b>Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS RSU .....	61
4.1.1 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier .....	61
4.1.2 Difração de raios-X .....	65
4.2 ANÁLISES TÉRMICAS .....	69
4.2.1 Estabilidade térmica das amostras de RSU por Termogravimetria e termogravimetria derivada .....	69
4.2.2 Determinação do poder calorífico das amostras de RSU por Calorimetria Exploratória Diferencial .....	74
4.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DIÁRIA E DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RSU DE CAMPINA GRANDE (PB) .....	79
<b>Capítulo 5 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>82</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>83</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES .....	84
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE A – Espectrogramas das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE B – Difrátogramas das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator .....</b>	<b>101</b>

<b>APÊNDICE C – Curvas TG/DTG das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE D – Curvas DSC das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator .....</b>	<b>117</b>

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

*Capítulo* **1**  
**Introdução**

A large, faint recycling symbol (three chasing arrows forming a triangle) is positioned in the background of the chapter title area.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O conjunto dos problemas relativos aos resíduos sólidos existe como algo de solução complicada entre as ações do saneamento ambiental, com mais precisão do saneamento básico, em todo mundo, porém destacadamente em países emergentes como o Brasil.

Gerar resíduos sólidos urbanos (RSU) é inevitável, caracterizando-se esta ação por captar recursos naturais, produzir bens materiais e descartá-los, após utilizados, resultando em problemas sociais, econômicos e ambientais. Com isso, se fazem ausentes e necessárias ações de educação ambiental visando a conscientização para uma redução na produção, conseqüentemente, respeitando a capacidade de exploração de recursos e a resistência à deposição do material no meio ambiente.

De acordo com pesquisas realizadas pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos (ABRELPE), “a geração de RSU no Brasil registrou um crescimento de 1,3%, de 2011 para 2012, índice percentual que é superior à taxa de crescimento populacional urbano do país, que foi de 0,9% no mesmo período” (ABRELPE, 2013).

Os aterros sanitários consistem na técnica mais utilizada para disposição de RSU em nível nacional e mundial, principalmente pela possibilidade de controle de poluição e simplicidade de operação que fornecem. Os lisímetros, por sua vez, são biorreatores que simulam as condições de um aterro sanitário (RIBEIRO, 2012).

O município de Campina Grande está localizado na Mesorregião Agreste, Microrregião Campina Grande do Estado da Paraíba, dentro da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, sub-bacia do Médio Paraíba (AESAs, 2005). Sua área é de 594,182 km<sup>2</sup> representando 1,0996% do estado, 0,0399% da Região e 0,0073% de todo o território brasileiro (BELTRÃO et al., 2005).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município teve sua população estimada em 400.002 habitantes no ano de 2012, apresentando uma densidade demográfica de 656,4 hab./km<sup>2</sup> (IBGE,

---

2014). O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,720, considerado alto, é o terceiro do estado (PNUD, 2014).

A totalidade dos RSU coletados em Campina Grande é, atualmente, destinada ao aterro sanitário instalado na cidade de Puxinanã (PB), que recebe, segundo Alves et al. (2013), cerca de 400.000 ton/mês.

Caracterizar quimicamente um conjunto de materiais como os RSU é indispensável para conhecimento e geração de indícios sobre o seu comportamento em determinadas condições, permitindo, ainda, estudar formas de controle ou minimização de seus impactos no ambiente.

A avaliação da degradação e da estabilidade térmica dos RSU produzidos em um município, depositados em um biorreator que simula as condições do aterro sanitário que recebe o material sólido por este descartado, fornece dados importantíssimos a respeito do comportamento desse material e a influência da temperatura e suas variações nesta unidade física, permitindo indicar caminhos para melhorias operacionais, de manutenção e de projeto.

O estudo do poder calorífico (PC) dos RSU permite a análise da viabilidade da utilização desse material como fonte energética, conseqüentemente, afirmando o desvio desse material de aterros para plantas de geração de energia e os inúmeros benefícios pelo ganho de uma matriz energética, redução de impactos ambientais e menor requisição de áreas para construção de aterros.

A geração de energia a partir de RSU poderá ser considerada uma etapa do gerenciamento integrado dos RSU, desde que sejam indicadas as melhores formas e suas vantagens sobre a disposição nos aterros sanitários, que, mesmo considerada a forma mais aceita atualmente, ainda não é realidade comum a todas as cidades.

Na cidade de Campina Grande (PB), o atual panorama indica a necessidade urgente de aplicação eficaz de técnicas de gerenciamento de RSU, bem como de potencialização de alternativas de destinação ou tratamento, pois, segundo Dantas (2013), condições de queima a céu aberto no aterro sanitário de Puxinanã (PB) e presença de unidades habitacionais, neste espaço, o definem condições de funcionamento características de lixões.



---

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a degradação e o poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos produzidos na cidade de Campina Grande (PB), depositados em biorreator que simula as condições de um aterro sanitário.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar e preparar amostras de RSU do biorreator localizado na UFCG que representem o material gerado e coletado na cidade de Campina Grande e depositado em um aterro sanitário.
- Caracterizar, utilizando as técnicas físico-químicas de Difração de raios-X (DRX) e Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), as amostras de RSU, de acordo com as normas vigentes.
- Determinar a estabilidade térmica das amostras de RSU utilizando os métodos termoanalíticos Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).
- Estimar o poder calorífico dos RSU com base nos resultados da Calorimetria Exploratória Diferencial.

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

*Capítulo* **2**

**Fundamentação  
teórica**

---

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a norma brasileira (NBR) 10004 (2004), resíduos sólidos são:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 2004).

Outra definição consistente é apresentada no texto da Lei 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), entre outros, e define resíduos sólidos como:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010).

#### 2.1.1 Constituição dos RSU

Os RSU são constituídos por diferentes materiais, dotados de valor mercantil, na fase do ciclo de vida entre sua utilização pela população e a usina de reciclagem. Possuem significativa importância na busca da sociedade moderna pela sustentabilidade ambiental, já que esses, ao invés de serem lançados no meio ambiente, são reintroduzidos no ciclo produtivo como matéria prima (ABRELPE, 2012).

A composição dos RSU de um local depende de vários aspectos socioeconômicos, culturais e geográficos deste como, por exemplo, capacidade aquisitiva, atividade econômica predominante, apresentação ou não de indústrias e costumes de vida.

---

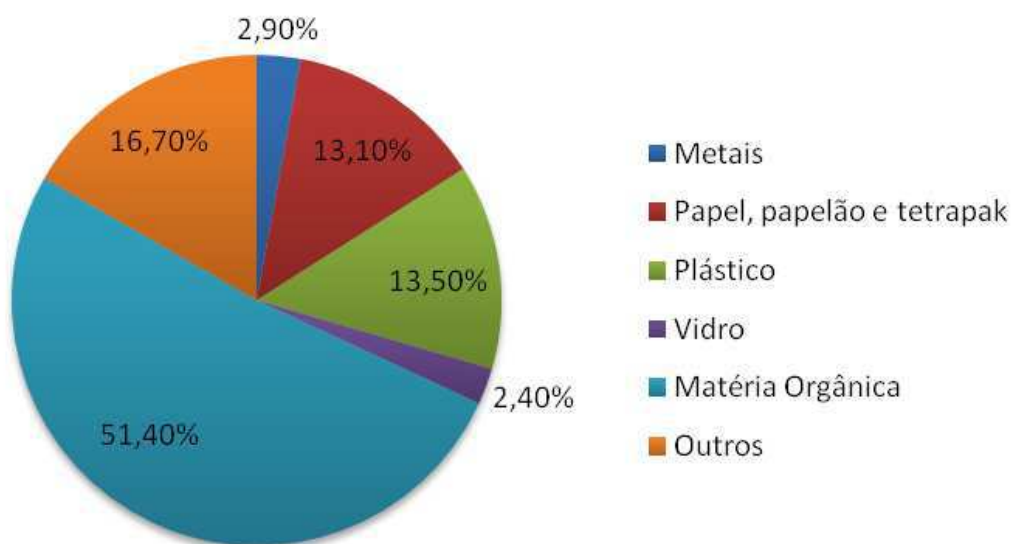
Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) (2012), "a composição gravimétrica dos RSU expressa o percentual de cada componente em relação ao peso total desses resíduos" (FEAM, 2012).

Os RSU de cidades de pequeno porte são normalmente de origem doméstica, comercial, de serviços de saúde, da construção civil e de algum seguimento industrial que exista.

Tipicamente, as frações de resíduos sólidos domésticos (RSD) são: plástico, papel e papelão, metal, vidro, matéria orgânica e uma fração denominada de 'outros', composta por tipos de materiais que não se enquadram nas categorias citadas e não são reaproveitados ou reciclados como, por exemplo, materiais inertes. Essa composição é variável nos resíduos de origem comercial, pois, claramente, depende do tipo de atividade comercial que ali está instalada (RIBEIRO, 2012).

A participação de cada fração na composição gravimétrica dos RSU gerados no Brasil é mostrada na Figura 1.

**Figura 1.** Participação dos materiais no total de RSU coletado no Brasil.



Fonte: ABRELPE, 2012.

Algumas das principais características dos materiais são apresentadas na Tabela 1, enunciadas por Caldas (2011), de forma que o total se mostra

---

mais detalhado que o fracionamento apresentado na Figura 1 de ABRELPE (2012).

**Tabela 1 – Características dos principais componentes dos RSU.**

<b>COMPONENTE</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Resíduos alimentares	Muito úmido, putrescível, rapidamente degradável, compressível
Papel, trapos	Seco a úmido, compressível, degradável, inflamável
Resíduos de jardinagem	Úmido, putrescível, degradável, inflamável
Plástico	Seco, compressível, pouco degradável, inflamável
Metais ocos	Seco, corrosível, pode ser amassado
Metais maciços	Seco, fracamente corrosível, rígido
Borracha	Seco, inflamável, compressível, não pode ser amassado, pouco degradável
Vidro	Seco, pode ser amassado, pouco degradável
Madeiras, espumas	Seco, pode ser amassado, compressível, degradável, inflamável
Entulho de construção	Úmido, pode ser amassado, erodível, pouco degradável
Cinzas, pó	Úmido, possui características de solo, compressível, pode ser ativo quimicamente e parcialmente solúvel

Fonte: CALDAS, 2011.

Em empreendimentos que oferecem serviços de saúde, são produzidos os chamados resíduos de serviços de saúde (RSS) que podem ser qualificados como perigosos ou não perigosos. Nesses resíduos ocorrem também resíduos comuns, como aqueles classificados como resíduos domésticos, gerados em cozinha, refeitório e setor comercial, somando-se a estes os materiais perfurocortantes e outros com potencial de infecção ou ação etiológica química (FONSECA, 2009). A periculosidade dos resíduos não é particularidade dos RSS, pois a totalidade dos RSU de Campina Grande é considerada perigosa (SILVA, 2012).

Das atividades de construção civil vem uma carga de resíduos sólidos que podem ser reaproveitados e reciclados, são os resíduos da construção civil (RCC). A maior parte é constituída por restos de tijolos e concreto, apresentando também as frações compostas por gesso, madeira e metais e, em menor quantidade, papéis e plásticos, podendo aparecer ainda quantidades relativamente imperceptíveis de algum outro material (SMA, 2012).

---

### 2.1.2 Classificação dos RSU

Os resíduos sólidos são classificados, segundo a NBR 10004/04, pela “identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido” (ABNT, 2004).

Pela norma, a classificação dos resíduos sólidos se dá em duas classes, denominadas "resíduos classe I – Perigosos" e "resíduos classe II – Não perigosos". Há, para os não perigosos, uma subclassificação em "resíduos classe II A – Não inertes" e "resíduos classe II B – Inertes" (ABNT, 2004).

O resíduo é enquadrado na classe I quando apresentar periculosidade decorrente de uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, apresentando riscos de diversos potenciais à saúde pública. Exemplificando, um material que assim se caracteriza é o de origem hospitalar.

De maneira grosseira, os resíduos que se enquadram na classe II são aqueles que não possuem ao menos uma das características que conferem periculosidade.

Para enquadramento na classe II A, as propriedades observadas no material são biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água. Um exemplo simples que pode ser utilizado é o material orgânico putrescível, por ser um material com alto potencial de biodegradabilidade.

Na classe II B estão os materiais inertes, necessitando-se de ensaio para confirmação dessa característica. Um material é “inerte” quando “inativo”, ou seja, não reagir em contato com outros tipos de materiais (BUENO, 2007).

### 2.1.3 Produção ‘per capita’ de RSU

A quantidade de resíduos sólidos que uma pessoa gera em certa unidade de tempo denomina-se de produção *per capita* e é geralmente dada em kg/habitante/dia. Essa medida é muito importante em trabalhos

---

relacionados a resíduos sólidos urbanos, pois, a partir dela, pode-se dimensionar algum problema decorrente desses materiais, bem como utilizá-la no projeto de um sistema de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos, dando suporte para o dimensionamento da(s) unidade(s) de tratamento que deve ser dado aos resíduos (ABRELPE, 2012).

A fim de obter o valor da produção *per capita*, deve-se fazer uma série de análises diárias quantitativas dos resíduos sólidos produzidos na localidade que se deseja estudar, e cruzar a média dos resultados com o número de moradores desta. O resultado depende das características socioeconômicas e culturais da população e da localidade, comumente no mesmo sentido da economia local. Essa relação é importante quando se precisa desses dados para realização de trabalhos e não são feitas as análises, pois são válidos dados da região onde a localidade a ser estudada se encontra, considerando as similaridades econômicas, sociais, climáticas, culturais e geográficas.

Segundo Xará (2009), a produção global de RSU é de aproximadamente 500.000 ton/ano o que corresponde a 1,4 kg/habitante/dia.

Os países que mais produzem RSU no mundo são China e Estados Unidos, e, juntos, são responsáveis por cerca da metade do total, mas tratando os números em termos de coleta, Japão e Canadá coletam a totalidade dos RSU produzidos por seus habitantes, destacando, pela importância econômica, que Estados Unidos têm maior índice de coleta que a China – 95% a 50%.

Em relação à geração *per capita*, os maiores índices são de EUA, Canadá, Noruega, Dinamarca e Suíça, e estes números são muito expressivos, pois o menor desses é de cerca de 2 kg/habitante/dia, índices bem maiores que a média mundial (SALOMAO, 2011).

A destinação de RSU, um dos mais importantes aspectos, tem números que exigem uma observação minuciosa, pois poucos países destinam quantidades próximas da totalidade corretamente, como para aterros sanitários, por exemplo.

A reciclagem dos materiais que compõem os RSU já é realidade em vários países desenvolvidos e em desenvolvimento. O aproveitamento energético desses, por sua vez, é algo ainda em estágio de expansão.

---

Para mudar a realidade, realizar melhor gestão dos RSU e assim preservar os recursos naturais, deve haver uma aceleração do crescimento do mercado mundial de RSU, pois apenas em países desenvolvidos como Estados Unidos, Japão e China, como também na União Europeia, este movimenta uma quantidade considerável de recursos: 59, 41, 35 e 49 bilhões de dólares por ano, respectivamente (SILVA Filho, 2010).

No Brasil, nos anos de 2012 e 2013 a geração de RSU *per capita* foi de 378,505 e 379,965 kg/habitante/ano, respectivamente, tendo sido coletados 341,275 e 343,564 kg/habitante/ano – 90,16% e 90,39% do produzido (ABRELPE, 2014).

Ainda de acordo com a ABRELPE, na região nordeste a produção *per capita* foi de 0,959 kg/habitante/dia em 2011 e de 0,958 kg/habitante/dia no ano de 2012, sendo a *per capita* de coleta nesses anos de 0,742 kg/habitante/dia e 0,750 kg/habitante/dia, respectivamente. No estado da Paraíba a geração é de 0,871 kg/habitante/dia de RSU (ABRELPE, 2014).

Na realidade estudada, em Campina Grande, segundo Leite (2008a) são produzidos cerca de 0,540 kg/habitante/dia, aproximadamente, 210 toneladas diariamente.

#### **2.1.4 Resíduos Orgânicos**

Dos RSU, a maior parte — superior à metade — é constituída pelos materiais de origem orgânica, que são caracterizados por, na sua composição química, serem formados basicamente por uma cadeia de carbono e hidrogênio e um agregado de radicais em sua estrutura (p.e.: enxofre, fósforo, silício, boro e halogênios), de origem sintética ou natural (CALDAS, 2011).

Matéria orgânica putrescível (MOP), papel, papelão, tetra pak e plástico são, grosseiramente, a parte dos RSU destacados como de origem orgânica. Dessa forma, esses resíduos podem receber diversos tipos de tratamento distintos, pois alguns possuem características de reciclagem e outros não. Mesmo sendo parte reciclável, o aproveitamento para geração de energia pode ser a alternativa mais viável para o material supracitado (FEAM, 2012).



O percentual de matéria orgânica putrescível nos RSU é maior quando a população produtora for de renda menor (HOORNWEG, 2000, apud CABRAL, 2012).

A caracterização gravimétrica específica dos resíduos de origem orgânica deve ser seguida de uma descrição que defina cada fração, devido à inexistência de normas nacionais nesse âmbito (FEAM, 2012). Dos resíduos sólidos domiciliares — que caracterizam a quase totalidade dos RSU de pequenos conglomerados urbanos — ocorrem os resíduos mostrados na Tabela 2, onde são apresentadas as principais características que podem definir a destinação e/ou tratamento destes.

**Tabela 2** – Componentes putrescíveis, recicláveis e combustíveis dos RSD.

COMPONENTE	PUTRESCÍVEL	REICLÁVEL	COMBUSTÍVEL
Borracha		X	X
Couro	X		X
Madeira	X	X	X
Matéria Orgânica	X	X	X
Metais ferrosos		X	
Metais não ferrosos		X	
Papel	X	X	X
Papelão	X	X	X
Plástico duro		X	X
Plástico filme		X	X
Trapos		X	X
Vidro		X	
Outros materiais			

Fonte: GOLÇALVES, 2007.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RSU DE CAMPINA GRANDE

Os RSU de Campina Grande foram caracterizados, em termos gravimétricos e volumétricos, pela equipe de pesquisadores do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), apoiada em normas técnicas e métodos estatísticos, em outubro de 2009, em espaço ao lado da área que abriga o biorreator (Figura 2) que simula

---

as condições de um aterro sanitário preenchido com esse material após a caracterização.

**Figura 2.** Biorreator construído em 2009.



Fonte: Do Autor (2014).

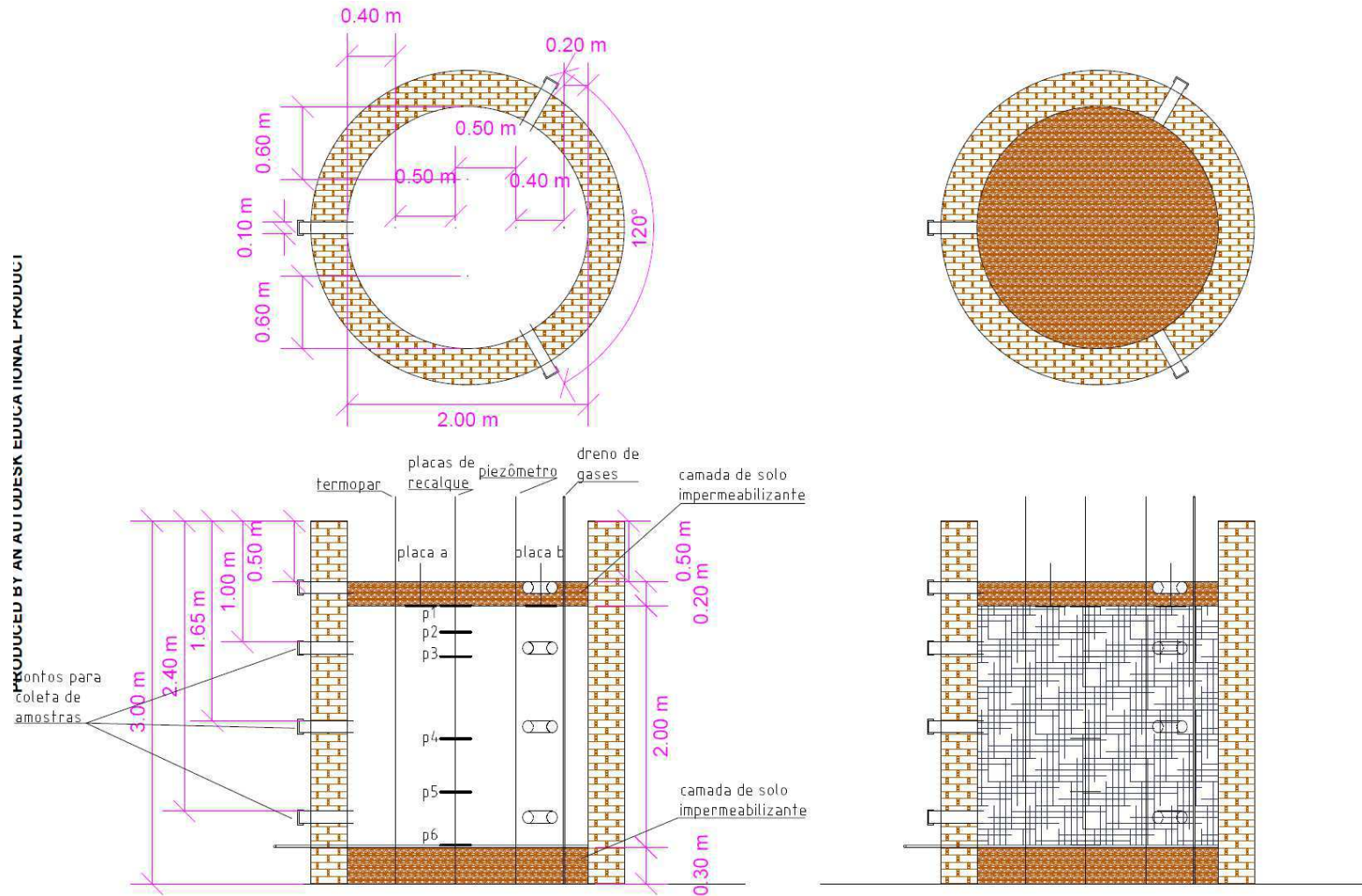
Essa unidade, de forma cilíndrica com 2 metros de diâmetro (interno) e 3 metros de altura, foi construída em alvenaria de 30 centímetros com tijolos manuais (maciços), emboço, reboco e fundo de argamassa com areia e cimento (RIBEIRO, 2012).

Foram colocadas duas camadas de solo impermeabilizante, no fundo, como base, e sobre o material, recobrimo-o, com, respectivamente, 30 e 20 centímetros de espessura, um dreno de lixiviado no fundo, um dreno de gás na vertical e aberturas para coleta de resíduos nas camadas inferior, intermediária e superior (RIBEIRO, 2012; SILVA, 2012).

A instrumentação conta com sensores de temperatura (termopares), medidores do nível de água (piezômetros) e placas para medição de recalque sistematicamente instalados (SILVA, 2012).

Na Figura 3 são exibidos os aspectos construtivos do biorreator, com planta baixa e corte da parte estrutural e esboço da instrumentação de monitoramento e coleta.

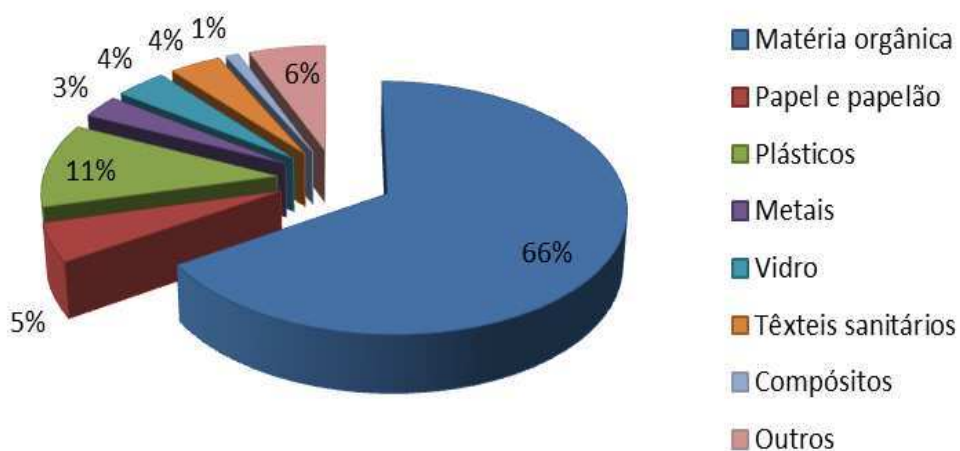
Figura 3. Aspectos construtivos do lisímetro.



Fonte: RIBEIRO, 2012; SILVA, 2012.

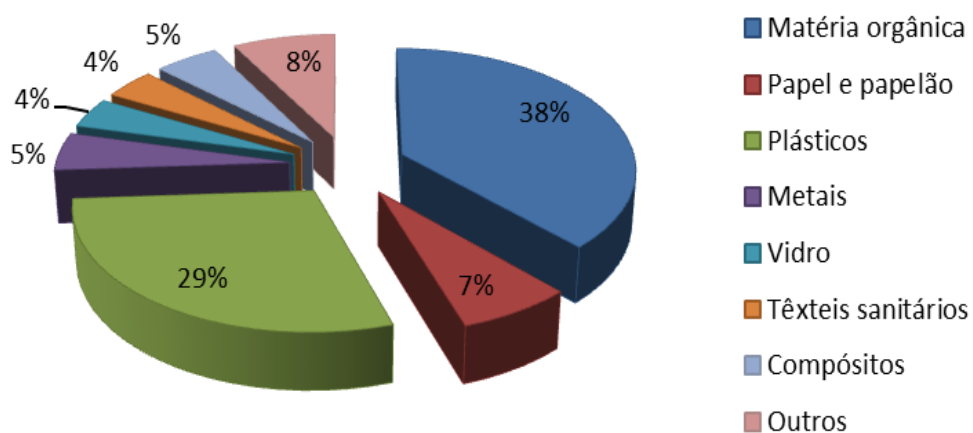
As Figuras 4, 5 e 6 exibem, respectivamente, os resultados apresentados por Ribeiro (2012) e Silva (2012) de composição gravimétrica, volumétrica com resíduos soltos e volumétrica com resíduos compactados, sendo, esse conjunto, a representação física do material cotidianamente coletado e descartado em Campina Grande.

**Figura 4.** Composição gravimétrica dos resíduos depositados no biorreator.



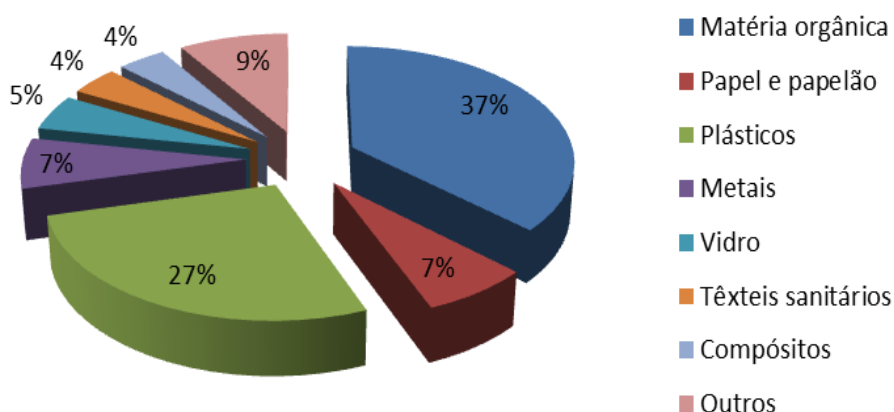
Fonte: RIBEIRO, 2012; SILVA, 2012.

**Figura 5.** Composição volumétrica dos RSU soltos postos no biorreator.



Fonte: RIBEIRO, 2012; SILVA, 2012.

**Figura 6.** Composição volumétrica dos RSU compactados postos no reator.



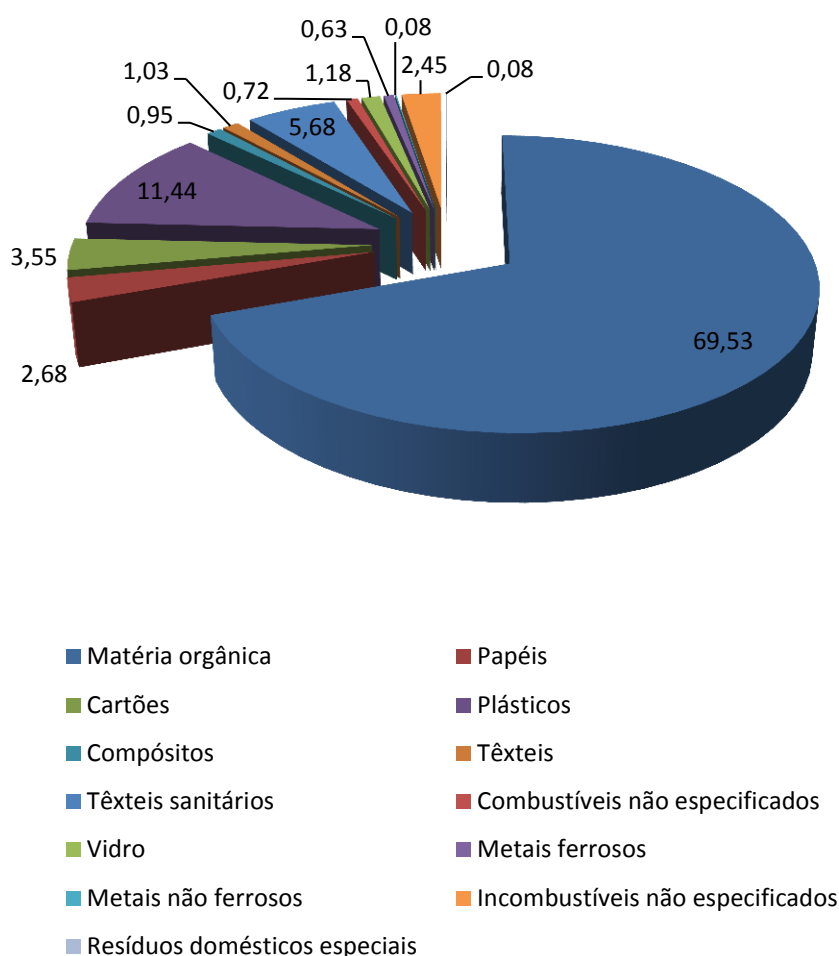
Fonte: RIBEIRO, 2012; SILVA, 2012.

Verifica-se a diferença na participação de cada fração na totalidade de acordo com o aspecto analisado. Se observado peso (Figura 4), a fração de matéria orgânica putrescível constituiu 2/3 do total, seguida de plásticos com 11% e demais frações, juntas, totalizando 23%.

A porcentagem em termos de volume foi estudada e os resultados apresentados na Figura 5 e na Figura 6, mostram, claramente, que a fração de matéria orgânica putrescível correspondeu a pouco mais de 1/3, de plásticos a quase 30% e de papel e papelão com 7%. Esses resultados permitem afirmar que a matéria orgânica, mesmo sendo a maior contribuinte em peso, ocupa o mesmo volume que plásticos e papel e papelão juntas, e que os resíduos de origem orgânica são os principais constituintes dos RSU coletados em 2009 em Campina Grande.

Como parâmetro para comparação, é apresentada a composição gravimétrica realizada por Garcez (2009) na Figura 7, tendo essa um maior número de frações de materiais, como subdivisões das frações de papel e papelão e metais, por exemplo, porém seguindo a tendência dos gráficos anteriores de aproximadamente 2/3 de matéria orgânica e 11% de materiais plásticos.

**Figura 7.** Composição gravimétrica dos RSU de Campina Grande.



Fonte: GARCEZ, 2009.

### 2.3 UNIDADES DE DEPOSIÇÃO DE RSU

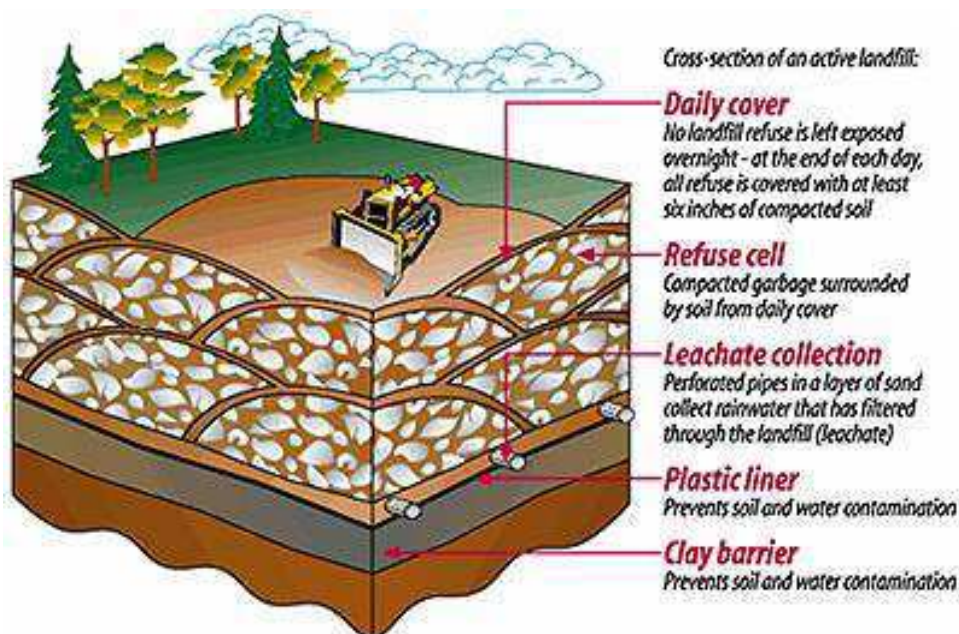
Entre os destinos mais prováveis dos RSU, no Brasil, dois (lixão e aterro sanitário) têm em comum apenas o local de deposição do material: o solo.

A Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (PNSB) de 2008 usa como definição de lixão ou vazadouro a céu aberto “Local utilizado para disposição do lixo, em bruto, sobre o terreno, sem qualquer cuidado ou técnica especial. O vazadouro a céu aberto caracteriza-se pela falta de medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública” (IBGE, 2010).

Para aterro sanitário, unidade de deposição ilustrada na Figura 8, a PNSB 2008 utiliza a definição:

“Instalação de destinação final dos resíduos sólidos urbanos através de sua adequada disposição no solo, sob controles técnico e operacional permanentes, de modo a que nem os resíduos, nem seus efluentes líquidos e gasosos, venham a causar danos à saúde pública e/ou ao meio ambiente. Para tanto, o aterro sanitário deverá ser localizado, projetado, instalado, operado e monitorado em conformidade com a legislação ambiental vigente e com as normas técnicas oficiais que regem essa matéria” (IBGE, 2010).

**Figura 8.** Esquema de um aterro sanitário.



Fonte: acessKENT, 2014.

Um aterro sanitário deve contar, pelo menos, com equipamentos de controle de poluição por subprodutos sólidos, líquidos e gasosos, como drenos de lixiviado, de gases, camadas de impermeabilização e cobertura do material (ALJARADIN e PERSSON, 2012).

Com base nas definições mencionadas, é perceptível que para o meio ambiente não há destinação final de RSU pior que um lixão, haja vista que a única ação realizada nesse local é o lançamento da carga de resíduos na forma em que foi coletado, sendo assim ponto de partida de diversos problemas ambientais e de saúde pública (MATTHEWS, 2006).

---

## 2.4 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RSU

Segundo Gonçalves (2007), o Brasil, atualmente, defronta-se com dois grandes problemas: a escassez de energia elétrica e a falta de áreas para disposição final dos resíduos. Existem tecnologias para resolução simultânea desses problemas baseadas em processos físicos, biológicos e térmicos com geração de energia a partir de RSU (E-RENEWABLES, 2007; FEAM, 2012).

A engenharia dispõe de uma série de técnicas no âmbito do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica (ABRELPE, 2012). Estas utilizam diferentes caminhos para chegar ao resultado, pois nem sempre o produto é a própria eletricidade e algumas plantas dão como resultado o biogás, havendo em comum, entre todas, a necessidade de coleta, tratamento e destinação correta dos subprodutos que, inevitavelmente, são gerados durante o processo (E-RENEWABLES, 2007; DEFRA, 2014).

Os métodos mais utilizados são: incineração, gaseificação, utilização do gás do lixo (GDL) ou gás de aterro sanitário, tecnologia biomassa-energia-materiais (B.E.M.) e a tecnologia de plasma, possuindo, cada um, suas particularidades em termos de vantagens e melhor adaptação para situação de cada local (E-RENEWABLES, 2007; EESI, 2009; ABRELPE, 2012). A Tabela 3 mostra as tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia por cada método.

**Tabela 3** – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia.

<b>MÉTODO</b>	<b>TECNOLOGIA</b>
<b>Físico</b>	Combustível derivado de resíduo
<b>Térmico</b>	Incineração Pirólise Gaseificação Tecnologia de plasma
<b>Biológico</b>	Fermentação Gás de aterro sanitário

Fonte: E-RENEWABLES, 2007.



---

A comparação entre o aproveitamento energético dos resíduos nas cinco tecnologias de utilização mais frequentes é apresentada na Tabela 4. A Tabela 5 mostra a expectativa da percentagem de RSU desviada de aterros pelo método.

**Tabela 4** – Eficiência de conversão de energia pelas tecnologias.

<b>TECNOLOGIA</b>	<b>kWh/ton DE RESÍDUO</b>
<b>Gás de aterro sanitário</b>	41 – 84
<b>Incineração</b>	470 – 930
<b>Pirólise</b>	450 – 530
<b>Gaseificação</b>	400 – 650
<b>Tecnologia de Plasma</b>	400 – 1.250

Fonte: EESI, 2009.

**Tabela 5** – Desvio de aterro esperado.

<b>TECNOLOGIA</b>	<b>% DE PESO</b>
<b>Gás de aterro sanitário</b>	0
<b>Incineração</b>	75*
<b>Pirólise</b>	72 – 95
<b>Gaseificação</b>	94 – 100
<b>Tecnologia de plasma</b>	95 – 100

\*90% de volume

Fonte: EESI, 2009.

Pode-se destacar, da Tabela 4, que, observando-se os índices mínimos das faixas de conversão de resíduos em energia, a incineração é a tecnologia com o mais alto, gerando no mínimo 470 kWh/ton. Quando se analisa a redução da quantidade de material destinado a aterros, vê-se, na Tabela 5, que destinar os resíduos a geração de energia por gaseificação ou tecnologia de plasma é mais vantajoso, pois essas tecnologias utilizam cerca da totalidade dos RSU.

---

### 2.4.1 Incineração

A incineração, técnica conhecida também como “combustão” ou “queima de massa” é, basicamente, a queima controlada dos RSU (combustível) para geração de calor (energia térmica), a temperaturas entre 600 e 1100 °C, que é fornecido à água para geração de vapor (SCHALCH et al., 2002; EESI, 2009). Esse vapor pode ser utilizado para produzir energia em sistemas termoelétricos ou aproveitado diretamente para outros fins industriais (EESI, 2009).

Pode-se trabalhar com diversos materiais dos RSU, sendo preferível a queima dos que possuem maior PC, como diversos tipos de plásticos e papéis, bem como matéria orgânica (CARVALHO, 2013). As demais frações dos RSU devem ser destinadas às usinas de reciclagem, devido ao seu potencial de reciclagem, ao valor econômico e à inviabilidade para “queima” devido às altas temperaturas requeridas (FEAM, 2012).

Segundo a FEAM (2012), os principais resíduos que têm sido incinerados são: RSU, industrial, perigoso, de serviços de saúde e lodo de esgoto. Para os resíduos de serviços de saúde (RSS), o tratamento térmico por incineração é uma das formas adequadas de destinação final. Entretanto, considerando o reduzido volume em relação aos RSU, tem sido adotada, em alguns países, a destinação destes para incineração conjunta, pois os sistemas de tratamento de gases adotados para RSU permitem atender aos padrões de emissão (DEFRA, 2014). Há, entretanto, necessidade de prever local específico nas instalações para recebimento e manipulação dos RSS, antes da sua destinação ao forno de incineração.

O método apresenta como vantagens: geração de energia térmica, consumo contínuo de RSU, necessidade de áreas reduzidas para instalação, não geração de ruídos e odores e aumento de vida útil do aterro por só destinar a ele os resíduos do processo (cerca de 10%) (SCHALCH et al., 2002; COSTA, 2006). Segundo Brasil (2012), usinas a incineração podem gerar entre 450 e 700 kW.h/ton de RSU. Investimento elevado na instalação e altos custos de operação e manutenção são as desvantagens principais da incineração.

---

Este método é o mais utilizado no que diz respeito à geração de energia, seja térmica ou cogeração de energia elétrica. Além do aspecto energético, no qual trabalha com geração média de 3585 kcal/kg e eficiência global de 65%, a redução do percentual de massa em cerca de 90% é observada como muito positiva ambientalmente (EESI, 2009; EPE, 2008 apud CORNIERI, 2011).

Deve ser destacado que o processo gera resíduos que necessitam de tratamento, tais como: cinzas, metais ferrosos e não ferrosos, lixiviado, escórias e gases (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, principalmente) (SCHALCH et al., 2002; ABRELPE, 2012; FEAM, 2012).

Genericamente, a planta de uma usina de incineração de RSU deve ser composta pelas unidades: recepção e carregamento, tremonha de alimentação, pré-secagem, câmara de combustão, grelhas, extração de escórias e cinzas, dispositivos para recuperação de energia, filtragem e tratamento dos gases e dispositivos de tiragem de gases (SCHALCH et al., 2002).

## **2.4.2 Pirólise**

Segundo a FEAM (2012), a pirólise é um processo de decomposição térmica, na ausência de oxigênio, por fonte externa de calor, que converte a matéria orgânica em diversos subprodutos. Os principais subprodutos são: CH<sub>4</sub>, HC complexos, H<sub>2</sub> e CO, como gases; lixiviado, principal líquido e resíduos sólidos da decomposição (E-RENEWABLES, 2007).

A pirólise diferencia-se da gaseificação por dois fatores: faixa de temperatura de processo menor, em que a máxima da pirólise (800 °C) é a mínima da gaseificação e, principalmente, a atmosfera com alguma quantidade de oxigênio na gaseificação, o que não ocorre na pirólise (REICHERT, 2009).

Da parte sólida dos subprodutos do processo tem-se um tipo de carvão que pode ser utilizado como fertilizante ou como filtro de poluentes (E-RENEWABLES, 2007; EESI, 2009).

Os gases gerados, bem como os líquidos, possuem características de combustíveis e, por isso, são posteriormente aproveitados na geração de energia (COSTA, 2006; PARADELA, 2007).

Destaca-se do processo que pequena parte dos subprodutos gerados — a não combustível, principalmente — necessita de tratamento que será definido de acordo com as características do material processado (FEAM, 2012).

Os aspectos intermitentes para a pirólise são granulometria das partículas do material, velocidade do gás e tempo de reação, porém o controle do processo é feito pela temperatura (Tabelas 6 e 7) (GONÇALVES, 2007).

**Tabela 2.6** – Classificação simplificada das modalidades de pirólise.

MODALIDADES DE PIRÓLISE	TEMPO DE RESIDÊNCIA	TEMPERATURA (°C)	PRODUTO PRINCIPAL
Lenta (carbonização)	Horas/dias	350 a 700	Sólido de carbono quase puro (char)
Rápida	0,5 a 2 segundos	400 a 600	Líquido pirolenhoso

Fonte: GOMES (2010) *apud* FEAM (2012).

**Tabela 2.7** – Efeitos da temperatura na pirólise de RSU.

TEMPERATURA (°C)	PERCENTUAIS DE SUBPRODUTOS DA PIRÓLISE (%)		
	GASES	LÍQUIDOS	SÓLIDOS
482	12,23	61,08	24,71
649	18,64	59,18	21,80
927	24,36	58,70	17,67

Fonte: LIMA (1995) *apud* FEAM (2012).

Fontes et. al (2012) *apud* Dantas (2013) expande a classificação dos processos de pirólise pelas características operacionais e seus prováveis subprodutos (ver Tabela 8).

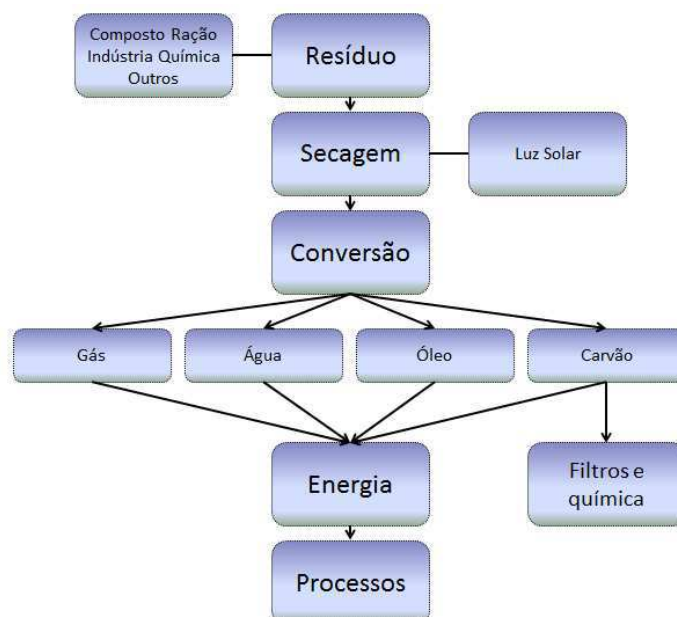
**Tabela 2.8** – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia.

MÉTODO	RESULTADO PROVÁVEL
Carbonização	Carvão
Pirólise convencional	Bio-óleo, finos de carvão e gases
Pirólise rápida	Bio-óleo em maior escala, finos de carvão e gases em menor quantidade
Pirólise ultrarrápida	Gases combustíveis e produtos químicos

Fonte: FONTES et. al, 2012, *apud* DANTAS, 2013.

O fluxograma do processo tem sua convenção exposta na Figura 9.

**Figura 9.** Fluxograma da pirólise.



Fonte: ROMEIRO, 2014.

O processo parte de um resíduo, no caso um material sólido que deverá passar por secagem por exposição à luz solar, preferencialmente, que é colocado no equipamento e terá gás, água, óleo e/ou carvão como subprodutos, potencialmente utilizáveis na geração de energia ou, no caso do carvão, ser utilizado em filtros ou na indústria química (ROMEIRO, 2006).

## 2.5 RSU E SEU POTENCIAL ENERGÉTICO

Para o aproveitamento energético dos RSU, os aspectos a serem considerados são: o tipo de material a ser utilizado como combustível, pois alguns são inviáveis devido à necessidade de elevada quantidade de energia para seu processamento/queima; o tipo de energia utilizada para o processo de geração e se essa pode ser gerada no ciclo da própria usina e a eficiência energética da planta; a viabilidade econômica, ou seja, preço de geração e preço de venda da energia; e as questões ambientais ligadas aos subprodutos gerados inevitavelmente no processo.

Os materiais presentes nos RSU a serem utilizados para geração de energia são os de origem orgânica, deixando as frações vidro, metal e inertes

para os destinos mais viáveis como reciclagem — para os dois primeiros — e aterros. Assim, é necessária a análise de dados sobre o potencial energético da matéria orgânica, correspondente à quase metade da totalidade dos RSU, dos plásticos e papéis, em seus diversos tipos, além de madeira e tecidos, que aparecem em quantidades menores (CARVALHO, 2013).

De forma direta, as Tabelas 9 e 10 apresentam o poder calorífico dos principais materiais componentes dos resíduos sólidos urbanos com viabilidade de aproveitamento como combustível para geração de energia.

**Tabela 9** – Poder calorífico inferior (PCI) de alguns resíduos sólidos urbanos.

RSU	PCI (BASE SECA) KCal/kg	UMIDADE (%)	CINZAS (%)	PCI (BASE ÚMIDA SEM CINZAS) KCal/kg
Matéria orgânica	4.300	66	25	712
Papel e papelão	3.800	21	5	2.729
Têxteis e couro	4.200	36	10	1.921
Madeira	3.700	25	5	2.490
Plástico	10.300	17	3	8.193
Borracha	9.700	5	6	8.633

Fonte: CODESC (2003) *apud* CEMIG GT e FEAM (2011) *apud* FEAM (2012).

**Tabela 10** – Poder calorífico de materiais encontrados em RSU.

MATERIAL	KCal/kg
Plásticos	6.300
Borracha	6.780
Couro	3.630
Têxteis	3.480
Madeira	2.520
Alimentos	1.310
Papel	4.030

Fonte: BRASIL, 2012.

Determinar o poder calorífico e o potencial energético, por cogeração de energia, de cada fração de RSU é um trabalho complexo, pois deve ser realizada uma separação que nunca dará total representatividade pelo fato de

---

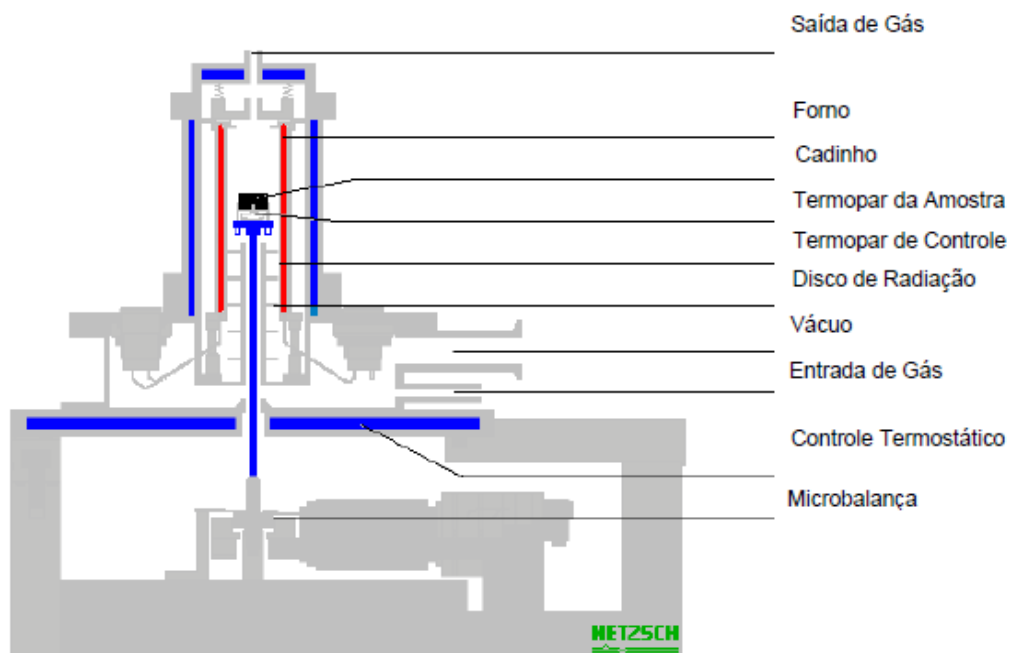
cada uma ser formada por um número elevado de materiais com composições variáveis. Entre as técnicas do grupo das “Termoanálises” existem algumas que podem fornecer dados sobre o comportamento térmico dos RSU.

## 2.6 TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS RSU

### 2.6.1 Termogravimetria e termogravimetria derivada

A termogravimetria (TG) é a técnica das análises térmicas que estuda as variações de massa de um material em função da temperatura ou do tempo sob uma determinada razão de aquecimento (GIOLITO, 2004).

**Figura 10.** Desenho de um equipamento de termogravimetria.



Fonte: RODRIGUES e MARCHETTO, 2002.

O equipamento dessa técnica – termobalança – é formado, basicamente, por forno e balança (Figura 10), podendo o forno ser de diferentes tipos, definidos pelo posicionamento do porta-amostra e/ou pela faixa de temperatura em que trabalha, e sendo a balança analítica, por exigir precisão nas medições com massas relativamente pequenas (MORAIS, 2012).

A termobalança é ligada a um microcomputador equipado com um aplicativo computacional, específico desta, que define e controla os parâmetros do ensaio e imprime os resultados registrados, de massa, temperatura e tempo, pelo equipamento (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002).

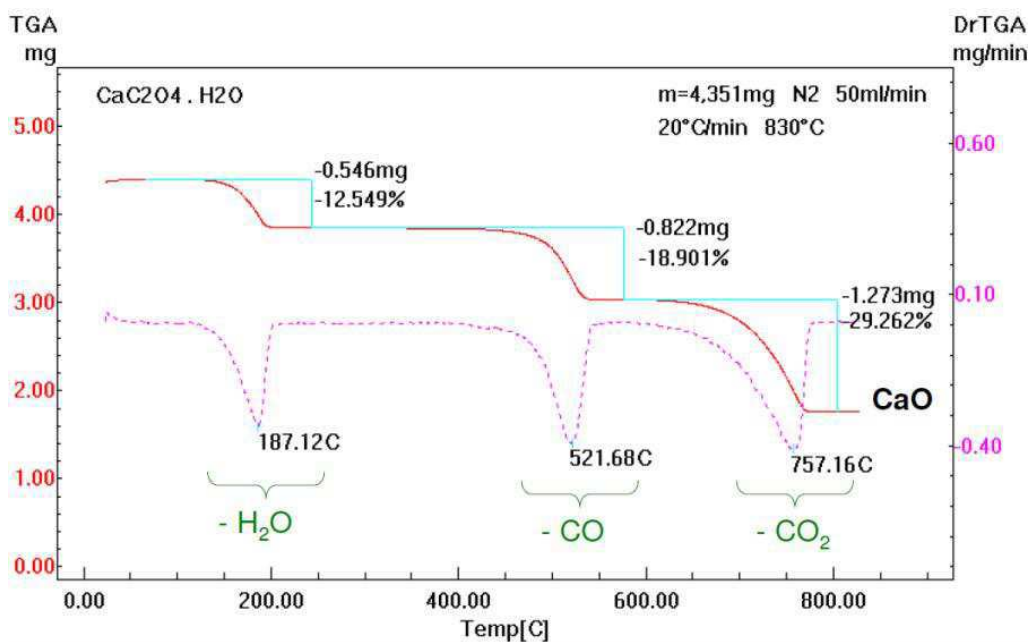
As curvas TG registram todas as variações sofridas pela amostra desde a temperatura ambiente, passando pelo seu aquecimento e, por fim, tendo o resfriamento (MORAIS, 2012).

A termogravimetria diferencial (DTG) é uma técnica complementar da TG, pois é obtida pela primeira derivada da curva TG, sendo responsável pela medição da taxa de variação de massa (FREITAS, 2002).

A curva DTG dá resultados mais bem definidos que a curva TG, tendo área diretamente proporcional à variação de massa, mostrando os picos das variações de massa em função da temperatura e permitindo determinar as temperaturas de pico, inicial de um evento (por exemplo, reação) e final deste (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002; GIOLITO, 2004; MORAIS, 2012).

A Figura 11 mostra um exemplo de gráfico com curvas TG/DTG.

**Figura 11.** Exemplo de curvas TG/DTG.



Fonte: FREITAS, 2002.



---

A apresentação das curvas TG e DTG é feita simultaneamente, sendo o eixo das ordenadas à esquerda a representação da massa da amostra (em miligramas ou percentagem) e à direita da variação de massa (em miligramas por minuto ou percentagem por unidade de tempo), e o eixo das abscissas graduado em termos de temperatura ou tempo do experimento (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002).

Os picos da curva DTG demarcam os eventos do experimento, haja vista que a derivada de uma variável é um número e, sendo a derivada de uma constante igual a zero, quando não houver variações na TG, a DTG marcará zero.

São inúmeras as possibilidades de aplicações da termogravimetria e da termogravimetria derivada, podendo estudar diversos eventos térmicos e inúmeros materiais, com grande importância no estudo de medicamentos (OLIVEIRA, 2011).

Para o conjunto dos RSU não existem ainda estudos termogravimétricos publicados.

## **2.6.2 Calorimetria exploratória diferencial**

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é, de acordo com Giolito (2004), “uma técnica na qual mede-se a diferença de energia fornecida à substância e a um material referência, em função da temperatura enquanto a substância e o material referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura” (GIOLITO, 2004).

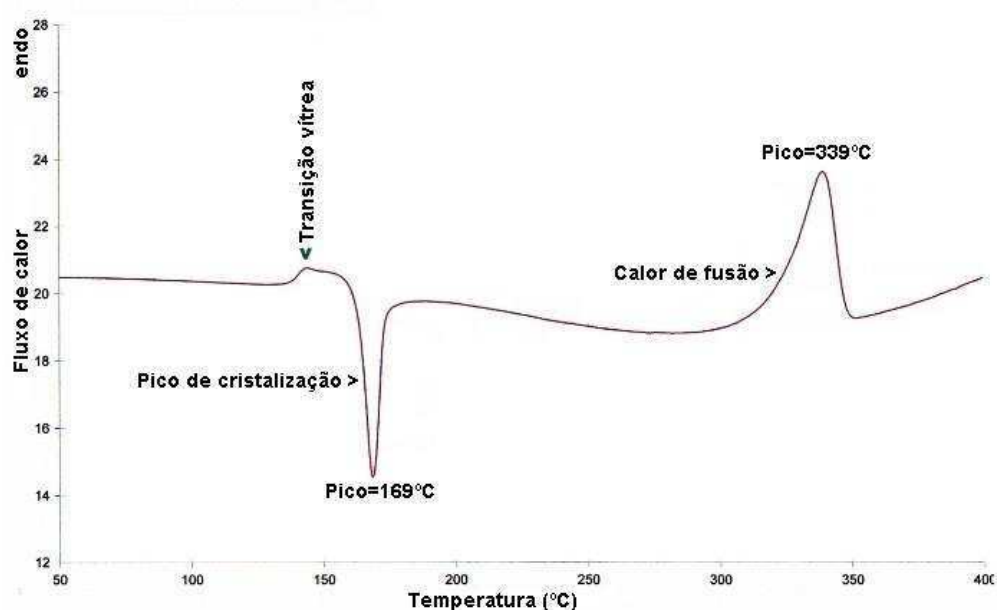
A técnica DSC é semelhante e mais completa que a análise térmica diferencial (DTA), com caráter complementar e até substitutivo em alguns casos (MORAIS, 2012). A diferença entre as técnicas DTA e DSC é a unidade medida, na primeira é a diferença de temperatura e na segunda a diferença na potência de entrada dos termopares entre a amostra e o material de referência (GIOLITO, 2004).

Os sistemas equipamento-computador (interfaces) da DTA e da DSC são iguais ao da TG, sendo o equipamento composto por forno, termopares,

porta-amostra e sistema de gás, e o aplicativo computacional comum às demais técnicas, diferente apenas na configuração (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002).

O equipamento da DSC pode ser de dois tipos denominados: “compensação de calor” e “fluxo de calor”. Estes se diferenciam pela colocação das fontes de aquecimento, onde, no primeiro tipo, amostra e referência possuem fontes individuais de emissão de calor e, no segundo tipo, o aquecimento parte da mesma fonte de calor (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002). A Figura 12 exemplifica uma curva DSC.

**Figura 12.** Exemplo de curva DSC de um polímero – indicação de picos e reações.

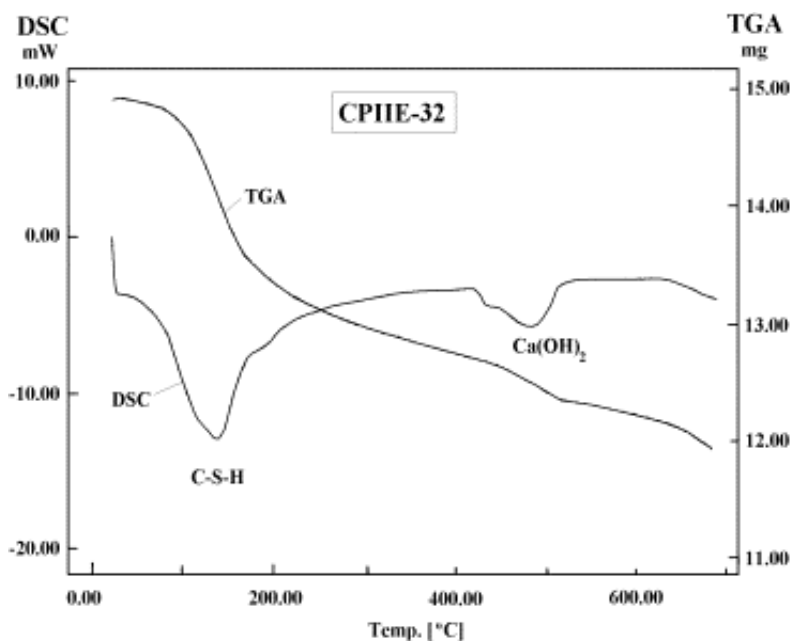


Fonte: UFRJ, 2012.

Como vantagens da calorimetria exploratória diferencial sobre a termogravimetria, Giolito (2004) cita: rapidez nos ensaios, requisição de massa menor nas amostras, possibilidade de experimentação de amostra sólida ou líquida, permissão de realização de processos de resfriamento e em alta pressão, e possibilidade de identificação de um número maior de reações químicas (GIOLITO, 2004).

Na Figura 13 é mostrado um exemplo de curva DSC qualquer cruzando com uma TG.

**Figura 13.** Exemplo de curva DSC.



Fonte: UFRJ, 2012.

Não são encontrados ainda estudos publicados com DSC aplicada aos resíduos sólidos urbanos, apenas com alguns de seus constituintes.

### 2.6.3 Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Espectroscopia, de modo geral, consiste em estudar a radiação eletromagnética transmitida, emitida ou absorvida por um determinado corpo em função do comprimento de onda ou frequência da dita radiação. Esta técnica é largamente empregada nas ciências exatas, pois permite, por exemplo, obter informações sobre a constituição química de materiais e propriedades nucleares, atômicas e moleculares da matéria (SILVEIRA, 2010).

A radiação emitida ou absorvida pode ser luz visível, infravermelho, ultravioleta, raios-X, micro-ondas ou todas as faixas do espectro

---

eletromagnético. Infravermelho compreende a região entre micro-ondas e de luz visível, em termos energéticos (DONOSO, 2012).

Um espectro é o resultado da dispersão da luz de uma fonte em seus diferentes comprimentos de onda. Pode ser representado pelo espectrograma ou em forma de um gráfico de fluxo em função do comprimento de onda.

A Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica de análise que capta o espectro infravermelho com maior velocidade, pois ao invés de fazer a coleta dos dados variando-se a frequência da luz infravermelha monocromática, a luz IV (com todos os comprimentos de onda da faixa usada) é guiada através de um interferômetro. Ao passar pela amostra o sinal medido é o interferograma. Fazendo-se uma transformada de Fourier no sinal resulta-se em um espectro igual ao da espectroscopia IV convencional (dispersiva) (HAACK, 2010).

São encontrados estudos de alguns materiais presentes em RSU com esta técnica, porém o conjunto com todas as frações ainda não tem caracterização por FTIR.

#### **2.6.4 Difração de Raios-X (DRX)**

A técnica de difração de raios-X é uma técnica indicada na determinação das fases cristalinas presentes em diversos materiais, principalmente os cerâmicos. De acordo com a história, muito do entendimento no que se refere a arranjos atômicos e moleculares em sólidos resultou de investigações de difração de raios-X (CALLISTER, 2002). Essa característica é viável porque em grande parte dos sólidos (cristais), os átomos se coordenam em planos cristalinos espaçados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X (ALBERS et al., 2002).

Incidindo um feixe de raios-X em um cristal, este interage com os átomos presentes, dando origem ao fenômeno de difração. A difração de raios-X acontece conforme a Lei de Bragg, estabelecendo essa a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (SANTOS, 1989; CALLISTER, 2002):

---

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (1)$$

Em que:

n: número inteiro

$\lambda$ : comprimento de onda dos raios-X incidentes

d: distância interplanar

$\theta$ : ângulo de difração.

Entre tantas aplicações, a DRX permite a identificação de fases cristalinas, a aplicação em dispositivos com controle de temperatura, a análise de orientações de cristalinos ou textura, a definição do tamanho de cristalinos e da tensão residual (RANGEL, 2011).

Das vantagens da técnica de DRX para a caracterização, destaca-se a simplicidade e rapidez do procedimento, a confiabilidade dos resultados obtidos, a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa destas fases.

A Shimadzu (2014) destaca como aplicações de um difratômetro:

“Aços, metais não-ferrosos, máquinas, construção naval, soldagem, automóveis, cerâmica, cimento, vidro, catalisadores, peças elétricas, materiais eletrônicos, materiais magnéticos, materiais supercondutores, fibras, papel, celulose, produtos alimentícios, produtos químicos, produtos químicos agrícolas, corantes, pigmentos, tintas, produtos farmacêuticos, materiais odontológicos, a matéria biológica, petróleo, carvão, geração de energia, gás natural, minério de mineração, solo, rochas, argila, minerais, construção, engenharia civil, meio ambiente e resíduos industriais” (SHIMADZU, 2014).

Estudos por DRX para certos materiais orgânicos ainda são escassos, não havendo ainda para resíduos sólidos urbanos publicações. Essa técnica ainda é aplicada mais frequentemente para caracterização de materiais de base inorgânica.

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

*Capítulo* **3**

A large, faint recycling symbol (three chasing arrows forming a triangle) is positioned in the background behind the chapter title.

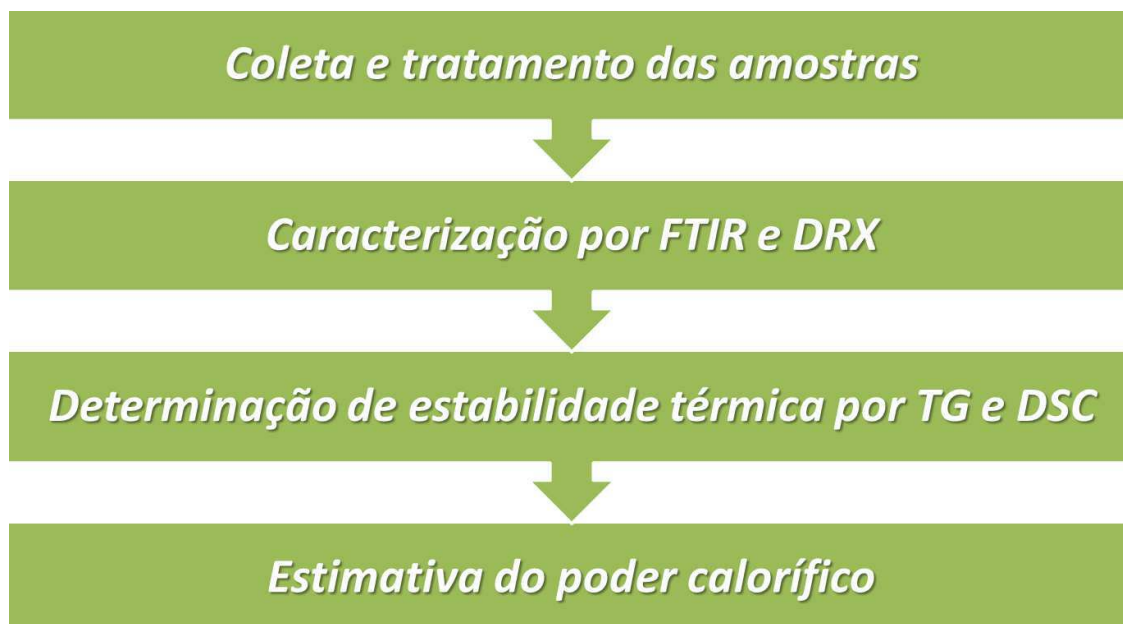
**Material e métodos**

---

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido em cinco etapas, conforme o fluxograma da Figura 14.

**Figura 14.** Fluxograma da metodologia empregada.



Fonte: Do Autor, 2013.

Previamente à coleta de amostra, primeira etapa experimental, realizou-se a consulta a várias fontes de pesquisa científica em impressos e digitais. Nessa bibliografia foram buscados, entre outros, detalhes sobre os resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, o lisímetro que simula um aterro, a composição dos RSU de Campina Grande, as técnicas de caracterização de materiais, as técnicas com potencial de geração de energia a partir de RSU e poderes caloríficos de alguns materiais (conseqüentemente, potencial energético destes).

As normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10.004 de 2004 e a NBR 10.007 de 2004 que tratam, respectivamente, da classificação de resíduos sólidos e da amostragem de resíduos sólidos, foram outra base fundamental teoricamente e experimentalmente.

---

### 3.1 COLETA E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

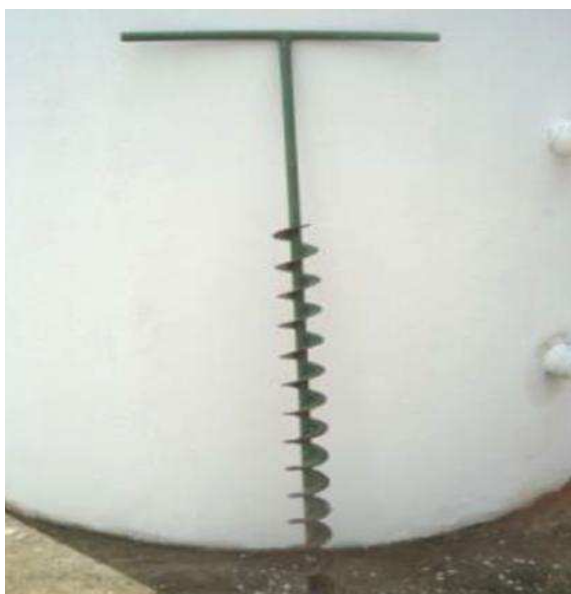
As coletas de amostras foram realizadas nas aberturas laterais situadas nos pontos intermediário e inferior, diferenciados, então, pela altura do extrato de resíduos depositados, não tendo havido a possibilidade de coleta no ponto superior devido ao recalque ocorrido desde o início do enchimento do biorreator. A Tabela 11 mostra o cronograma de coleta de amostras.

**Tabela 11** – Cronograma de coleta das amostras.

Local	Datas e Amostras			
Ponto	26/03/14 (A)	29/04/14 (B)	28/05/14 (C)	30/06/14 (D)
Intermediário (M)	Amostra 1MA	Amostra 1MB	Amostra 1MC	Amostra 1MD
Inferior (I)	Amostra 1IA	Amostra 1IB	Amostra 1IC	Amostra 1ID
Extrato	RSU CG A	RSU CG B	RSU CG C	RSU CG D

Em cada ponto foram coletados cerca de 300 gramas de resíduos utilizando ferramenta denominada de “amostrador de cravação manual” (Figura 15) de 1,5 m e 0,12 m, altura e diâmetro, respectivamente, seguindo metodologia utilizada por Silva (2012), colocando o material em recipientes plásticos, um para cada ponto.

**Figura 15.** Amostrador para coleta de amostras de RSU.



Fonte: Do Autor, 2014.



---

Sendo interesse da pesquisa estudar o conjunto de RSU, o coletado foi misturado e ensaiado como um extrato do que há posto no biorreator.

O tratamento das amostras consistiu em triturar, definindo uma granulometria para o material triturado, homogeneizar, secar em estufa e armazenar volumes determinados para cada análise, com todas essas fases realizadas no Laboratório de Geotecnia Ambiental, junto ao Grupo de Geotecnia Ambiental.

A picotagem do material foi feita manualmente com o uso de tesouras comuns. Picotado, este foi secado em estufa por 6 dias a cerca de 100 °C em estufa da marca DeLeo tipo 5.

A trituração mecânica foi realizada no moinho analítico da marca Quimis, modelo Q298A (Figura 16), que suporta cerca de 10 g do material por sessão. Quando encontrado vidro, este foi triturado com almofariz.

**Figura 16.** Moinho analítico Quimis Q298A.



Fonte: QUIMIS, 2014.

O peneiramento, que precedeu a etapa de armazenamento de amostras, foi em malha nº 20 que tem abertura equivalente de 0,84 mm. O baixo diâmetro dos grãos é justificado pela necessidade de se trabalhar com um material bem homogeneizado e compactado nos equipamentos de caracterização térmica e espectrométrica.

---

As amostras destinadas aos ensaios de DRX foram peneiradas em malha nº 200 (abertura de 0,074 mm), sendo esta uma exigência operacional do equipamento.

As amostras foram armazenadas em recipientes de 2,5 ml denominados “ependófilos” e destinadas aos devidos ensaios nos laboratórios.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Esta etapa do estudo consistiu na caracterização das amostras dos resíduos sólidos urbanos e foi realizada utilizando equipamentos de Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier e Difração de Raios-X.

Foram utilizadas técnicas físico-químicas que, pelas normas técnicas vigentes, permitiram e definiram a capacidade obtenção de dados necessários para descrever algumas características do material estudado, sendo DR-X e FTIR as escolhidas.

As amostras foram caracterizadas quanto às características químicas e físicas, como a composição química, essenciais para avaliação das etapa da degradação e a estimativa do potencial de geração de energia desses com base em componentes e base estrutural determinados.

Os difratogramas das amostras foram realizados no equipamento Shimadzu XDR-6000 (Figura 17), tendo como condições analíticas a varredura “2theta-theta” de 2° a 30°, velocidade do goniômetro de 2°/min, passo 0,02, pelo método “fixed time” e em porta amostra de alumínio. O ensaio ocorreu no Laboratório de Caracterização dos Materiais na UFCG.

A caracterização por espectroscopia na região do infravermelho com Transformada de Fourier foi realizada em um espectrômetro modelo IR Spectrum 21 (ver Figura 18), Shimadzu, no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

---

**Figura 17.** Difratorômetro de raios-X Shimadzu XDR-6000.



Fonte: SHIMADZU, 2014.

**Figura 18.** IR Spectrum 21 Shimadzu.



Fonte: Do Autor, 2014.

Para obtenção dos espectros no equipamento referido, foram utilizadas pastilhas de brometo de potássio (KBr), de peso molecular igual a 119 g/mol, com 1% de amostra, prensadas a vácuo, na região de absorção entre 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

---

### 3.3 ENSAIOS POR TERMOGRAVIMETRIA E CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL

Foram feitos ensaios referentes à estabilidade e à degradação térmica das amostras de RSU, utilizando os seguintes métodos termoanalíticos: Termogravimetria e Calorimetria Exploratória Diferencial.

As análises foram realizadas no Laboratório de Termoanálises da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande.

O equipamento utilizado foi do modelo SDT Q600 Simultaneous TGA/DSC da marca TA Instruments (Figura 19), o qual possibilitou ensaios simultâneos pelas técnicas TG e DSC.

**Figura 19.** TA SDT Q600 Simultaneous TGA/DSC.



Fonte: Do Autor, 2014.

Os ensaios foram realizados com massas de  $10,5 \pm 0,5$  mg, colocadas em cadinho de alumina, para cada uma das 4 amostras, com uma repetição confirmativa para cada ensaio, partindo da temperatura ambiente até  $1000^{\circ}\text{C}$ , com razão de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  em atmosfera dinâmica de nitrogênio em fluxo de  $50 \text{ mL}/\text{min}$ .

---

Foram analisadas, separadamente, as curvas resultantes da TG/DTG e da DSC, no aplicativo “TA Instruments Universal Analysis 2000”.

As quantidades de massa no início e no fim de cada etapa de perda, bem como dos elementos eliminados das amostras, foram determinados através de cálculos com base nos dados das análises realizadas no software.

Os eventos térmicos acontecidos com as amostras foram verificados nas curvas resultantes da DSC, assim como as quantidades de energias absorvidas e liberadas.

### **3.3.1 Determinação da estabilidade térmica das amostras de RSU**

Baseado nos grupos funcionais identificados nas análises dos espectrogramas da FTIR e em autores que estudaram, separadamente, alguns dos materiais presentes na constituição dos RSU amostrados, foi determinada a estabilidade térmica destes.

O comportamento do material ao longo da faixa de temperatura que se iniciou na ambiente e foi até 1000 °C também foi analisado como um todo e em suas etapas de perdas definidas empiricamente.

### **3.3.2 Estimativa do poder calorífico dos RSU de Campina Grande**

Essa etapa iniciou-se com a estimativa do quantitativo do material produzido e coletado diariamente em Campina Grande, depositado no biorreator há 5 anos, com base nos dados do IBGE (para população), da ABRELPE (geração *per capita*) e índices gravimétricos (GGA).

A estimativa do poder calorífico dos RSU de Campina Grande estudados foi feita por métodos matemáticos partindo da quantidade da amostra e energia que pode sair desta na forma de calor.

De posse dos dados obtidos, foi determinado, com base na quantidade de RSU, o quantitativo energético desperdiçado em Campina Grande (PB).

Finalizou-se o trabalho arranjando as devidas recomendações em relação ao tema.

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

*Capítulo* **4**

**Resultados e  
discussão**



---

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS RSU

#### 4.1.1 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier

Como resultado dos ensaios de espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier foram gerados gráficos bidimensionais, definidos como espectros, e realizadas as devidas análises sobre estes para identificação dos compostos presentes nas amostras de RSU coletadas no biorreator.

No Apêndice A, na Figura A.1 é apresentado o espectrograma da amostra RSU CG A, com a indicação dos principais estiramentos característicos de vibrações nas ligações.

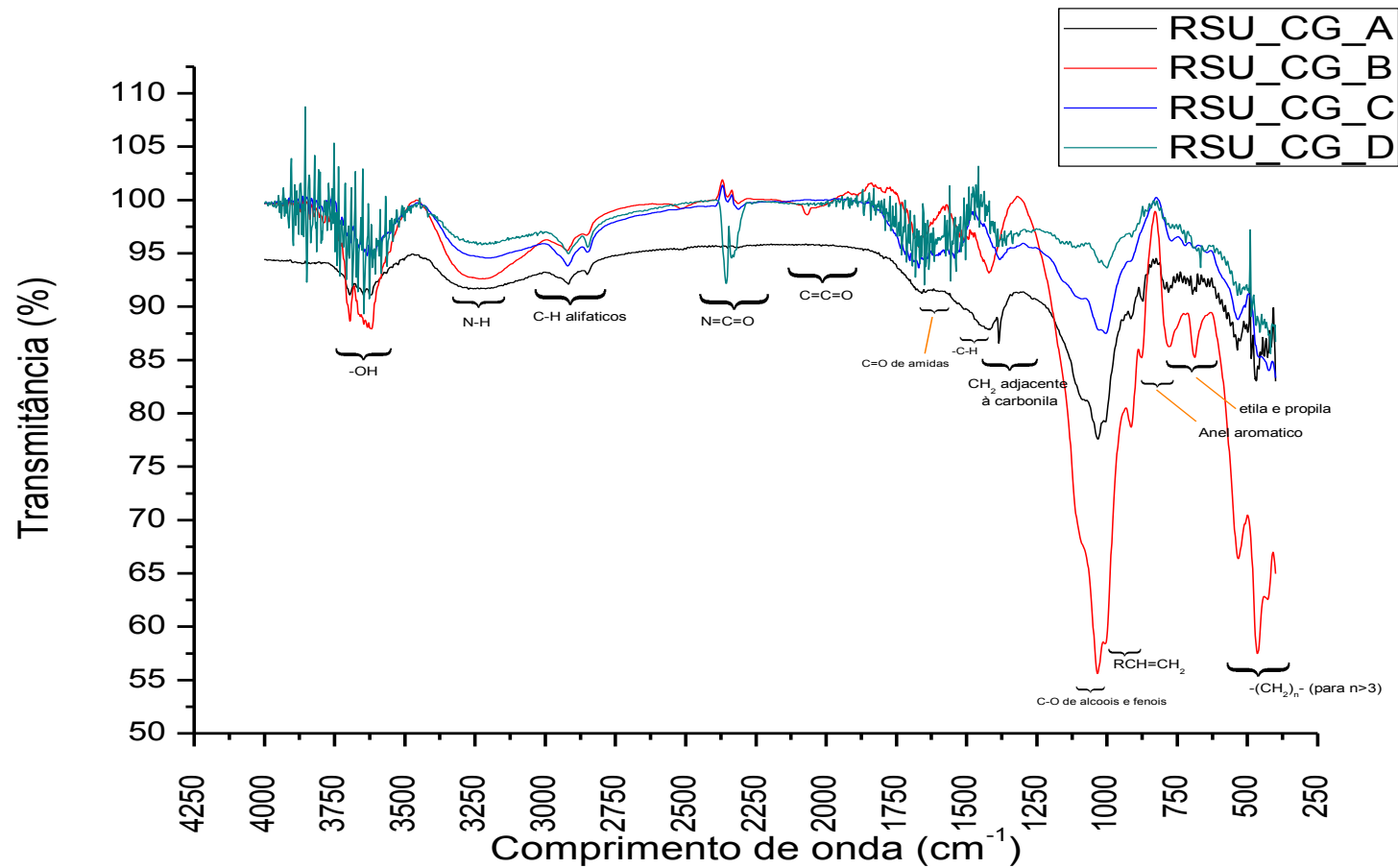
São apresentados, na Figura A.2, Figura A.3 e Figura A.4, respectivamente, os espectrogramas das amostras RSU CG B, RSU CG C e RSU CG D.

Para uma análise geral dos componentes das amostras de RSU, a Figura 20 apresenta os espectrogramas das quatro amostras e a indicação dos grupos funcionais para cada faixa onde houve aparecimento de picos ou bandas.

Analisando os espectros, segundo referências que publicaram estudos de materiais por FTIR, de acordo com tabelas que indicam os valores de transmitância característicos de cada grupo funcional, foram identificados os principais estiramentos em bandas ou picos e associado ao grupo funcional com o respectivo valor.

Na Tabela 12 são apresentados os dados da análise dos espectrogramas das amostras, com os comprimentos de ondas dos estiramentos identificados e a associação destes aos grupos funcionais.

Figura 20. Espectrogramas das amostras de RSU do biorreator.



Fonte: Do Autor, 2014.



**Tabela 12** – Grupos funcionais identificados pelos estiramentos característicos nos difratogramas das amostras de RSU.

Amostra	Grupos funcionais encontrados e respectivos comprimentos de onda dos estiramentos em $\text{cm}^{-1}$													
	-OH	N-H	C-H alifáticos	N=C=O	C=C=O	C=C	C=O de amidas	CH <sub>2</sub> adjacente à carbonila	-C-H	C-O de álcoois e fenóis	RCH=CH <sub>2</sub>	Anel aromático	Grupos etila e propila	-(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> - (para n>3)
RSU CG A	3696; 3647; 3620	3273	2917 2850	-	-	1659	-	1417	1384	1032	916	873	781	695; 536; 468; 428
RSU CG B	3695; 3619	3236; 3230	2922; 2853	-	2068	-	1671	-	1421	1034	1007	915	779	688; 533; 464; 428
RSU CG C	3614	3196	2920; 2849	-	2313	-	1671	-	-	1088	1005	-	771	651; 535; 457; 423
RSU CG D	3730; 3645	3225	2917; 2848	2356; 2337	-	-	1651	1393	-	1069	1001	-	774	693; 668; 536; 485; 424

Fonte: Do Autor, 2014.

---

Sendo a mistura de RSU constituída, grande parte, por material de origem orgânica, há essa confirmação nos espectros das amostras deste material, de acordo com Leite (2008b), por apresentarem, todos, bandas comuns de moléculas orgânicas.

As três primeiras amostras ensaiadas tiveram como resultado espectros com dezessete picos ou bandas mais definidos, enquanto na quarta (RSU D), devido aos ruídos, puderam ser apontados dezenove. De forma analítica, as quatro amostras mostraram treze estiramentos semelhantes, com pequenas variações no comprimento de onda.

Os quatro picos iniciais das amostras ocorreram em uma faixa de 695 – 422  $\text{cm}^{-1}$ , associados, segundo Periotto (2012), à deformação angular da cadeia de  $-(\text{CH}_2)_n-$  (para  $n>3$ ).

Os picos das faixas 790 – 730  $\text{cm}^{-1}$ , 990 – 910  $\text{cm}^{-1}$  e 1200 – 1050  $\text{cm}^{-1}$ , tendo havido um em cada espectro, representam, respectivamente, a deformação angular do grupo etila, a deformação angular fora do plano do grupo funcional  $\text{RCH}=\text{CH}_2$  e a presença de álcoois primários e secundários (VOLLAND, 1999; CONSTANTINO, 2006; PERIOTTO, 2012).

A zona de transmitância de 1500 – 600  $\text{cm}^{-1}$  é definida como impressão digital e em amostras de um mesmo material devem apresentar bandas iguais e a partir destas os espectros devem ser semelhantes (LEITE, 2008b). Logo, para as amostras ensaiadas, nessa zona houve diferenças nos grupos funcionais associados aos picos, alguns com heteroátomos como enxofre e nitrogênio, por diferentes intensidades e pequenas diferenças nos comprimentos de ondas, mesmo mostrando, o todo, um padrão característico.

Na zona de 3700 – 2850  $\text{cm}^{-1}$ , segundo Leite, (2008b), Pezzin (2010) e Periotto (2012), há ocorrências de picos de  $-\text{O}-\text{H}$ ,  $\text{N}-\text{H}$  e  $\text{C}-\text{H}$  alifáticos, respectivamente, entre 3600 – 3700  $\text{cm}^{-1}$ , 3500 – 3070  $\text{cm}^{-1}$  e 2960 – 2850  $\text{cm}^{-1}$ , faixas onde se verificam picos nos espectros das amostras de RSU.

---

#### 4.1.2 Difração de raios-X

Os ensaios de difração de raios-X forneceram como resultado quatro difratogramas – gráficos apresentados em duas dimensões com os picos de intensidade da difração que ocorrem em um determinado ângulo  $2\theta$  –, um para cada amostra.

A Figura 21 apresenta os difratogramas de raios-X das amostras RSU CG A, RSU CG B, RSU CG C e RSU CG D, sendo expostos no Apêndice B o detalhamento dos picos com intensidades e largura características e a análise da cristalinidade dos picos das amostras.

Analisando os difratogramas, com base em autores que estudaram materiais por DRX, foram identificados os principais picos em termos do ângulo  $2\theta$  e intensidade relativa, bem como a cristalinidade das amostras, conforme apresenta a Tabela 13.

Todos os difratogramas apresentaram comportamento semelhante, característico de materiais amorfos com alguns picos de fases cristalinas presentes, segundo Mundstockl et al. (2010), afirmando a previsão lógica por serem todas as amostras de uma mesma mistura de materiais com base orgânica.

Os difratogramas das amostras RSU CG A e RSU CG B apresentaram um pico de maior intensidade em  $2\theta$  igual a  $26,6 \pm 0,05$  graus, tendo aparecido esse mesmo pico nas demais amostras, porém tendo estas um pico, cada, de intensidade superior a este, em  $2\theta$  igual a 27,94 e 20,93 graus, respectivamente, nas amostras coletadas em maio e junho.

Os picos verificados em todas as amostras a  $2\theta \approx 26,66^\circ$  indicam a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), se confirmando pelo pico comum em  $2\theta \approx 20,92^\circ$ , segundo Souza et al. (2003), Martins (2009), Bastos (2012) e Cunha et al. (2014), o que associa-se à presença de solo do recobrimento dos RSU no biorreator.

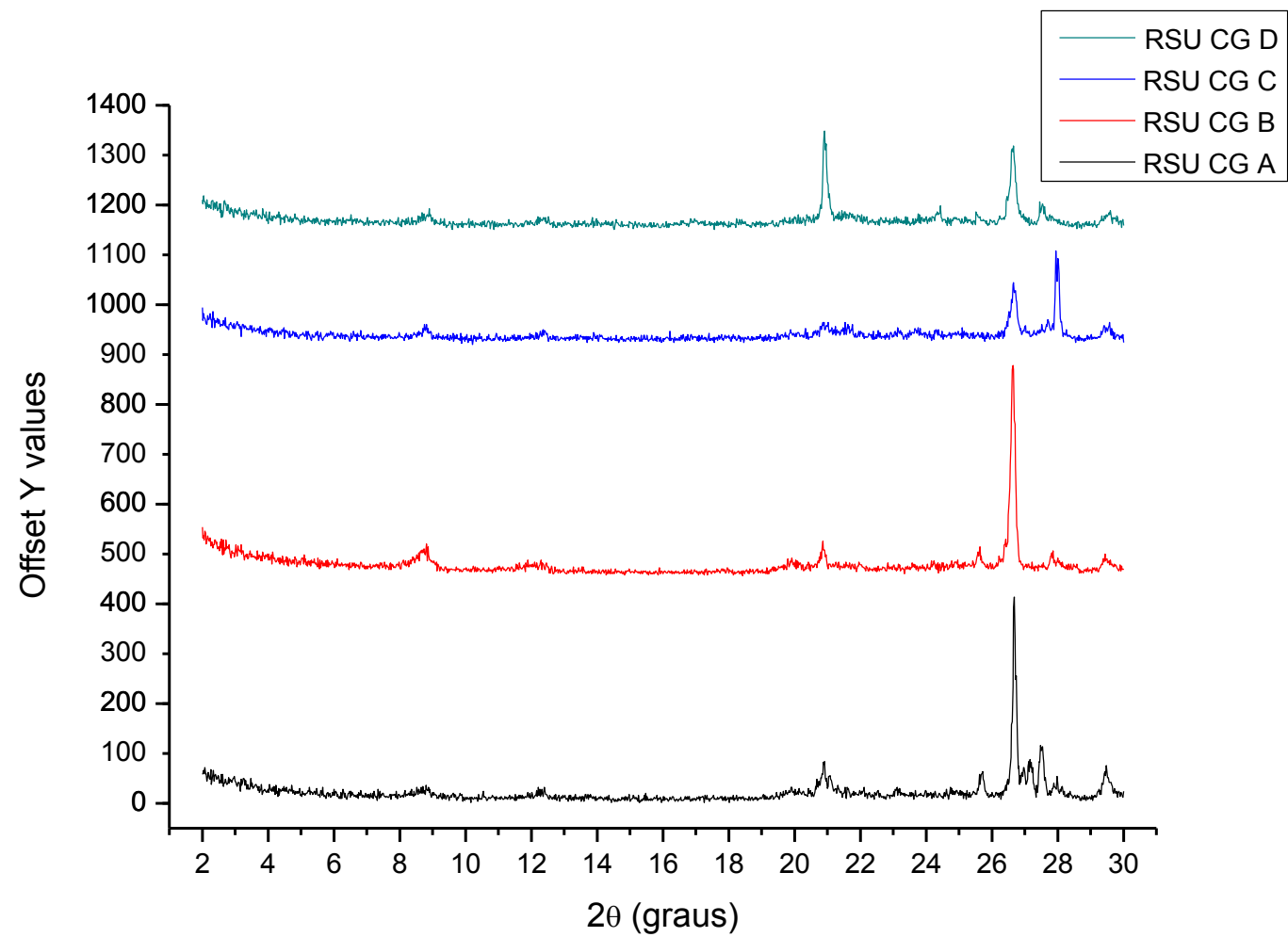
Os picos próximos de  $2\theta = 27,75^\circ$  são característicos de difração em hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de acordo com Inda Junior et al. (2005). Essa característica apresenta uma fase do ferro, apontando a presença da fração metais nas

---

amostras de RSU, bem como na constituição do solo utilizado no recobrimento dos RSU no lisímetro.

Em termos de cristalinidade, selecionando os picos de maiores valores de intensidade relativa, nas faixas de  $2\theta = 20^\circ$  a  $2\theta = 21^\circ$  e de  $2\theta = 25^\circ$  a  $2\theta = 29^\circ$ , a maior identificada foi na amostra RSU CG B (97,23%) enquanto a menor foi na amostra RSU CG A (85,38%), com média entre todas as amostras de 92,24%. Esse é um dado que garantiria a predominância de fases cristalinas no material que constitui as amostras de RSU, porém a maior parte dos difratogramas se apresenta como amorfa.

**Figura 21.** Difratoogramas de raios-x das amostras de RSU.



Fonte: Do Autor, 2014.

**Tabela 13 – Dados dos difratogramas das amostras de RSU.**

Amostra	Principais picos identificados			Cristalinidade (%)
	Picos amorfos	2 $\theta$ (graus)	I/I <sub>1</sub>	
RSU CG A	1	20,87	18,13	85,38
	2	21,07	11,96	
	3	25,68	13,78	
	4	26,67	100,00	
	5	26,95	16,63	
	6	27,16	21,05	
	7	27,50	30,52	
	8	29,43	15,50	
RSU CG B	1	20,93	12,95	97,23
	2	25,67	10,55	
	3	26,46	12,33	
	4	26,70	100,00	
RSU CG C	1	8,74	13,41	91,47
	2	20,61	10,17	
	3	20,81	19,26	
	4	20,93	16,98	
	5	21,13	11,26	
	6	21,24	10,63	
	7	21,38	10,60	
	8	21,56	14,77	
	9	23,61	10,32	
	10	26,62	62,41	
	11	26,97	11,81	
	12	27,47	10,89	
	13	27,65	20,18	
	14	27,94	100,00	
	15	29,37	18,15	
	16	29,52	18,56	
RSU CG D	1	8,75	10,24	94,89
	2	8,88	13,98	
	3	20,76	13,77	
	4	20,93	100,00	
	5	21,32	11,85	
	6	21,52	13,13	
	7	21,69	11,98	
	8	24,40	15,25	
	9	25,54	10,86	
	10	26,64	90,14	
	11	26,94	10,20	
	12	27,51	22,72	
	13	27,81	10,96	
	14	29,57	16,16	
	15	29,77	11,77	

Fonte: Do Autor, 2014.

---

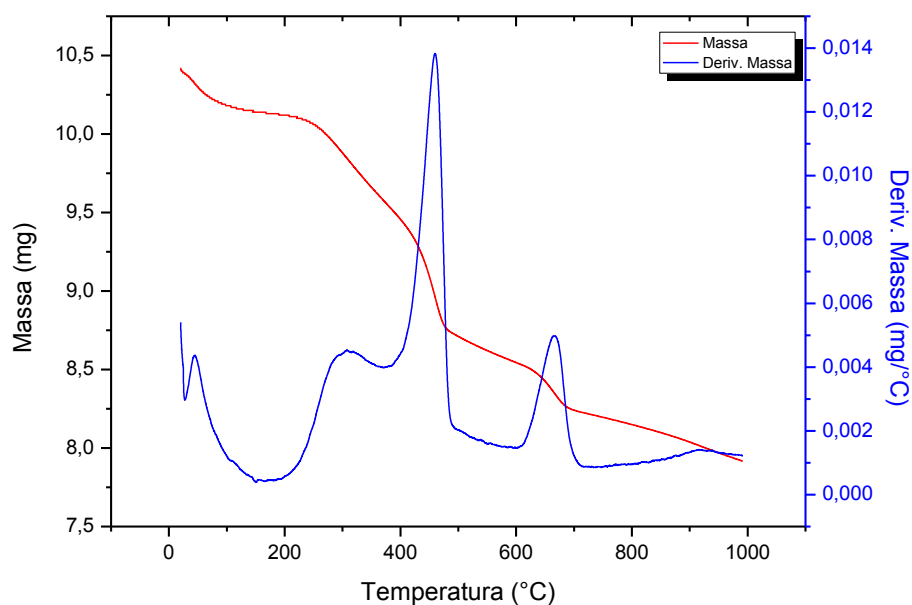
## 4.2 ANÁLISES TÉRMICAS

### 4.2.1 Estabilidade térmica das amostras de RSU por Termogravimetria e termogravimetria derivada

As Figuras 22 até 25 apresentam, ordenadamente, as curvas da termogravimetria e da termogravimetria derivada das amostras RSU CG A, RSU CG B, RSU CG C e RSU CG D, enquanto a Figura 26 apresenta as curvas TG das quatro amostras simultaneamente.

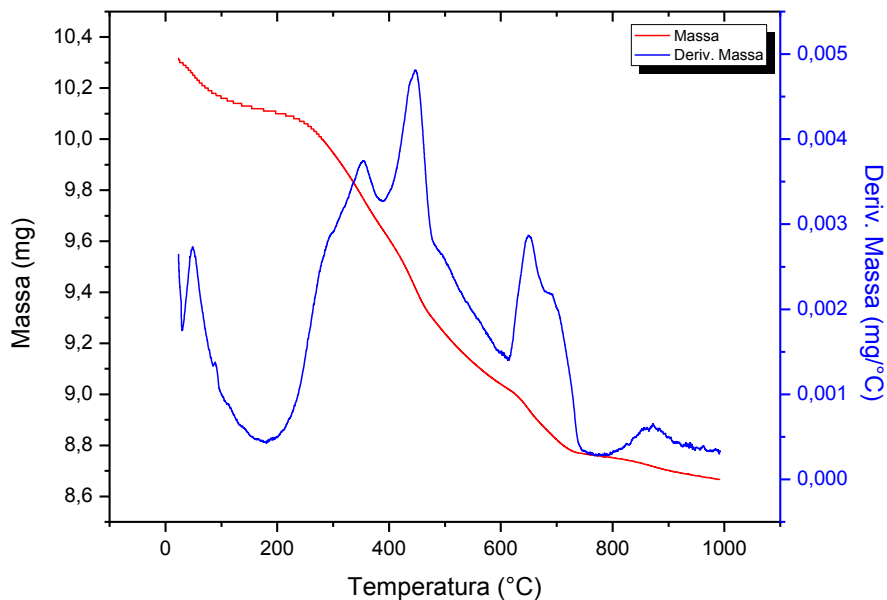
As curvas TG/DTG de todas as amostras de RSU analisadas, bem como suas repetições, estão apresentadas no Apêndice C.

**Figura 22.** Curvas TG/DTG da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



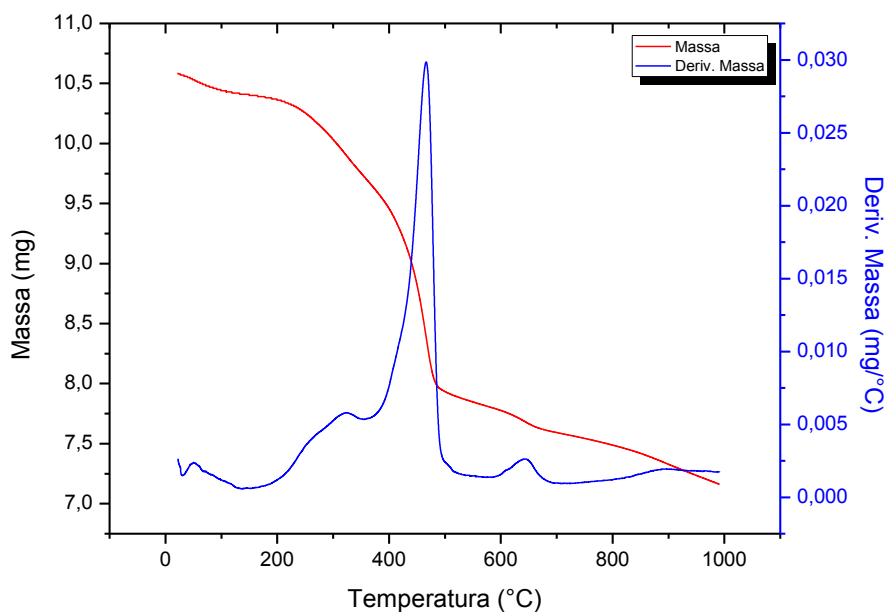
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura 23.** Curvas TG/DTG da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



Fonte: Do Autor, 2014.

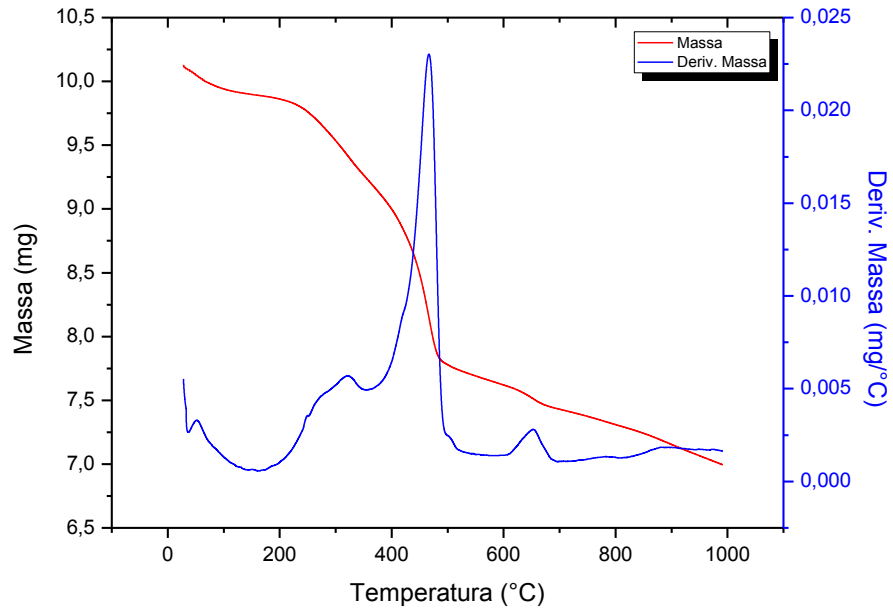
**Figura 24.** Curvas TG/DTG da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



Fonte: Do Autor, 2014.

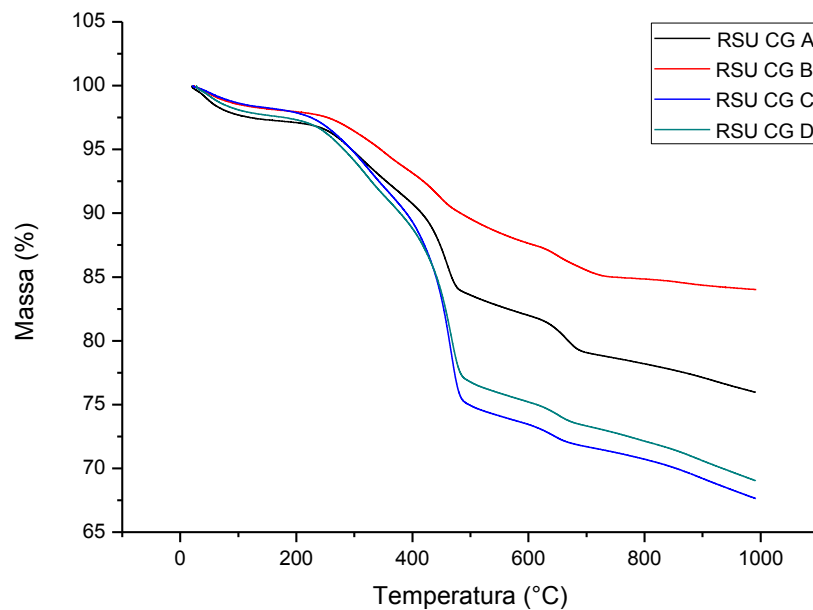


**Figura 25.** Curvas TG/DTG da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura 26.** Curvas TG das amostras RSU estudadas sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



Fonte: Do Autor, 2014.

Após análise das curvas TG/ DTG pelo uso do aplicativo computacional “TA Instruments Universal Analysis 2000”, foi possível identificar cinco principais etapas de perda de massa ao longo do experimento, estando estas apresentadas na Tabela 14.

**Tabela 14** – Dados de decomposição térmica dos RSU das curvas obtidas sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.

Amostra	Etapa de perda	m <sub>i</sub> (mg)	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>p</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	m <sub>f</sub> (mg)	Perda de massa	
							(%)	(mg)
RSU CG A	1 <sup>a</sup>	10,4200	20	46	151	10,1402	2,8	0,2798
	2 <sup>a</sup>	10,1402	151	308	371	9,5743	5,4	0,5659
	3 <sup>a</sup>	9,5743	371	459	594	8,5513	9,8	1,023
	4 <sup>a</sup>	8,5513	594	666	735	8,2068	3,3	0,3445
	5 <sup>a</sup>	8,2068	735	917	992	7,9147	2,8	0,2921
						Σ=	24,1	2,5053
RSU CG B	1 <sup>a</sup>	10,3200	23	49	180	10,1177	2,0	0,2023
	2 <sup>a</sup>	10,1177	180	355	389	9,6495	4,5	0,4682
	3 <sup>a</sup>	9,6495	389	447	612	9,0272	6,0	0,6223
	4 <sup>a</sup>	9,0272	612	651	769	8,7656	2,5	0,2616
	5 <sup>a</sup>	8,6707	769	874	992	8,6707	0,9	0,0949
						Σ=	15,9	1,6493
RSU CG C	1 <sup>a</sup>	10,5900	22	50	153	10,4056	1,7	0,1844
	2 <sup>a</sup>	10,4056	153	323	355	9,7274	6,4	0,6782
	3 <sup>a</sup>	9,7274	355	467	572	7,8194	18,0	1,908
	4 <sup>a</sup>	7,8194	572	644	708	7,5877	2,2	0,2317
	5 <sup>a</sup>	7,5877	708	894	992	7,1643	4,0	0,4234
						Σ=	32,3	3,4257
RSU CG D	1 <sup>a</sup>	10,1300	28	52	163	9,8880	2,4	0,242
	2 <sup>a</sup>	9,8880	163	322	356	9,2335	6,6	0,6545
	3 <sup>a</sup>	9,2335	356	467	583	7,6425	17,2	1,591
	4 <sup>a</sup>	7,6425	583	654	713	7,4142	3,0	0,2283
	5 <sup>a</sup>	7,4142	713	883	991	6,9928	5,7	0,4214
						Σ=	34,9	3,1372

Fonte: Do Autor, 2014.

Σ → somatório das perdas

A análise dos dados apresentados na Tabela 14 demonstra uma semelhança em todas as etapas de perdas de massa das amostras de RSU. Logo, foi possível elaborar a Tabela 15.

**Tabela 15** – Dados observados para etapas de perdas ocorridas com os RSU nos ensaios.

Etapa	T <sub>i</sub> (°C)		T <sub>p</sub> (°C)		T <sub>f</sub> (°C)		Perda de massa média (%)
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
1º	20	28	46	52	151	180	2,2
2º	151	181	308	355	355	389	5,7
3º	355	389	447	467	572	612	12,8
4º	572	612	644	666	708	769	2,7
5º	708	769	874	917	991	992	3,3
						Σ=	26,7

Fonte: Do Autor, 2014.

Σ → somatório das perdas

Foi feita uma média entre a menor e a maior temperatura observada para início, pico e fim de cada etapa de perda (Tabela 15), e pôde-se inferir: a primeira e menor está compreendida entre 24 °C e 166 °C, com pico em 48 °C; a segunda numa faixa de 166 °C a 372 °C, sendo o pico em 331 °C; a terceira e maior entre 372 °C e 592 °C, sendo em 457 °C o pico; a quarta acontecendo de 592 °C a 738 °C, tendo o pico em 655 °C; e a quinta e última ocorrendo entre 738 °C e 991 °C, com pico em 895 °C.

A média de perda total foi de 26,7%, conseqüentemente, com um resíduo médio de 73,3%.

Pela faixa da perda de massa inicial e respectivo pico, atribui-se os 2,2% na massa da amostra à volatilização dos solventes como água e álcoois, comparados pelos espectrogramas de FTIR (Figura 20). O pico médio em 48 °C é atribuído à reação com o álcool orgânico. Segundo Silveira (2013) a temperatura de vaporização da água ao nível do mar é de 100 °C, porém esta pode ocorrer em uma faixa de temperatura mais baixa, como acontece nesse caso, dependendo de alguns fatores como umidade do meio, ratificando a afirmação.

A segunda perda de massa é associada à queima de materiais orgânicos como papel, borracha e madeira e início da degradação térmica da matéria orgânica putrescível e dos plásticos, característicos da composição dos RSU e presentes nas amostras. A indicação é corroborada por NUFOR (2014), que afirma que o papel tem seu ponto de ignição (PI) em 230 °C e a madeira

---

em 280 °C, Caetano (2011) que afirma que a borracha natural, como a utilizada em luvas, tem sua autoqueima iniciada a 300 °C, Spagnollo et al. (2002), que confirma que a matéria orgânica putrescível (MOP) começa a queima a 300 °C, e Santos et al. (2011) e Fallavena et al. (2013) que afirmam que voláteis característicos de materiais orgânicos também são eliminados na faixa de temperatura em que essa perda ocorre.

A terceira perda é definida como a continuação da degradação térmica dos orgânicos, principalmente das frações MOP, a maior segundo a composição gravimétrica do material amostrado o que pode se associa à maior perda de massa, e dos plásticos, pois os materiais que se enquadram nessa classe, polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP) e etileno-vinil acetato (EVA) tem, respectivamente, 487 – 498°C, 487 – 498°C, 443 °C, 425 – 440 °C, 447 °C e 480 °C, encaixando-se essas temperaturas de ignição na faixa em que ocorre esse evento (NETZSCH, 2014).

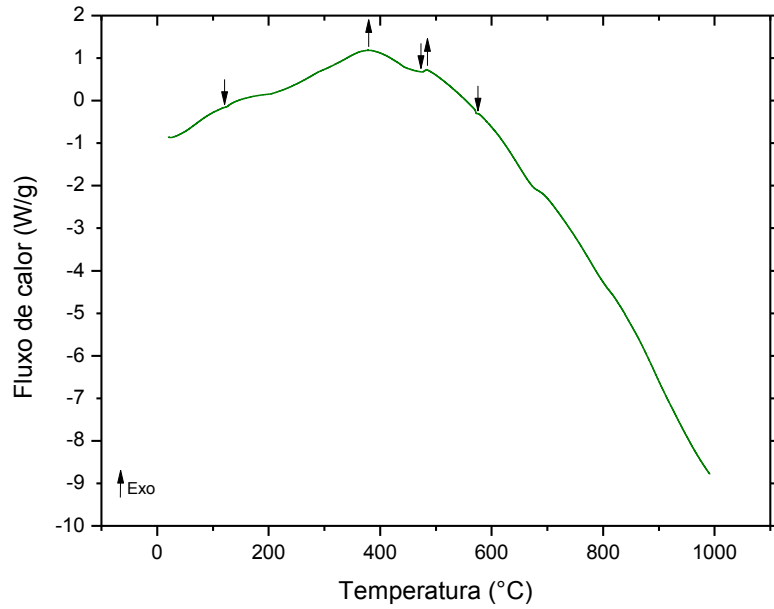
Os últimos dois eventos representam a degradação dos óxidos formados nas etapas anteriores.

#### **4.2.2 Determinação do poder calorífico das amostras de RSU por Calorimetria Exploratória Diferencial**

As Figuras Figura 27 até 30 apresentam, ordenadamente, as curvas da calorimetria exploratória diferencial das amostras RSU CG A, RSU CG B, RSU CG C e RSU CG D.

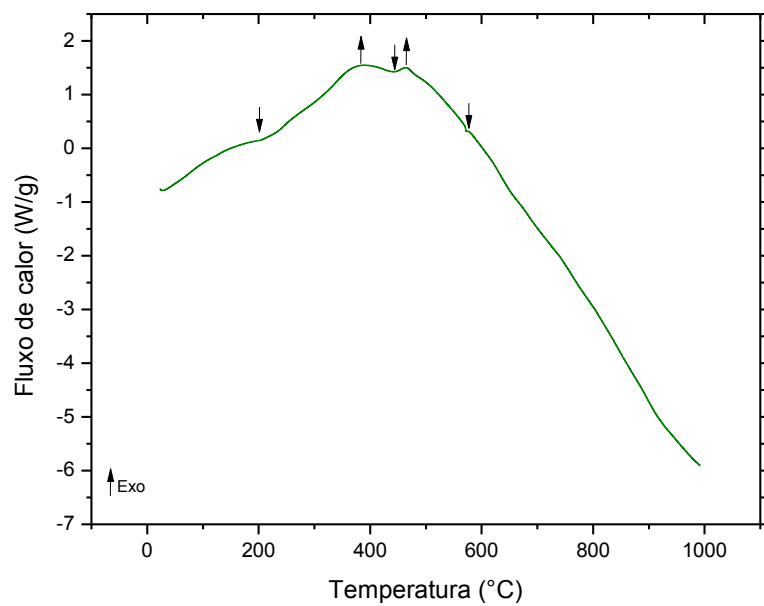
As curvas DSC de todas as amostras de RSU analisadas, bem como suas repetições, estão apresentadas no Apêndice D.

**Figura 27.** Curva DSC da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



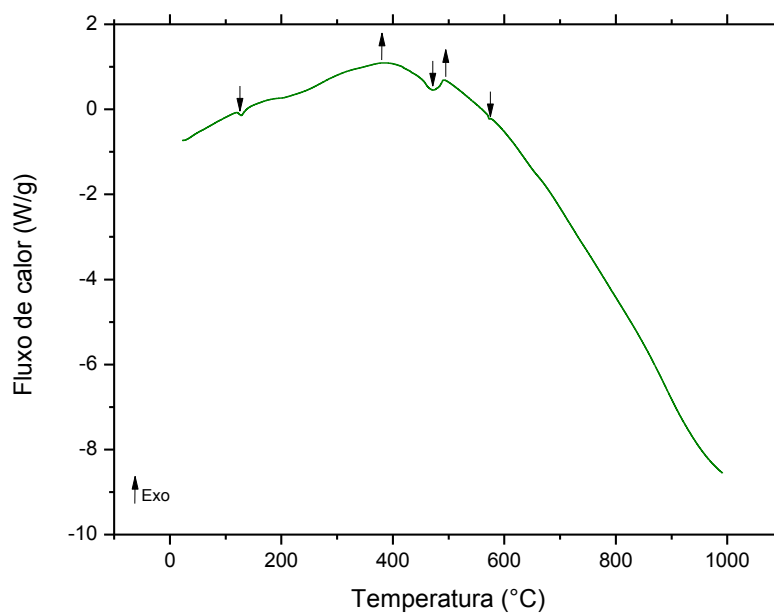
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura 28.** Curva DSC da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



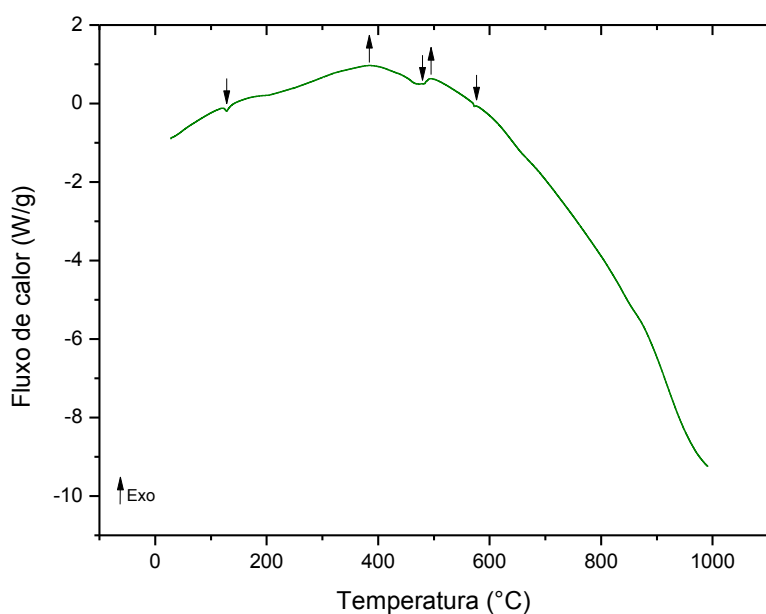
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura 29.** Curva DSC da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



Fonte: Do Autor, 2014.

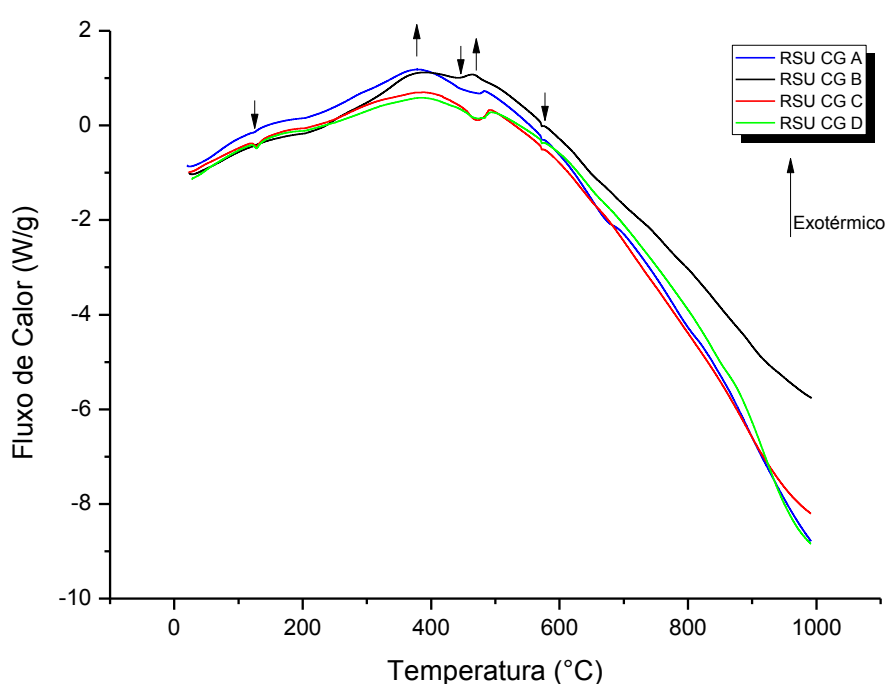
**Figura 30.** Curva DSC da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



Fonte: Do Autor, 2014.

Todas as curvas DSC tiveram comportamento semelhante – o aumento da temperatura provocou cinco reações –, com diferenças pouco expressivas que decorrem do fato de ser o material estudando uma mistura, não havendo a garantia de total homogeneidade e igualdade entre as amostras, conforme ilustra a Figura 31.

**Figura 31.** Curvas DSC das amostras RSU estudadas sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.



Fonte: Do Autor, 2014.

**Tabela 16 –** Dados de decomposição térmica dos RSU das curvas obtidas sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.

Amostra	Temperaturas dos picos característicos de reações (°C)				
	1º	2º	3º	4º	5º
RSU CG A	123 ↓	381 ↑	474 ↓	484 ↑	573 ↓
RSU CG B	205 ↓	386 ↑	440 ↓	467 ↑	573 ↓
RSU CG C	128 ↓	389 ↑	473 ↓	491 ↑	573 ↓
RSU CG D	128 ↓	390 ↑	483 ↓	493 ↑	573 ↓
Média	146 ↓	386 ↑	467 ↓	484 ↑	573 ↓

Fonte: Do Autor, 2014.

↓ → endotérmico; ↑ → exotérmico

A análise das curvas DSC obtidas demonstra uma semelhança em todas as reações ocorridas com o aquecimento das amostras de RSU. Logo, foi possível elaborar a Tabela 16.

O primeiro pico, identificado como endotérmico em uma temperatura, enquadra-se no intervalo da primeira perda entre 24 °C e 166 °C referente à volatilização de solventes, confirmado por Laurenti (2007) e Duarte Junior et al. (2010), que garantem decorrer da desidratação do material, confirmado por Carneiro et al. (2013), que reforça que a quantidade de energia consumida depende da umidade presente no material, que nesse caso já é reduzida por terem passado as amostras por secagem em estufa antes da trituração.

O segundo, o terceiro, o quarto e o quinto picos se enquadram na faixa de temperatura da terceira perda de massa identificada na TG, entre 372 °C e 592 °C, em média de 386 °C, 467 °C, 484 °C e 573 °C, respectivamente exotérmico, endotérmico, exotérmico e endotérmico. De acordo com Francisco et al. (2009) apud Silva (2011) reações exotérmicas em temperaturas a cerca de 450 °C são originadas pela decomposição de materiais orgânicos, como grupos identificados na FTIR (anéis aromáticos, estruturas de cadeia longa e cadeias alifáticas saturadas) e confirmada pela região onde ocorre a principal queima do material de base orgânica.

Foram realizadas análises para identificação das temperaturas de início, pico e final de reação da curva como um todo. Além desse aspecto foram avaliados os valores de entalpia e fluxo de energia, conforme a Tabela 17.

**Tabela 17** – Dados das análises das curvas DSC dos RSU das curvas obtidas sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/mim.

Amostra	Temperaturas (°C)			Entalpia		Fluxo de energia (W/g)
	onset	pico	endset	J/g	kcal/kg	
RSU CG A	38	585	834	16217	3874,10	7991
RSU CG B	145	468	898	13374	3194,94	5197
RSU CG C	45	591	965	15542	3712,85	8034
RSU CG D	32	610	874	17571	4197,56	8727
<b>Média</b>	65	563	893	15676	3744,86	7487,25

Fonte: Do Autor, 2014.



---

Com base nos resultados apresentados, é possível a indicação do PC dos resíduos sólidos urbanos depositados no lisímetro abastecido com o material produzido e coletado em Campina Grande (PB).

A identificação do poder calorífico da mistura de RSU submetida à queima aconteceu em estágios distintos em termos de faixas de temperatura e, dessa forma, a entalpia, que é a energia de um sistema que pode sair na forma de calor, de toda a reação foi definida como o poder calorífico do material estudado.

O menor valor de entalpia ocorreu no ensaio da amostra RSU CG B, com valores de 13.374 J/g ou 3.194,94 kcal/kg, de forma que o máximo aconteceu no experimento com a amostra RSU CG D, igual a 17.571 J/g ou 4.197,56 kcal/kg.

A média entre os valores de entalpia encontrados nos oito ensaios foi de 15.676 J/g ou 3.744,86 kcal/kg, definindo este valor como o PC do material estudado. Esse valor deve ser considerado interessante, pois, como parâmetro comparativo, segundo Quirino et al. (2004) os valores de poder calorífico da madeira e de resíduos de madeira, utilizados na geração de energia térmica, são iguais a 4.736 kcal/kg e 4.524 kcal/kg, respectivamente.

#### 4.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DIÁRIA E DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RSU DE CAMPINA GRANDE (PB)

Segundo o IBGE (2014), a população de Campina Grande em 2012 foi estimada em 400.002 habitantes quando, de acordo com a ABRELPE (2014), a produção per capita de RSU nesta região do estado da Paraíba foi, em 2013, de 0,871 kg/habitante/dia. Estimou-se, com estas informações e os resultados da composição gravimétrica realizada pelo GGA, a produção diária de RSU na cidade.

A Tabela 18 apresenta a estimativa de produção diária de RSU em Campina Grande.

**Tabela 18** – Produção diária de RSU estimada para Campina Grande.

Fração	Quantidade diária (kg/dia)	Geração per capita (kg/habitante/dia)	Porcentagem (%)
Matéria orgânica	229945,15	0,575	66
Metais	10452,05	0,026	3
Papéis e papelões	17420,09	0,044	5
Plásticos	17420,09	0,096	11
Vidros	38324,19	0,035	4
Têxteis sanitários	13936,07	0,035	4
Compósitos	13936,07	0,009	1
Outros	20904,10	0,052	6
TOTAL	348401,74	0,871	100

Fonte: Do Autor, 2014.

Consideram-se frações com viabilidade para utilização como combustível em técnicas de queima: matéria orgânica, papéis e papelões, plásticos, têxteis sanitários e os materiais inclusos em compósitos e outros com características de boa combustibilidade. Dessa forma, estima-se que cerca de 350 toneladas geradas diariamente não tem seu aproveitamento realizado.

A quantidade de energia necessária para processos de queima de vidros e metais (inorgânicos) é elevada, o que inviabiliza a queima para cogeração de energia e indica a necessidade de outra destinação ao material.

Estimada uma geração diária de RSU de 348.401,74 kg, para uma população de 400.002 habitantes que ocupa 111.852 domicílios (média de 3,58 hab./dom), foi possível a estimativa do desperdício energético (IBGE, 2014).

Segundo EPE (2013), a última pesquisa energética realizada no estado da Paraíba indicou um consumo anual de 1.431 GW.h onde, segundo ENERGISA (2014), o consumo médio mensal em uma residência é de 150 kW.h/mês.

Admitindo um rendimento, de acordo com EPE (2008), na queima de resíduos sólidos urbanos para cogeração de energia elétrica de 20%, e condições estáveis de geração de RSU e funcionamento de um sistema termoelétrico, determina-se o potencial energético dos RSU em Campina grande pelas equações a seguir.

---

$$\text{Potencial} = \text{Quantidade de RSU gerada por dia} \times \text{PC} \quad (2)$$

$$\text{Potencial} = 348.401,74 \text{ kg/dia} \times 3.744,86 \text{ kcal/kg} \rightarrow \text{Potencial} = 1.304.715.740,06 \text{ kcal/dia} = 1.518.551,40 \text{ kW.h/dia}$$

$$\eta = \frac{E_{elétrica}}{E_{térmica}} \quad (3)$$

onde:  $\eta$  é o rendimento,  $E_{elétrica}$  é a quantidade de energia que pode ser gerada e  $E_{térmica}$  é a quantidade de energia térmica de entrada pela queima dos RSU.

$$0,2 = \frac{E_{elétrica}}{1.518.551,40 \text{ kW.h/dia}} \rightarrow E_{elétrica} = 303.710,28 \text{ kW.h/dia}$$

$$Qda = \frac{E_{elétrica}}{Crd} \quad (4)$$

onde:  $Qda$  é a quantidade de domicílios atendidos,  $E_{elétrica}$  é a quantidade de energia que pode ser gerada e  $Crd$  é o consumo residencial diário.

$$Qda = \frac{303.710,28 \text{ kW.h/dia}}{5 \text{ kW.h/domicílio.dia}} \rightarrow 60.742,06 \text{ domicílios}$$

O desperdício de energia térmica diário é de 1.518.551,40 kW.h que, idealizada uma conversão com rendimento de 20% para energia elétrica daria 303.710,28 kW.h, quantitativo que daria para suprir 60.742,06 domicílios com consumo de até 150 kW.h/dia.

Esses resultados permitem afirmar que o resíduo, mesmo que passando 5 anos em condições de controle de aterros sanitários, pode, ainda, ser utilizado para geração de energia.

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**



*Capítulo* **5**

**Conclusões**

---

## 5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi avaliada a degradação e o poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos produzidos na cidade de Campina Grande (PB), depositados em biorreator que simula as condições de um aterro sanitário. Pelo uso das técnicas de FTIR, DRX, TG/DTG e DSC foi possível concluir:

- Os espectrogramas de FTIR indicaram a presença de grupos funcionais orgânicos que impõem às amostras estudadas a condição de serem formadas, basicamente, de materiais orgânicos, como podia ser previsto pelo estudo da composição gravimétrica realizado previamente ao abastecimento do biorreator;
- Os difratogramas de raios-X indicaram que o material é amorfo, característico de materiais orgânicos, com apresentação de picos cristalinos intensos, por ser uma mistura e possuir materiais cristalinos nas amostras como quartzo e hematita (fase do ferro).
- A estabilidade térmica das amostras de RSU indicou que estas passam por cinco etapas de perda de massa associadas à: volatilização de solventes como água e álcoois e à queima de materiais orgânicos como papéis, madeira, parte da matéria orgânica putrescível e borracha natural, à degradação dos materiais poliméricos e à queima de cinzas resultantes das etapas anteriores, com média de perda de massa de 26,8%. Portanto, esse material apresentou baixa estabilidade;
- Confrontando os resultados de TG/DTG com DSC, no primeiro evento de perda de massa há uma reação endotérmica, sendo esta a absorção de energia para volatilização de solventes, e no terceiro aparecem quatro reações, sendo duas endotérmicas

---

seguidas, cada, de uma reação exotérmica, associados às reações de degradação dos materiais de origem orgânica, que absorvem calor para sua degradação e liberam, em seguida, ocorre a liberação de energia;

- São gerados diariamente 348.402 kg de RSU em Campina Grande (PB) e tendo os resíduos sólidos urbanos depositados no biorreator um poder calorífico médio de 3.744,86 kcal/kg, poderiam ser gerados 1.518.551,40 kW.h/dia de energia térmica que, convertida em energia elétrica em condições ideais a um rendimento médio de 20%, resultaria em 303.710,28 kW.h/dia

Com base nos resultados apresentados, pode-se afirmar que, no panorama atual de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Campina Grande (PB), os RSU aparecerem como uma fonte energética é algo interessante, seja para abastecimento de área residencial, industrial ou comercial, garantindo, paralelamente, a manutenção da vida útil do aterro sanitário, pelo desvio do material ou pela redução do volume desses na forma dos subprodutos da queima. Os RSU são gerados inevitavelmente e tem potencial energético devendo, então, serem apreciadas as condições de instalação e operação de um sistema termoelétrico baseado neste material, atendendo as normas que dizem respeito ao controle de poluição pelo sistema.

## 5.1 SUGESTÕES

Ao final da atual pesquisa, sugere-se estudar:

- Estudar cinética de degradação térmica dos resíduos sólidos urbanos como um todo e de suas frações individualmente;
- Realizar ensaios em bomba calorimétrica para confirmação dos resultados obtidos por calorimetria exploratória diferencial;

- 
- Submeter os RSU à incineração e à pirólise para estudar a eficiência de redução mássica, caracterizar os subprodutos e a eficiência energética de cada técnica de queima do material;
  - Realizar uma caracterização mais detalhada do material por técnicas utilizadas como FTIR e DRX, bem como através de Fluorescência de Raios-X, Análise Elementar, Espectrofotometria UV-Vis e Espectrometria de massas.

# **ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**Referências**





---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AcessKENT. **CROSS-SECTION OF AN ACTIVE LANDFILL**. Disponível em: <[http://www.accesskent.com/Departments/DPW/images/landfill\\_diagram.jpg](http://www.accesskent.com/Departments/DPW/images/landfill_diagram.jpg)>. Acesso em: 10 de abril de 2014.

Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba - PERH - PB**. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>. Acesso em: 20 de março de 2014.

ALBERSS, A. P. F., MELCHIADES, F. G., MACHADO, R., **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP. São José dos Campos: 2002.

ALJARADIN, M.; PERSSON, K. M. **Environmental Impact of Municipal Solid Waste Landfills in Semi-Arid Climates - Case Study – Jordan**. The Open Waste Management Journal. Suécia: 2012.

ALVES, T. L. B. et al. **LIXÃO DE CAMPINA GRANDE-PB VERSUS ATERRO SANITÁRIO DE PUXINANÃ: TRANSFERÊNCIA DE PROBLEMA SCIOAMBIENTAL**. Polêmica Revista Eletrônica. Universidade Estadual do Rio de Janeiro - UERJ. Rio de Janeiro: 2013.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2011**. Rio de Janeiro: 2012.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2012**. Rio de Janeiro: 2013.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2013**. Rio de Janeiro: 2014.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Recuperação Energética – Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: 2012.

---

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: 2004. Disponível em: [www.aslaa.com.br/legislacoes](http://www.aslaa.com.br/legislacoes), Acesso em: 02 de janeiro de 2013.

BASTOS, C. dos A. **OBTENÇÃO DE NANOCOMPÓSITOS A BASE DE BENTONITA, AMIDO E QUITOSANA**. Dissertação (apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia). São Paulo:2012.

BELTRÃO, B. A.; MORAIS, F. de; MASCARENHAS, J. de C.; MIRANDA, J. L. F. de; SOUZA JUNIOR, L. C. de; MENDES, V. A.. **Diagnóstico do Município de Campina Grande**. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea Paraíba. Ministério de Minas e Energia. Recife: 2005. Disponível em: [www.cprm.gov.br/rehi/atlas/paraiba/relatorios/CAMP050.pdf](http://www.cprm.gov.br/rehi/atlas/paraiba/relatorios/CAMP050.pdf). Acesso em: 10 de outubro de 2013.

BUENO, Silveira. **Silveira Bueno: minidicionário da língua portuguesa**. 2. ed. São Paulo: FTD, 2007.

CABRAL, A. E. B. **Considerações sobre resíduos sólidos**. Disponível em: [http://www.deecc.ufc.br/Download/Gestao\\_de\\_Residuos\\_Solidos\\_PGTGA/CONSIDERACOES\\_SOBRE\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS.pdf](http://www.deecc.ufc.br/Download/Gestao_de_Residuos_Solidos_PGTGA/CONSIDERACOES_SOBRE_RESIDUOS_SOLIDOS.pdf). Acesso em: 10 de dezembro de 2012.

CAETANO, M. J. L. **Flamabilidade: Temperatura de Auto-Ignição**. Disponível em: [http://www.ctb.com.pt/?page\\_id=1644](http://www.ctb.com.pt/?page_id=1644). Acesso em: 26 de junho de 2014.

CALDAS, A. S. **Geração de Metano Devido à Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos - Estudo de Caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador - BA**. Dissertação (para obtenção de título de mestre em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia. Salvador: 2011.

CALISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. LTC Editora. Rio de Janeiro: 2002.

CARNEIRO et al. **ESTUDO DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA DE OITO ESPÉCIES DA REGIÃO DO SERIDÓ, RIO GRANDE DO NORTE**. Revista Ávore, v. 37, n. 6. Viçosa (MG): 2013.

CARVALHO, J. L. V de. **ESTIMATIVA ENERGÉTICA E RECUPERAÇÃO DE METANO A PARTIR DOS RSU PELO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA E PODER CALORÍFICO: ESTUDO DE CASO BARREIRAS –**

---

**BA.** Dissertação (para obtenção de título de mestre em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia. Salvador: 2013.

CINQUETTI, H. S. **Lixo, resíduos sólidos e reciclagem: uma análise comparativa de recursos didáticos.** Editora UFPR, Educar, Curitiba, n. 23, p. 307-333, 2004. Disponível em: [www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org), Acesso em: 28 de dezembro de 2012.

CONSTANTINO, M. G. **Química Orgânica - Curso Básico Universitário.** Vol. 3. São Paulo: 2006.

COSTA, P. A. da C. **Produção de Hidrocarbonetos Líquidos e Gasosos por Pirólise de Resíduos Plásticos.** Dissertação (para obtenção de título de doutor em Engenharia Química). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa: 2006.

CUNHA, R. S. S. et al.. **SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E APLICAÇÃO DE ARGILA ORGANOFÍLICA NA REMOÇÃO DE ÓLEO LUBRIFICANTE E ÓLEO DIESEL NO PROCESSO DE ADSORÇÃO EM SISTEMA DE BANHO FINITO.** Guarujá: 2014.

DANTAS, E. R. B. **ANÁLISE DO PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO E OPERAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE PUXINANÃ-PB UTILIZANDO O SISTEMA DE INDICADOR DE SUSTENTABILIDADE PRESSÃO-ESTADO-IMPACTO-RESPOSTA (P-E-I-R).** Dissertação (para obtenção de título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: 2013.

DANTAS Filho, F. F. **ESTUDO DO BIO-ÓLEO E CARVÃO OBTIDO A PARTIR DO LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO POR CONVERSÃO À BAIXA TEMPERATURA.** Campina Grande: 2013.

Department for Environment Food & Rural Affairs (DEFRA). **Energy from wastr. A guide to the debate.** Londres: 2014.

DONOSO, J. P. **Espectroscopia Infravermelha: Moléculas.** São Paulo: 2012.

DUARTE JUNIOR, A. P. et al. **CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANA.** São Pedro (SP): 2010.

EESI. **Reconsidering Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Feedstock.** Disponível em: [www.e-renewables.com](http://www.e-renewables.com), Acesso em: 03 de janeiro de 2013.

---

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro: 2013.

CORNIERI, M. G. **PROGRAMA MUNICIPAL DE COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM SANTO ANDRÉ – SP: UM ESTUDO A PARTIR DO CICLO DA POLÍTICA (POLICY CYCLE)**. São Paulo: 2011.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro: 2008.

ENERGISA. **Indicadores**. Disponível em: <<http://www.borborema.energisa.com.br/Borborema/Energisa%20Borborema/IndicadoresBO.aspx>>. Acesso em 20 de julho de 2014.

Environmental Protection Agency (EPA). **Landfills and Combustion**. Disponível em: <[http://www.epa.gov/osw/education/quest/pdfs/sections/u2\\_chap4.pdf](http://www.epa.gov/osw/education/quest/pdfs/sections/u2_chap4.pdf)>. Acesso em: 10 de março de 2014.

Environmental and Energy Study Institute (EESI). **Reconsidering Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Feedstock**. Disponível em: [www.e-renewables.com](http://www.e-renewables.com), Acesso em: 03 de janeiro de 2013.

E-RENEWABLES. **Waste to Energy**. Disponível em: [www.e-renewables.com](http://www.e-renewables.com), Acesso em: 03 de janeiro de 2013.

FALLAVENA, V. L. V. et al. **CARACTERIZAÇÃO DETALHADA DE MATERIAL DE REFERÊNCIA CERTIFICADO DE CARVÃO**. Porto Alegre: 2013.

FERREIRA, A. B. de. **Mini Aurélio Século XXI: O minidicionário da língua portuguesa**. 4. ed. rev. ampliada. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001.

FONSECA, J. C. L. da. **MANUAL PARA GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS PERIGOSOS**. Cultura Acadêmica. São Paulo: 2009.

FREITAS, J. C. C. **Técnicas de Análises Térmicas: Princípios e Aplicações**. Departamento de Física da UFES. Espírito Santo: 2002.

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais**. Belo Horizonte: 2012.

GARCEZ, L. R. **ESTUDO DOS COMPONENTES TÓXICOS EM UM BIORREATOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE - PB**. Campina Grande: 2009.

---

GARCILASSO, V. P.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T.. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente de Aterro Sanitário - Estudo de Caso**. São Paulo: 2010.

GIOLITO, M. L. **Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo: 2004.

GONÇALVES, A. T. T. **Potencialidade Energética dos Resíduos Sólidos Domiciliares e Comerciais do Município De Itajubá - MG**. Itajubá: 2007.

GONÇALVES, C. K. **Pirólise e Combustão de Resíduos Plásticos**. Dissertação (para obtenção de título de mestre em Engenharia). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo: 2007.

GRIMBERG, E. **A Política Nacional de Resíduos Sólidos: a responsabilidade das empresas e a inclusão social**. São Paulo: 2004.

HAACK, M. DE S. **ANÁLISE DE MATERIAIS POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO DENTRO DO SISTEMA DE GESTÃO DE QUALIDADE CONFORME ABNT NBR ISO/IEC 17025**. Porto Alegre: 2010.

INDA Junior, A. V. et al.. **Goethite and hematite variability via reductive dissolution in soils from tropical and subtropical regions**. Rev. Bras. Ciênc. Solo vol. 29 no. 6. Viçosa: 2005.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Campina Grande**. Disponível em:  
<[http://www1.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?lang=\\_ES&codmun=250400&search=paraiba|campina-grande](http://www1.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?lang=_ES&codmun=250400&search=paraiba|campina-grande)>. Acesso em: 12 de março de 2014.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: 2010.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. **Gestão de Resíduos Sólidos na Região Metropolitana de São Paulo - Avanços e Desafios**. São Paulo em Perspectiva, v. 20, n. 2, p. 90-104. São Paulo: 2006.

LAURENTI, K. C. **Avaliação da Presença de Gordura em Tecido Muscular e Carnes Usando DTA e TG**. Dissertação (para obtenção do título de Mestre em Bioengenharia). Universidade de São Paulo. São Carlos: 2007.

---

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande – Paraíba**, Dissertação de Mestrado. UFCG. 2008a.

LEITE, J. G. **Aplicação das Técnicas de Espectroscopia FTIR e de Micro Espectroscopia Confocal Raman à Preservação do Patrimônio**. Porto – POR: 2008b.

LEITE, V. D.; SILVA, S. A.; SOUZA, J. T.; LOPES, W. S.; MESQUITA, E. M. N. **Análise quali-quantitativa dos resíduos sólidos urbanos produzidos pela população da cidade de Campina Grande - PB**. Campina Grande: 2007.

LIBÂNIO, P. A. **Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume**. Belo Horizonte: 2002.

MARTINS, T. **CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO POR TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS E DRX**. Dissertação (apresentada para obtenção do título de Mestre em Química Aplicada). Ponta Grossa: 2009.

MATTHEWS, M. **Investigation into the Environmental, Social and Economic Impacts of a Potential Banning of Used Tyres to Landfill and of Mandatory Recycling of Used Tyres**. S3 – Sustainable Strategic Solutions. Austrália: 2006.

MORAIS, C. R. da S. **Análises Térmicas**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: 2012.

MORAIS, F. E. de. **Estudo termoanalítico de medicamentos de referência, genérico e similar**. Dissertação (para obtenção do título de Mestre). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: 2011.

MUNDSTOCK, K. B. et al.. **Processing and characterization of snpc (SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O-CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) glass-ceramic foams**. Quím. Nova vol.33 no. 3. São Paulo: 2010.

NAYONO, S. E. **Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production**. Dissertação (Faculdade de Engenharia Civil, Geo-Ambiental e Ciências da Universidade Fridericana para Karlsruhe (TH)). Alemanha: 2009.

NETZSCH. **Thermal Properties of Polymers**. Disponível em:<<http://www.netzsch-thermal->

---

analysis.com/uploads/tx\_nxnetzschmedia/files/TPoP\_web\_mit\_Hervorhebung.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2014.

Núcleo de Formação Contínua (NUFOR). **Química do Fogo**. Disponível em: <[www.nufor.uevora.pt/ficheiros/download/26](http://www.nufor.uevora.pt/ficheiros/download/26)>. Acesso em: 14 de julho de 2014.

OLIVEIRA, P. R. de. **Aplicações da Termogravimetria (TG) e Termogravimetria derivada (DTG)**. PÓS-FASUL. Toledo: 2011.

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos plásticos e de biomassa**. Dissertação (para obtenção do título de mestre em Bioenergia). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa: 2007.

PERIOTTO, D. **Tabela de Valores de Absorção no Espectro de Infravermelho para Compostos Orgânicos**. São Carlos: 2012.

PEZZIN, S. **ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO - Parte 2**. Florianópolis: 2010.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). **Atlas Brasil 2013**. Disponível em: <[http://www.pnud.org.br/IDH/Atlas2013.aspx?indiceAccordion=1&li=li\\_Atlas2013](http://www.pnud.org.br/IDH/Atlas2013.aspx?indiceAccordion=1&li=li_Atlas2013)>. Acesso em: 10 de janeiro de 2014.

RANGEL, G. W. A. **Drifração de Raios-X para análise do concreto**. Seminário. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: 2011.

RECIVALONGO. **Gestão de Resíduos**. Disponível em: [www.recivalongo.pt](http://www.recivalongo.pt), Acesso em: 04 de janeiro de 2013.

REICHERT, F. **Tecnologias de tratamento de resíduos sólidos urbanos - Análise da política e da prática europeia de gestão**. Rio de Janeiro: 2009.

RIBEIRO, L. da S. **ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ATRAVÉS DOS PARÂMETROS FÍSICOS E FÍSICO- QUÍMICOS EM UM BIORREATOR DE ESCALA EXPERIMENTAL**. Dissertação (para obtenção de título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: 2012.

RODRIGUES, G. V.; MARCHETTO, O. **Análises Térmicas**. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina: 2002.

---

ROMEIRO, G. A. **INTRODUÇÃO DO PROJETO CBT**. Disponível em: <[http://www.uff.br/posorganica/gilbertoromeiro/proj\\_int.html](http://www.uff.br/posorganica/gilbertoromeiro/proj_int.html)>. Acesso em: 20 de dezembro de 2013.

SALOMÃO, A. **O Grande Negócio do Lixo**. Brasil: 2011.

SANCHEZ, C. G. **Tecnologia da Gaseificação**. UNICAMP. São Paulo: 2005.

SANTOS, M. L. dos et al. **ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE ESTOCAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR POR ANÁLISE TÉRMICA**. Quim. Nova, vol. 34 nº 3. Franca (SP): 2011.

SANTOS, P. de S. **CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ARGILAS**. Editora Edgard Blucher Ltda, vol. 2. São Paulo: 1989.

SCHALCH, V. et al. **Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. São Carlos: 2002.

Secretaria do Meio Ambiente (SMA). **Resíduos da Construção Civil e o Estado de São Paulo**. São Paulo: 2012.

SHIMADZU. **XRD – 6000. Shimadzu X-ray Diffractometer**. Tóquio: 2014.

SILVA Filho, C. R. V. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL E NO MUNDO**. São Paulo: 2010.

SILVA, A dos S. **AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE-PB**. Dissertação (para obtenção de título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: 2012.

SILVA, F. J. da et al.. **Cimentos Geopoliméricos**. Disponível em: <<http://www.sm2000.coppe.ufrj.br/mirror/sarra/artigos/artigo10055/index.html>>. Acesso em: 10 de março de 2013.

SILVA, J. de O. **CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO DMAE- URBELÂNDIA - MG**. Dissertação (para obtenção de título de Mestre em Química)Uberlândia: 2011.

SILVEIRA, A. J. de A. **Química Orgânica Teórica**. UFPA. Belém: 2010.



---

SILVEIRA, F. L. da. **Termodinâmica: vaporização da água**. Porto Alegre: 2013.

SOARES, E. P. **CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES INORGÂNICOS E TIPOS DE POLÍMEROS EM MATERIAIS PLÁSTICOS METALIZADOS**. Dissertação (apresentada para obtenção do título de mestre em Ciências). São Paulo: 2002.

SOUZA, G. P. et al.. **Caracterização de material compósito diatomáceo natural**. Campos dos Goytacazes: 2003.

SPAGNOLLO, E. et al. **CARBONO E NITROGÊNIO NAS FRAÇÕES LEVE E ESTÁVEL DA MATÉRIA ORGÂNICA EM CAMPO NATURAL SUBMETIDO A QUEIMA**. Santa Maria: 2002.

TESINI, M. **Teste de Conteúdo Biogênico de Combustíveis Derivados de Resíduos via ASTM D6866**. Disponível em: [www.wtert.com.br](http://www.wtert.com.br), Acesso em: 04 de janeiro de 2013.

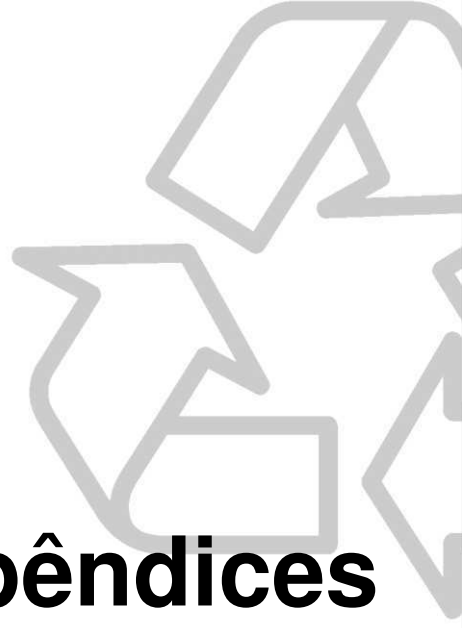
UERJ. **Tecnologia de Plasmas**. Disponível em: [www.antaq.gov.br](http://www.antaq.gov.br), Acesso em: 06 de janeiro de 2013.

VOLLAND, W. **Organic Compound Identification Using Infrared Spectroscopy**. Bellevue (EUA): 1999. BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília: 2010.

XARÁ, S. **A Incineração de Resíduos em Portugal**. Debater a Europa. Periódico do CIEDA e do CIEJD, nº 1. Portugal: 2009.

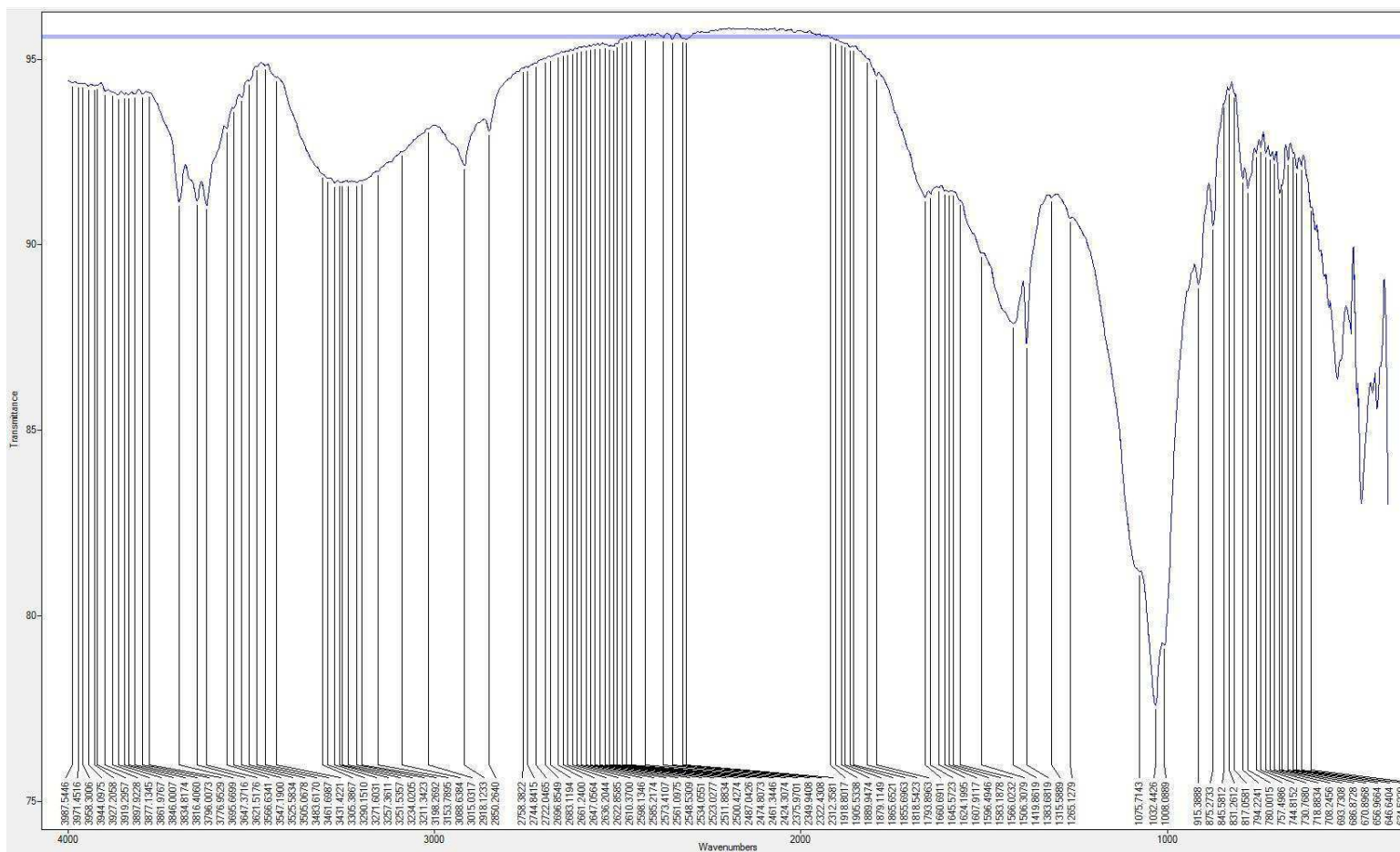
**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO E DO PODER CALORÍFICO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**Apêndices**



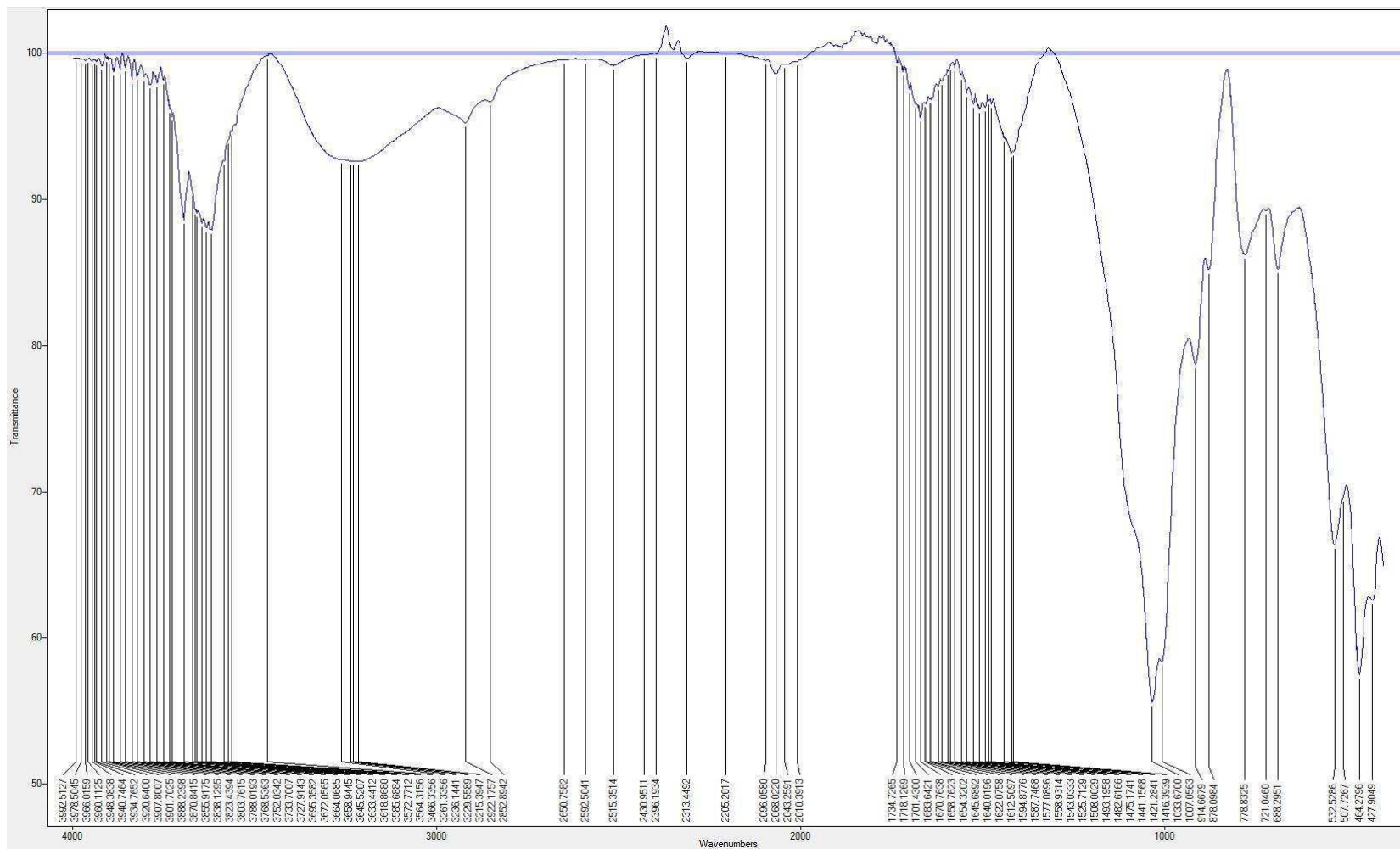
## APÊNDICE A – Espectrogramas das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator

Figura A.1 – Espectrograma da amostra RSU CG A.



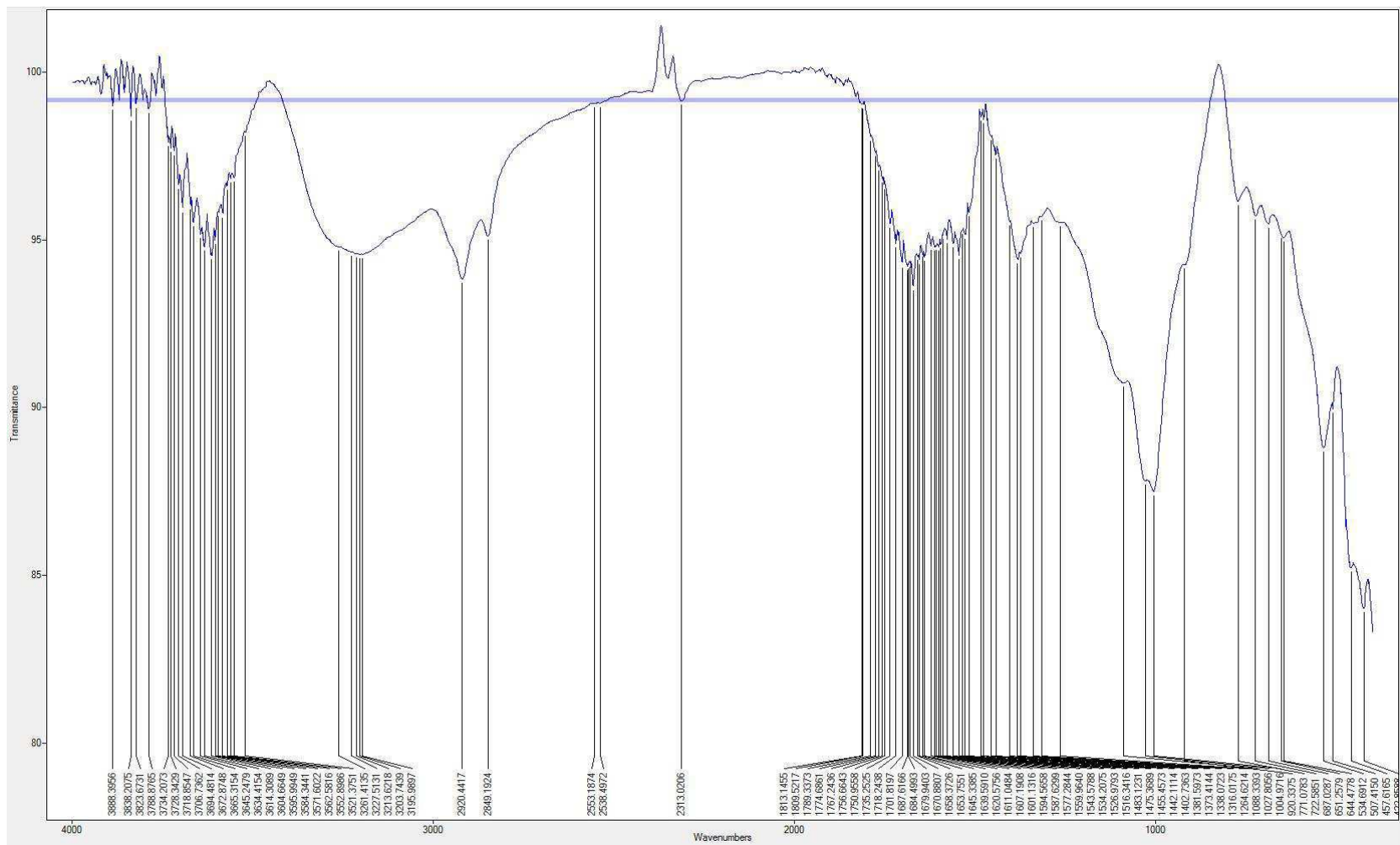
Fonte: Do Autor, 2014.

Figura A.2 – Espectrograma da amostra RSU CG B



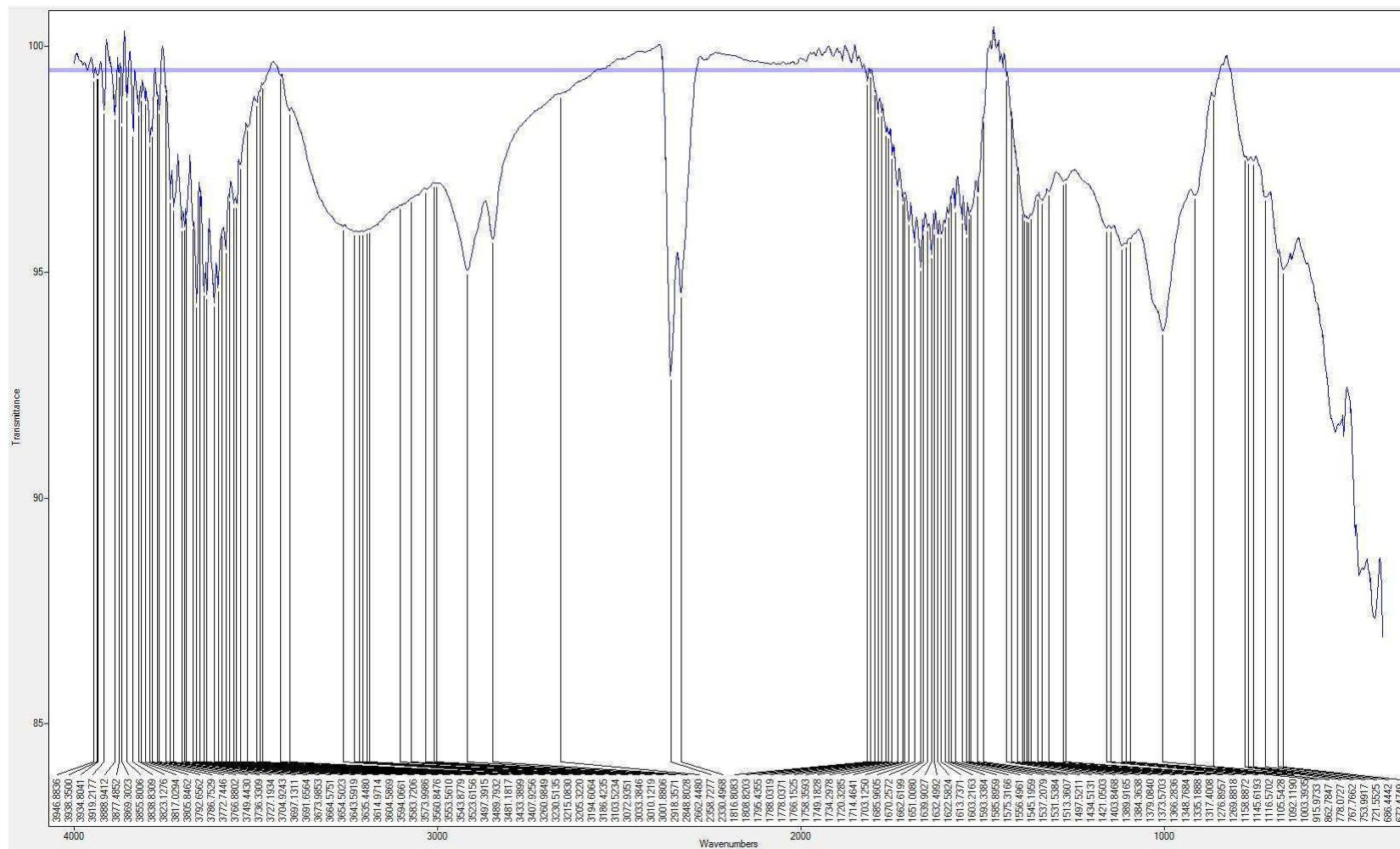
Fonte: Do Autor, 2014.

Figura A.3 – Espectrograma da amostra RSU CG C.



Fonte: Do Autor, 2014.

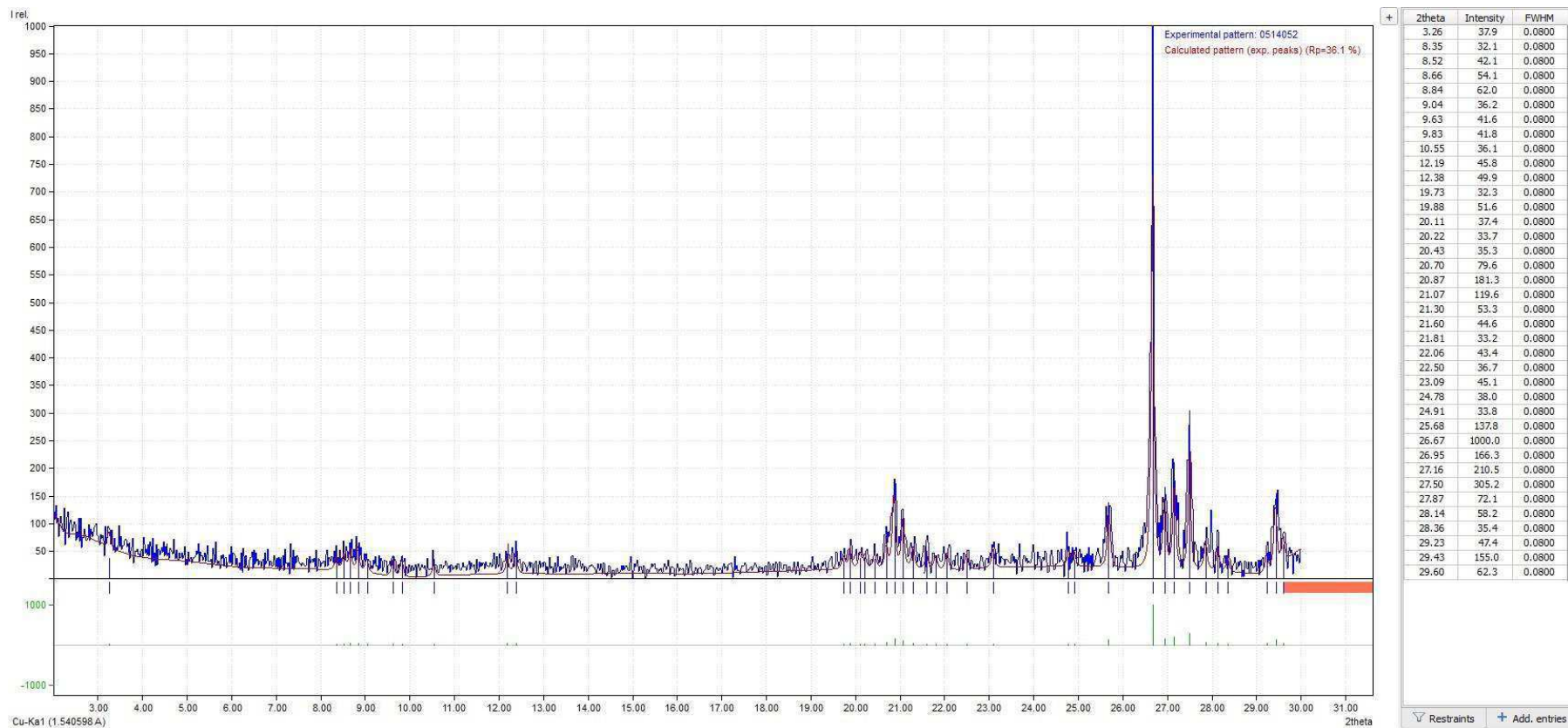
Figura A.4 – Espectrograma da amostra RSU CG D.



Fonte: Do Autor, 2014.

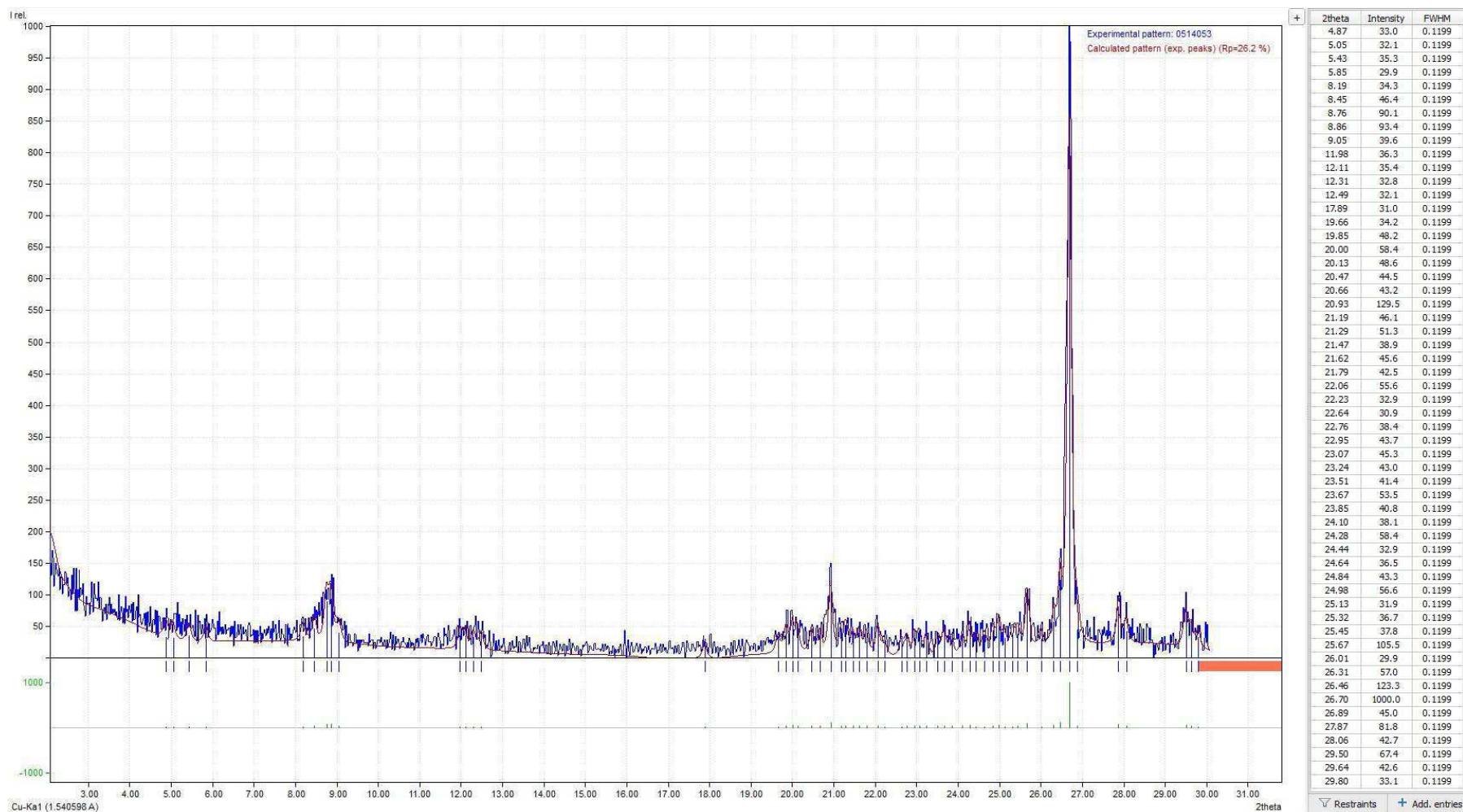
## APÊNDICE B – Difractogramas das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator

Figura B.1 – Análise do Difractograma da amostra RSU CG A.



Fonte: Do Autor, 2014.

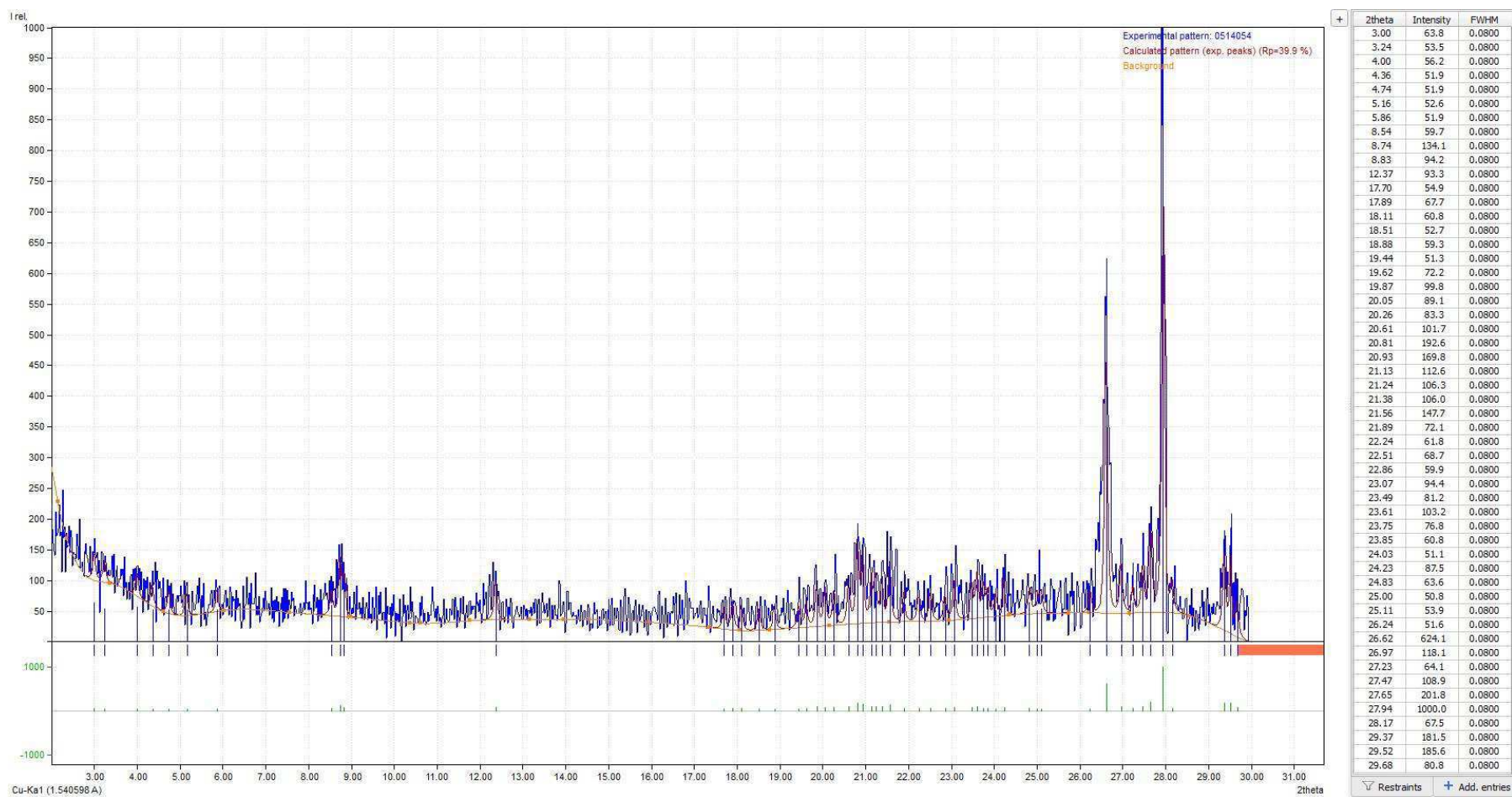
**Figura B.2 – Análise do Difratograma da amostra RSU CG B.**



Fonte: Do Autor, 2014.

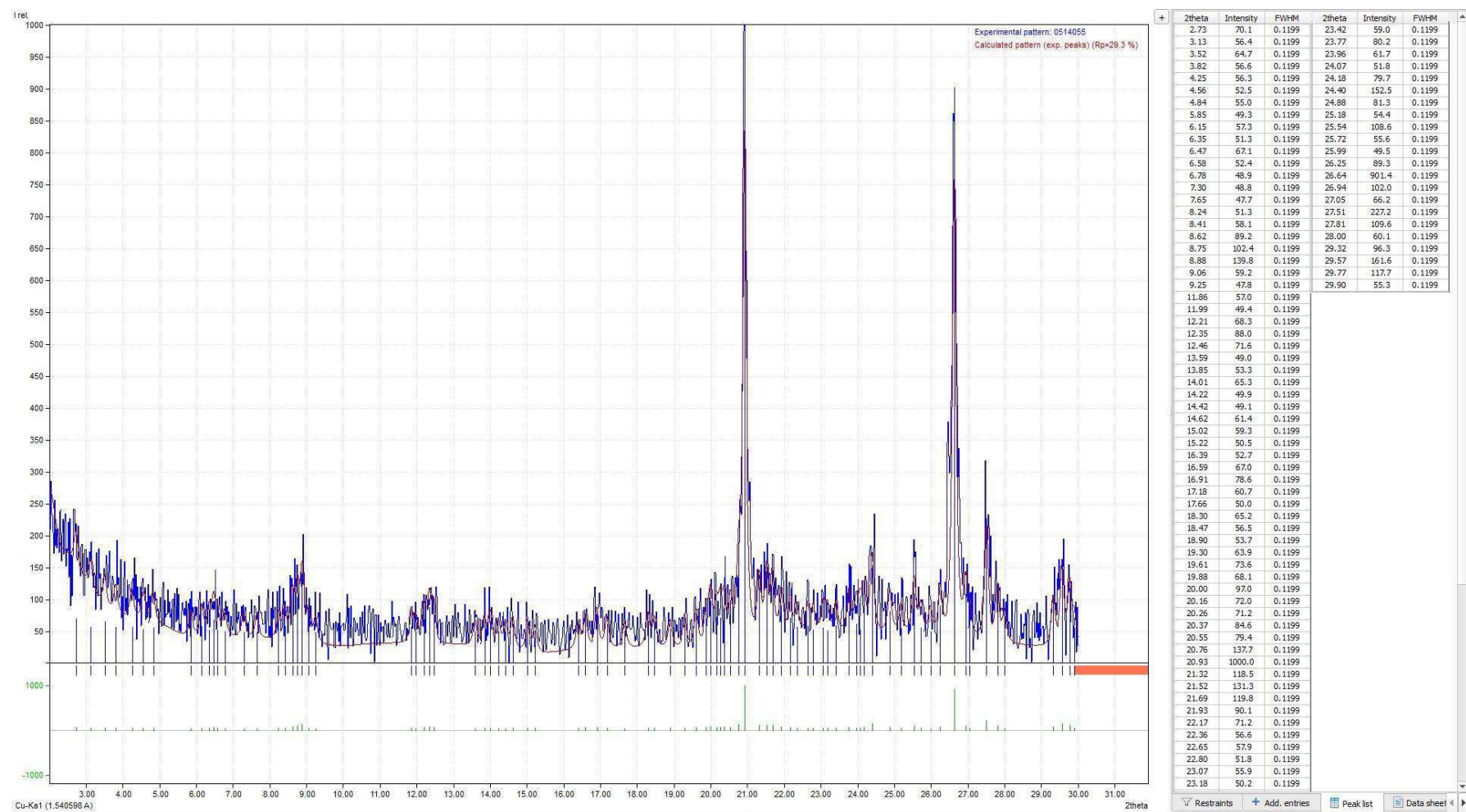


**Figura B.3 – Análise do Difratoograma da amostra RSU CG C.**



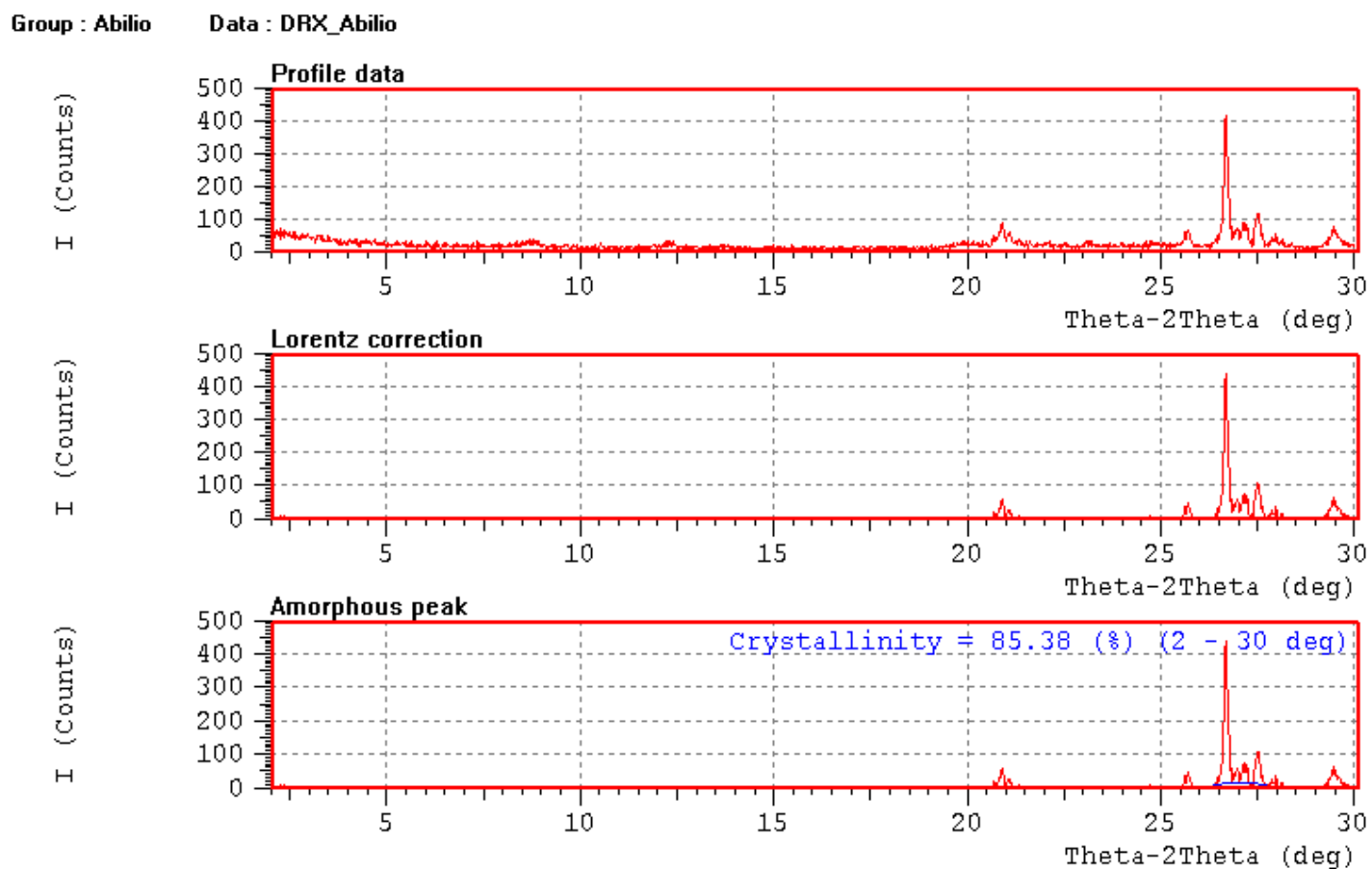
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura B.4 – Análise do Difratograma da amostra RSU CG D.**



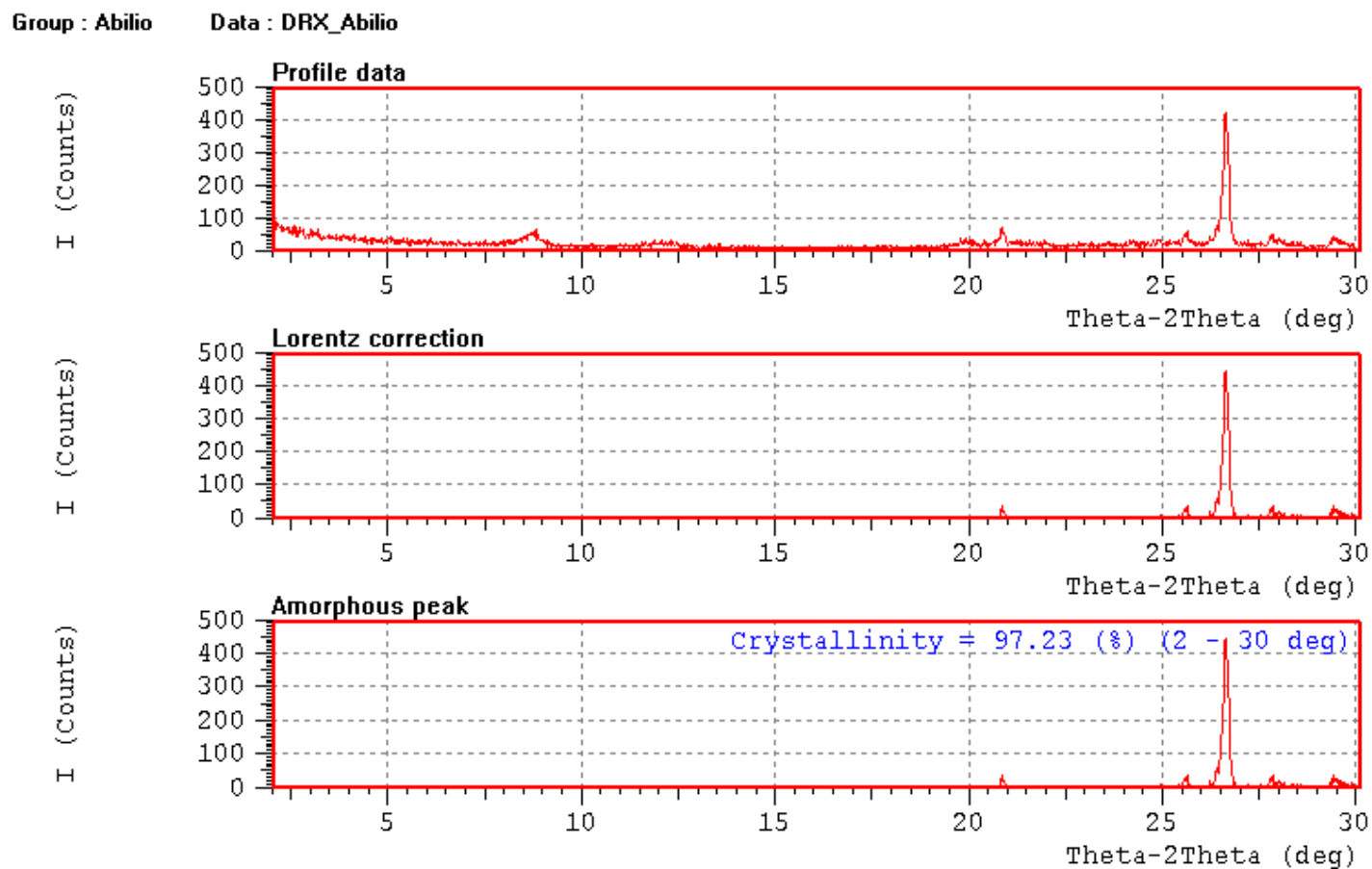
Fonte: Do Autor, 2014.

Figura B.5 – Análise da cristalinidade da amostra RSU CG A.



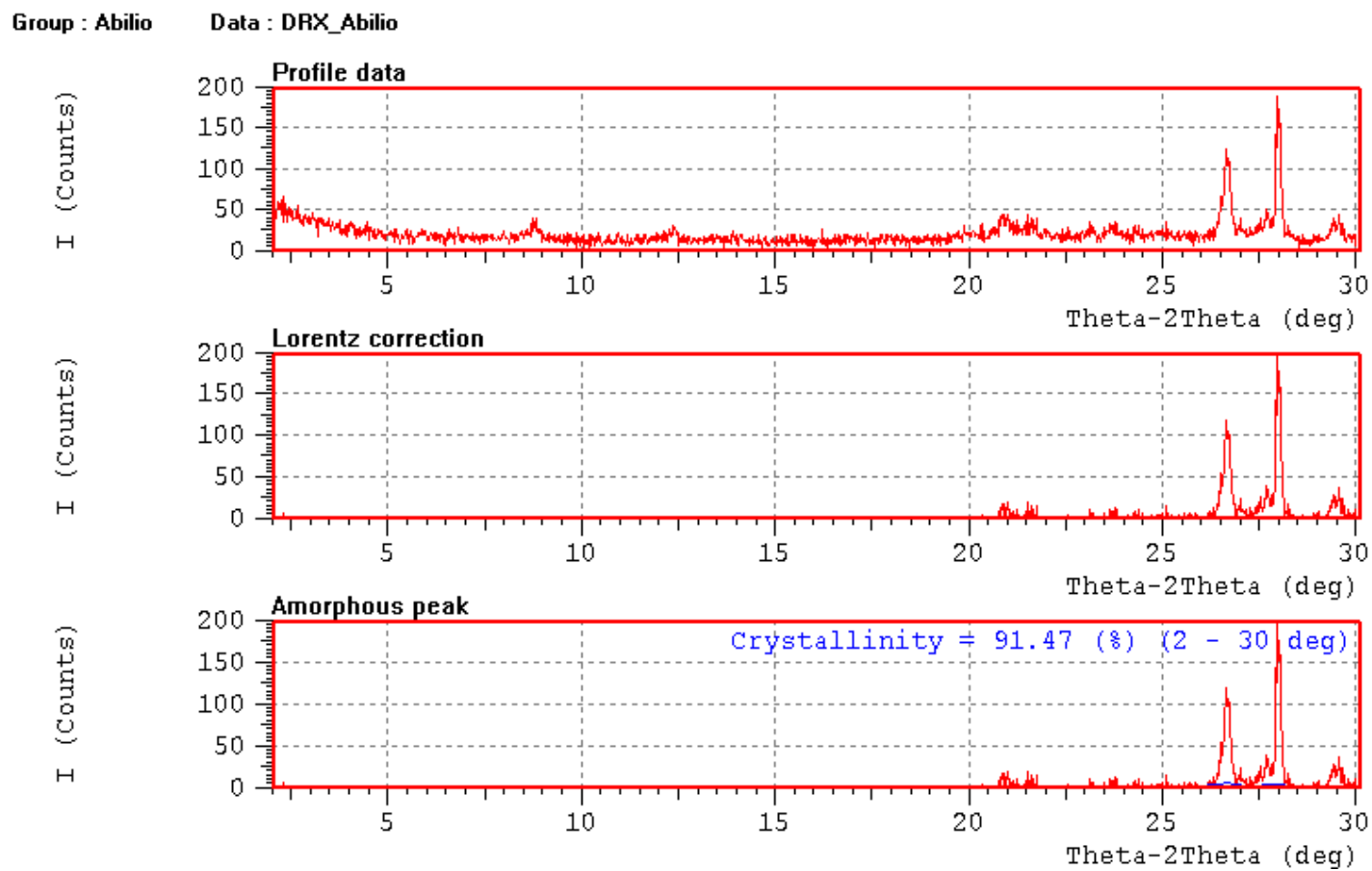
Fonte: Do Autor, 2014.

Figura B.6 – Análise da cristalinidade da amostra RSU CG B.



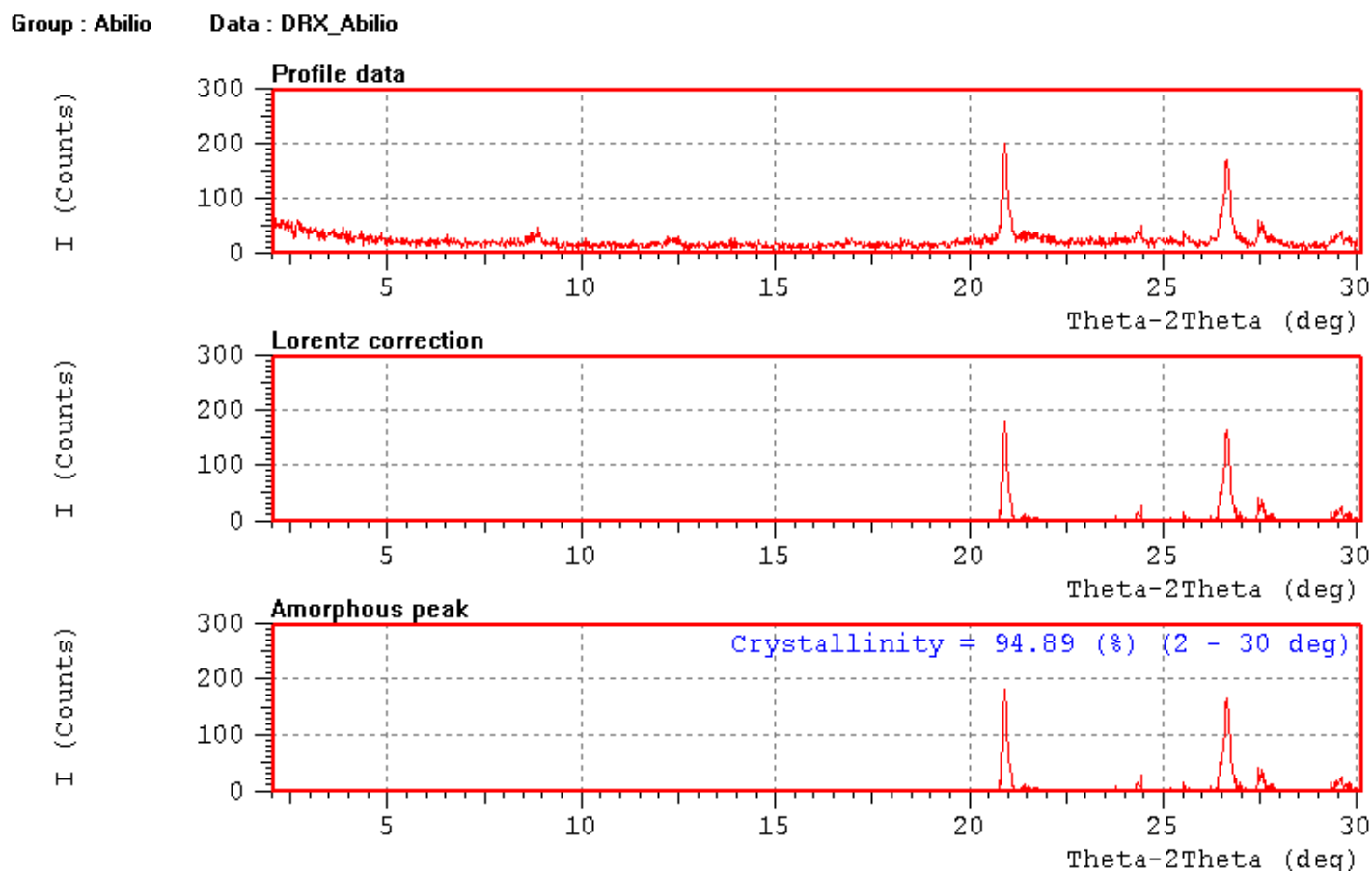
Fonte: Do Autor, 2014.

Figura B.7 – Análise da cristalinidade da amostra RSU CG C.



Fonte: Do Autor, 2014.

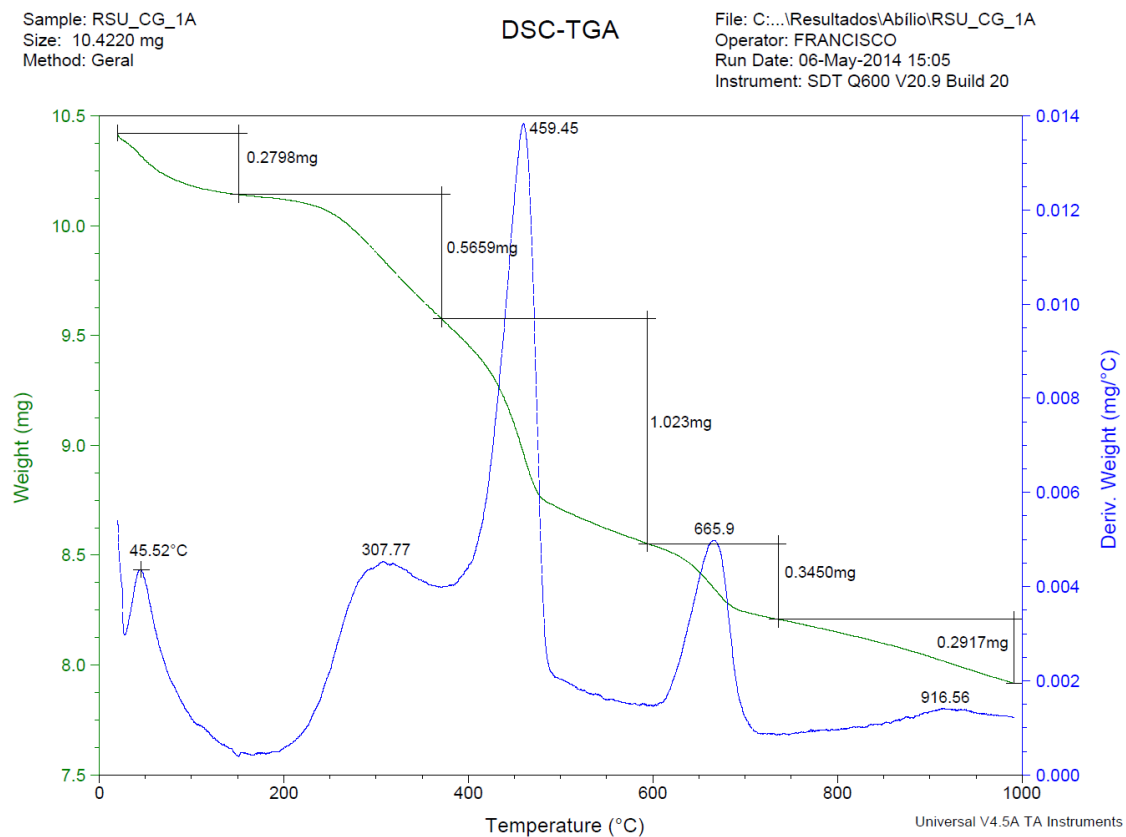
Figura B.8 – Análise da cristalinidade da amostra RSU CG D.



Fonte: Do Autor, 2014.

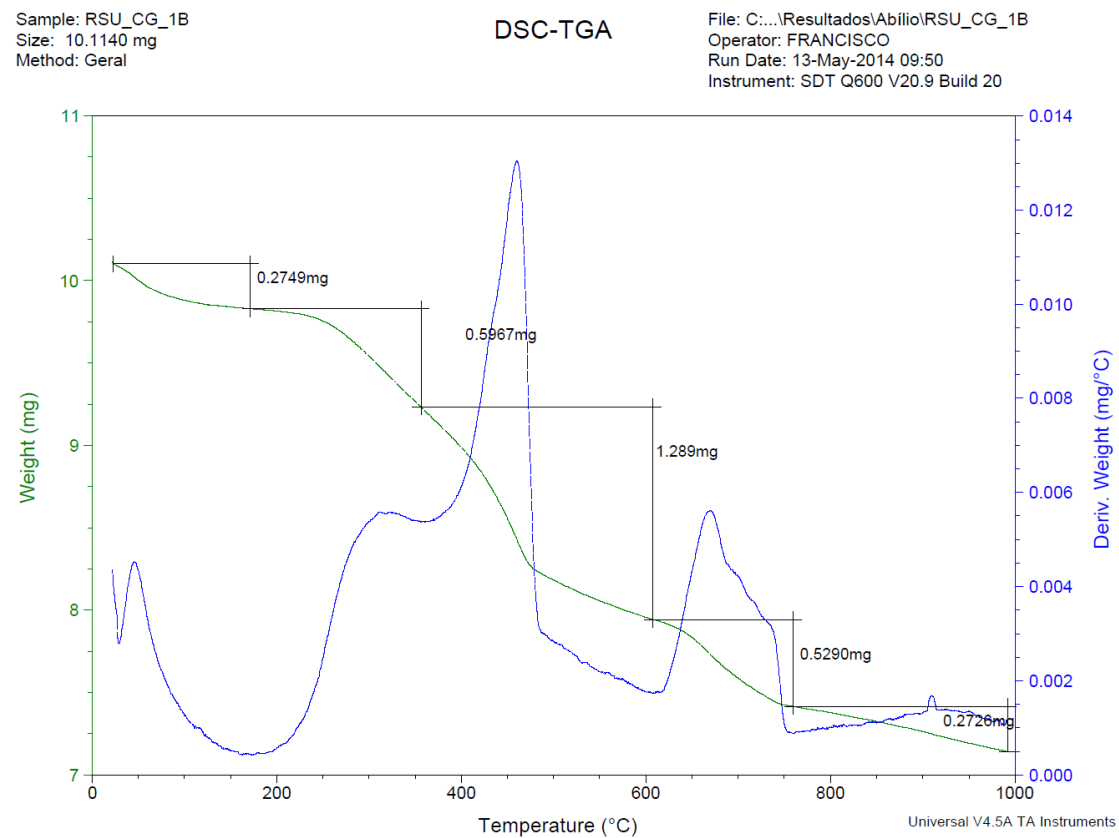
## APÊNDICE C – Curvas TG/DTG das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator

**Figura C.1** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



Fonte: Do Autor, 2014.

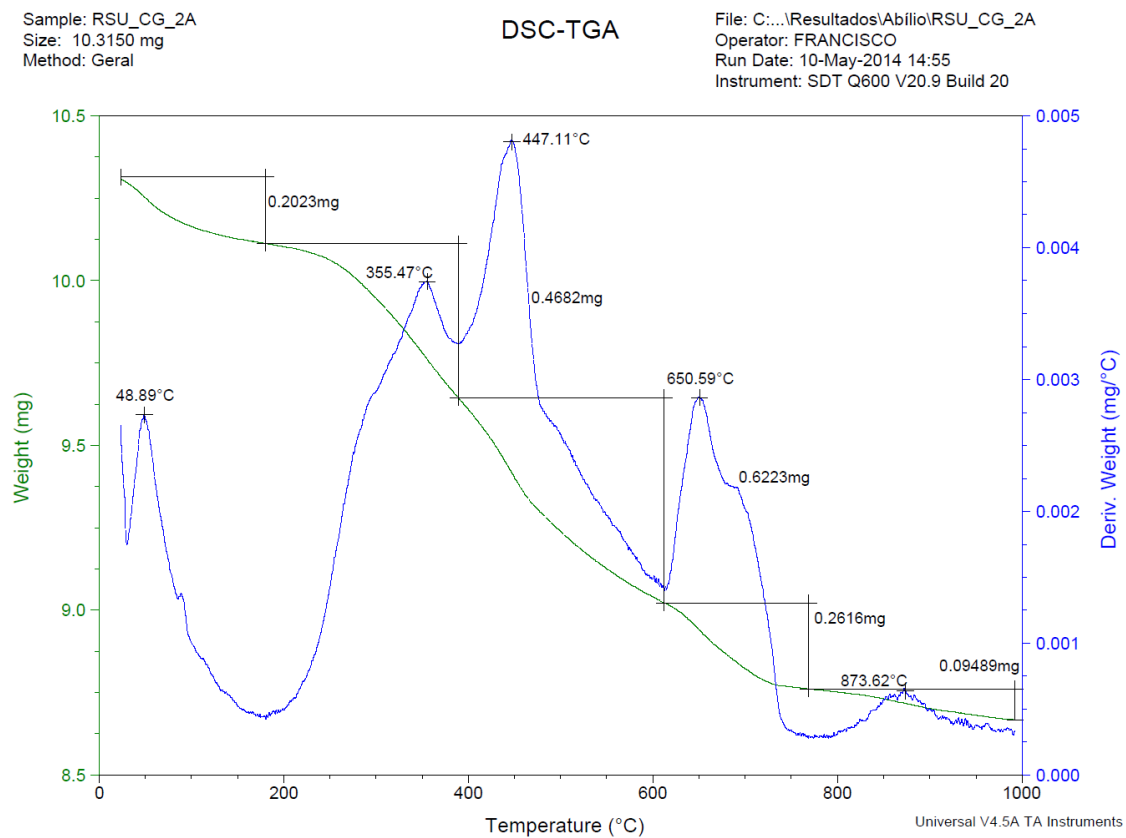
**Figura C.2** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



Fonte: Do Autor, 2014.

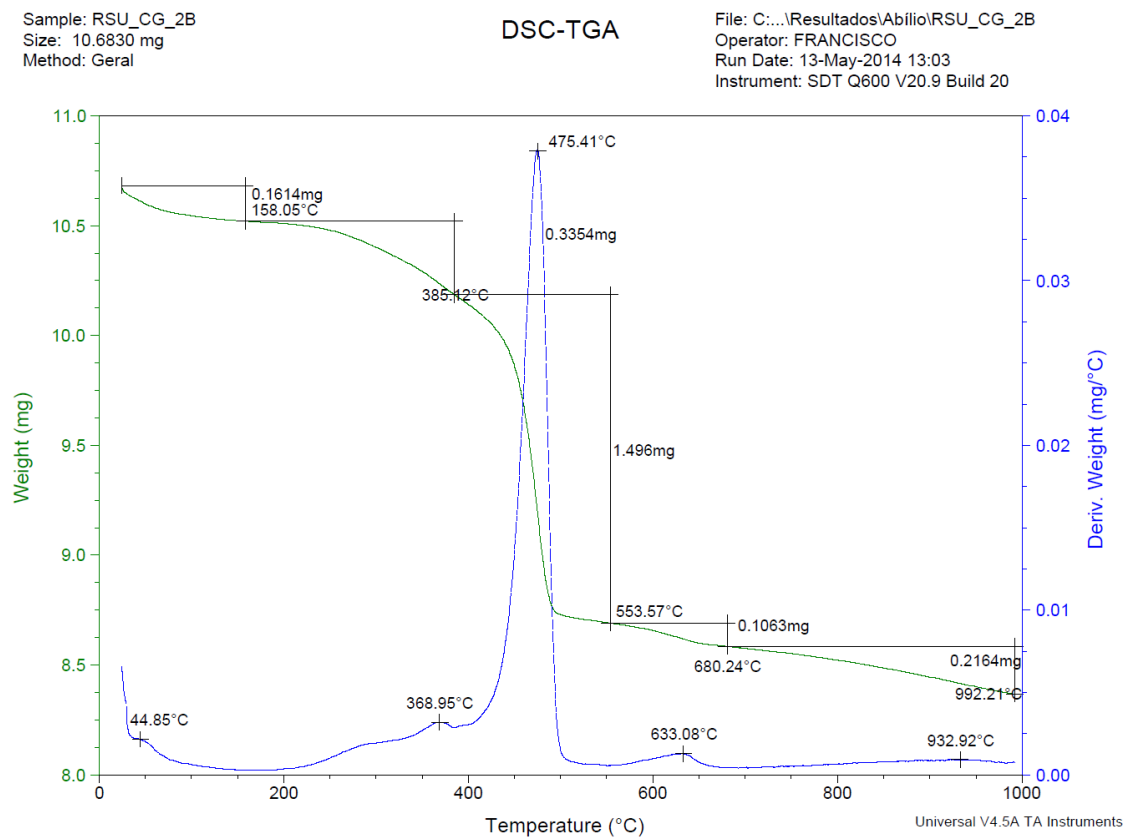


**Figura C.3** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



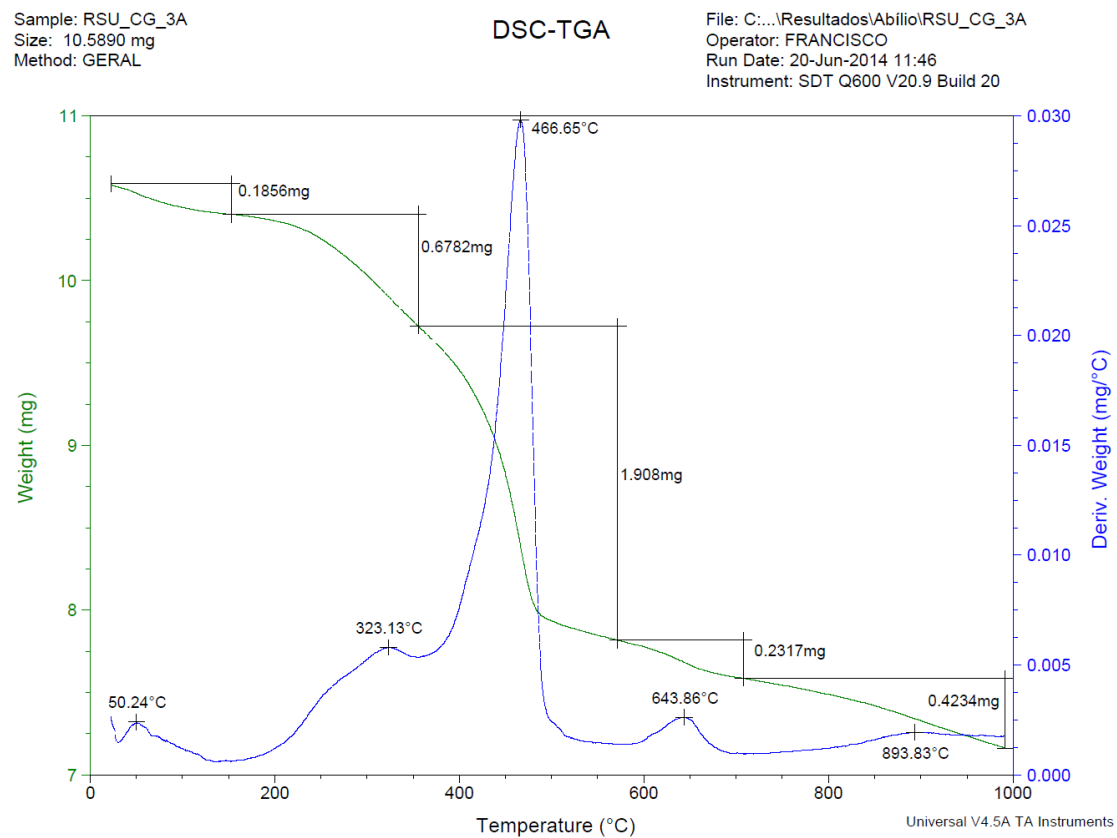
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura C.4** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



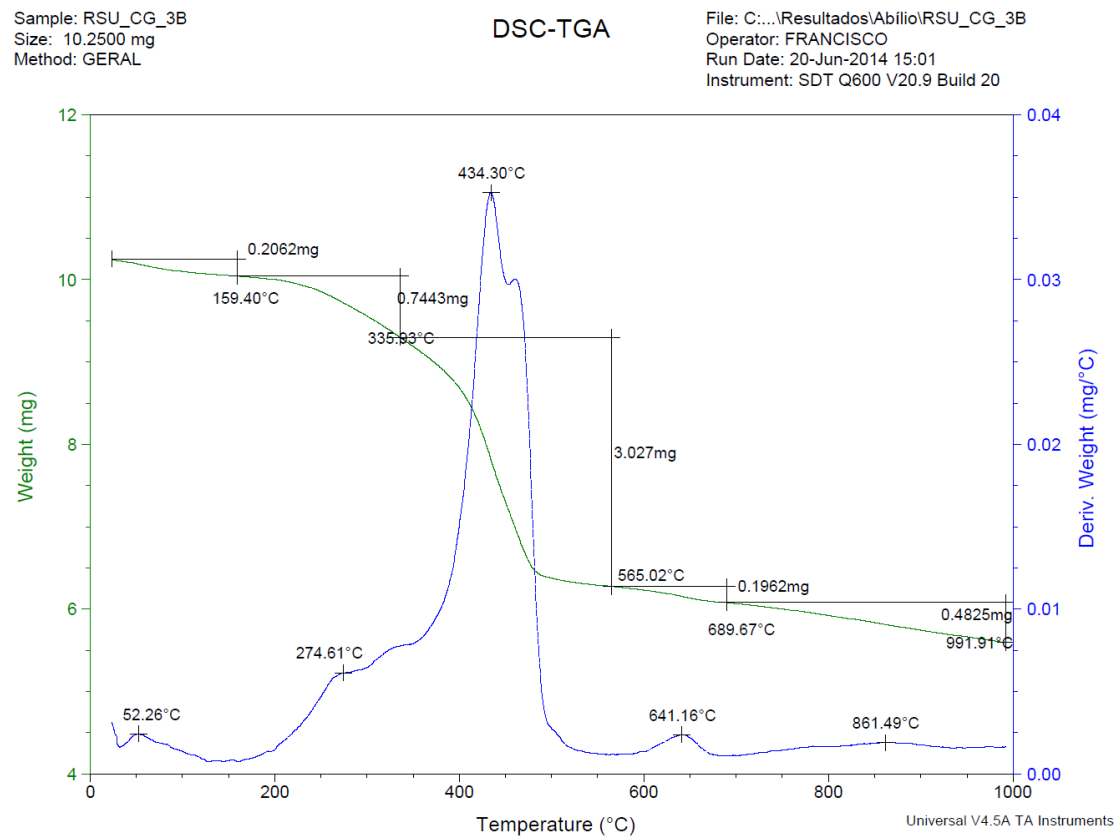
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura C.5** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



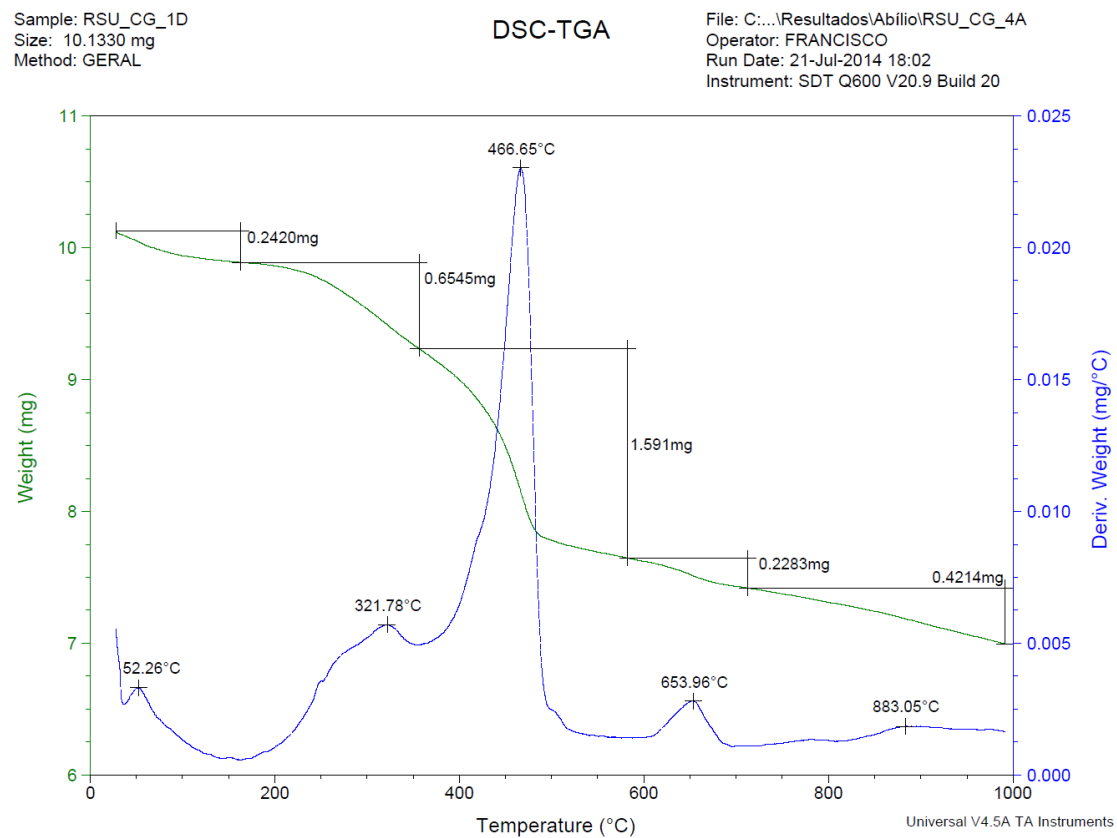
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura C.6** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



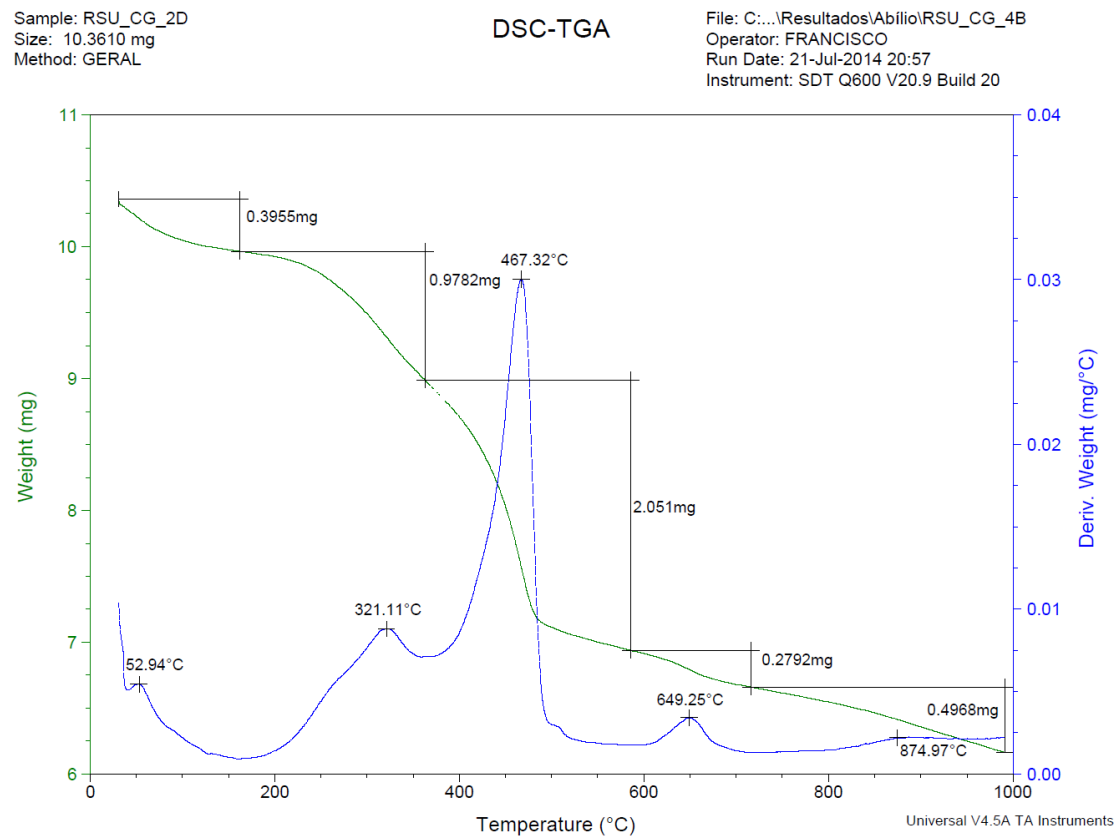
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura C.7** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



Fonte: Do Autor, 2014.

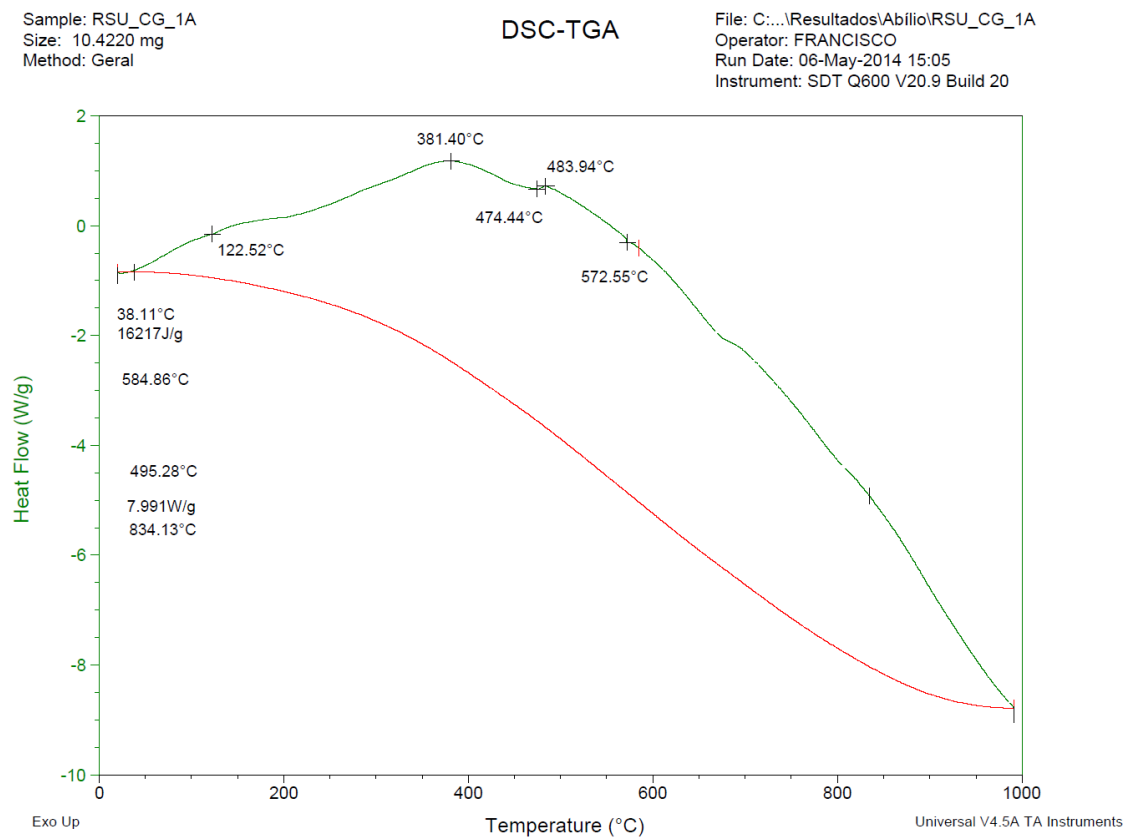
**Figura C.8** – Curvas TG/DTG da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



Fonte: Do Autor, 2014.

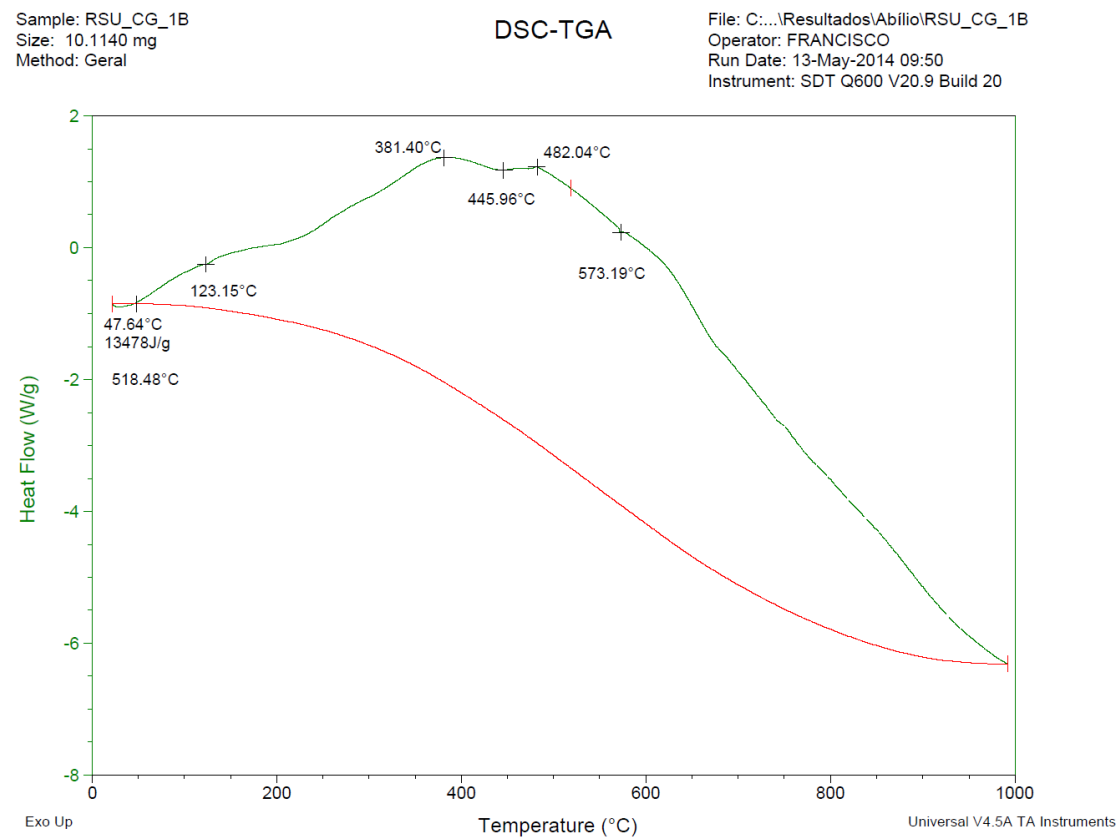
## APÊNDICE D – Curvas DSC das amostras de resíduos sólidos urbanos coletadas no biorreator

**Figura D.1** – Curva DSC da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



Fonte: Do Autor, 2014.

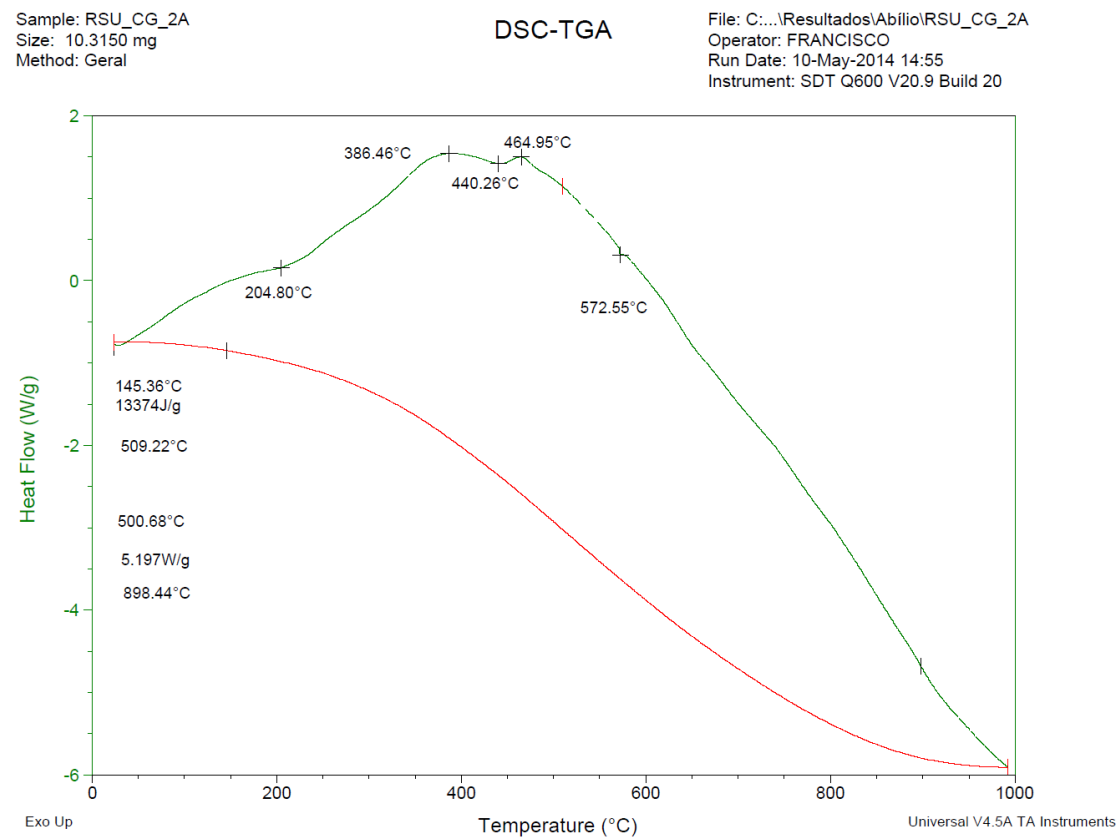
**Figura D.2** – Curva DSC da amostra RSU CG A sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



Fonte: Do Autor, 2014.

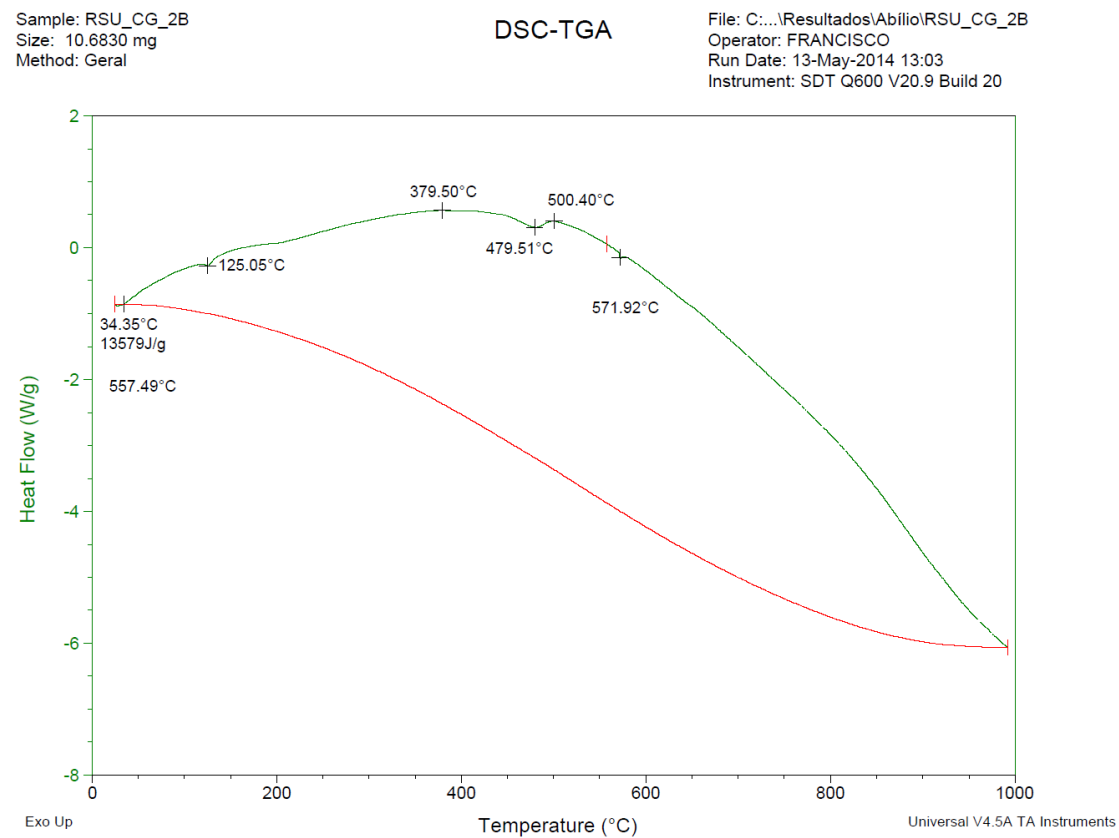


**Figura D.3** – Curva DSC da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



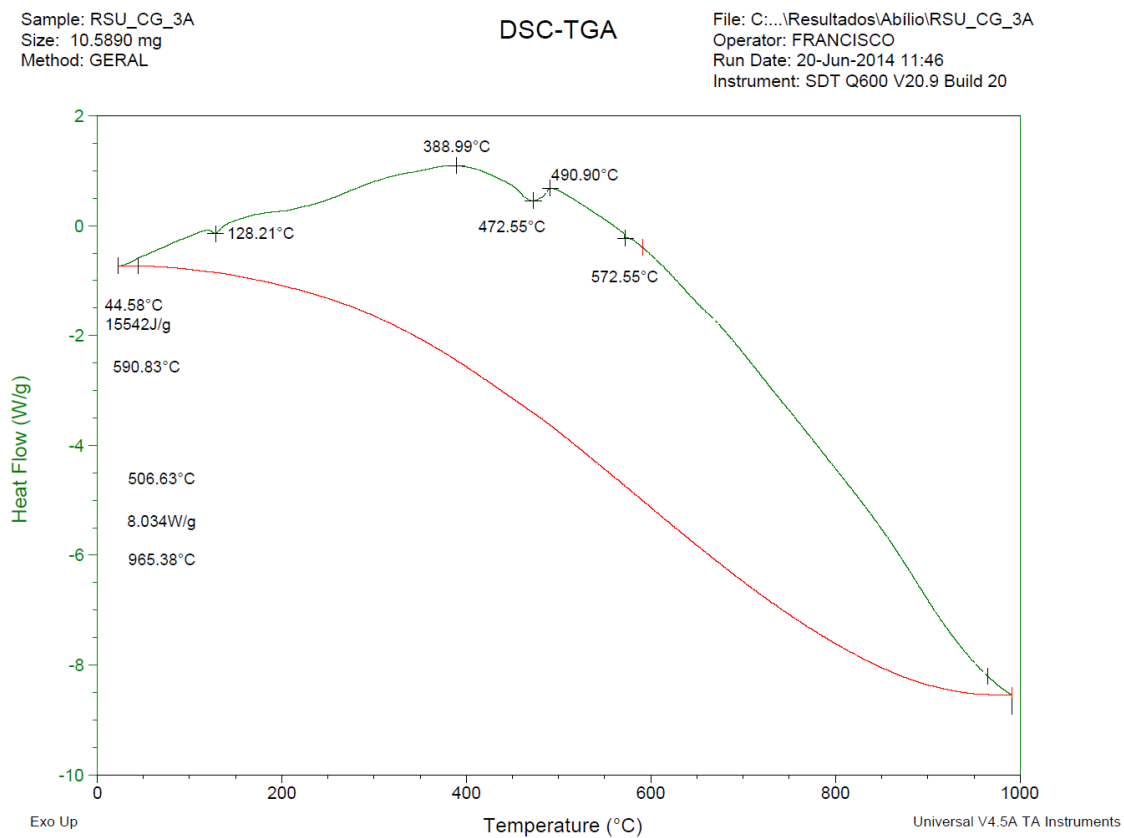
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura D.4** – Curva DSC da amostra RSU CG B sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



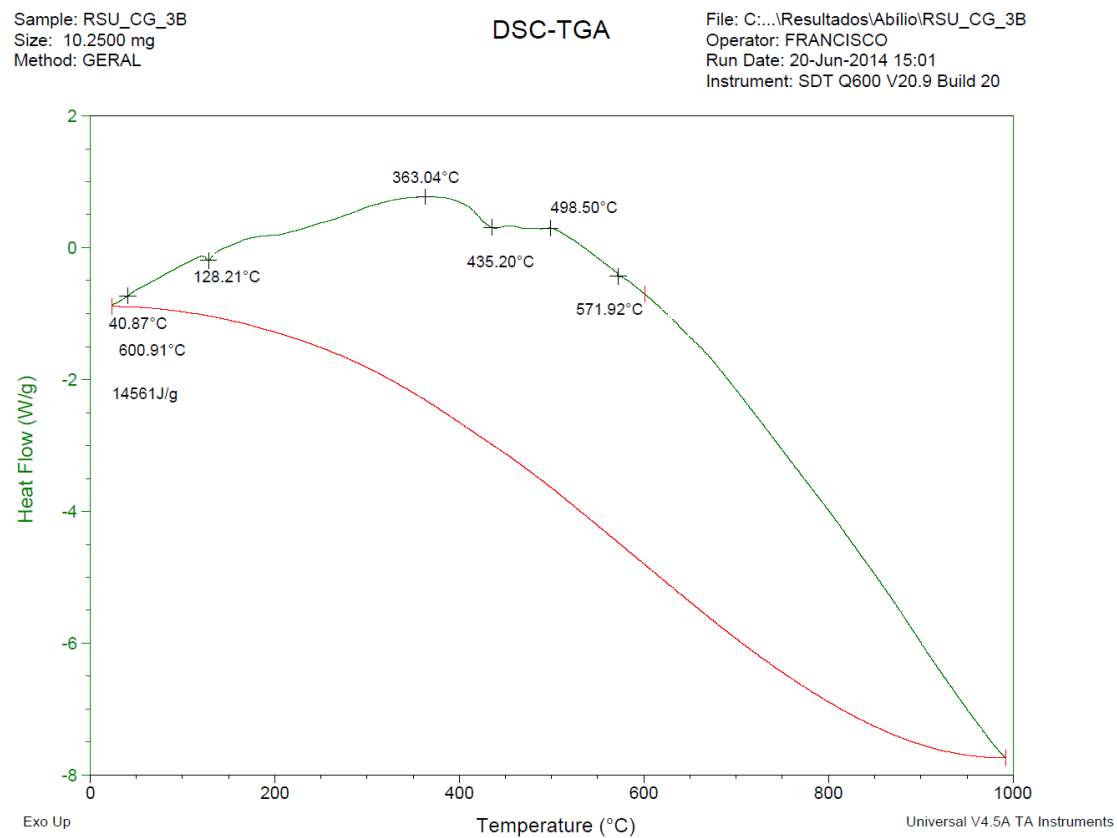
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura D.5** – Curva DSC da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



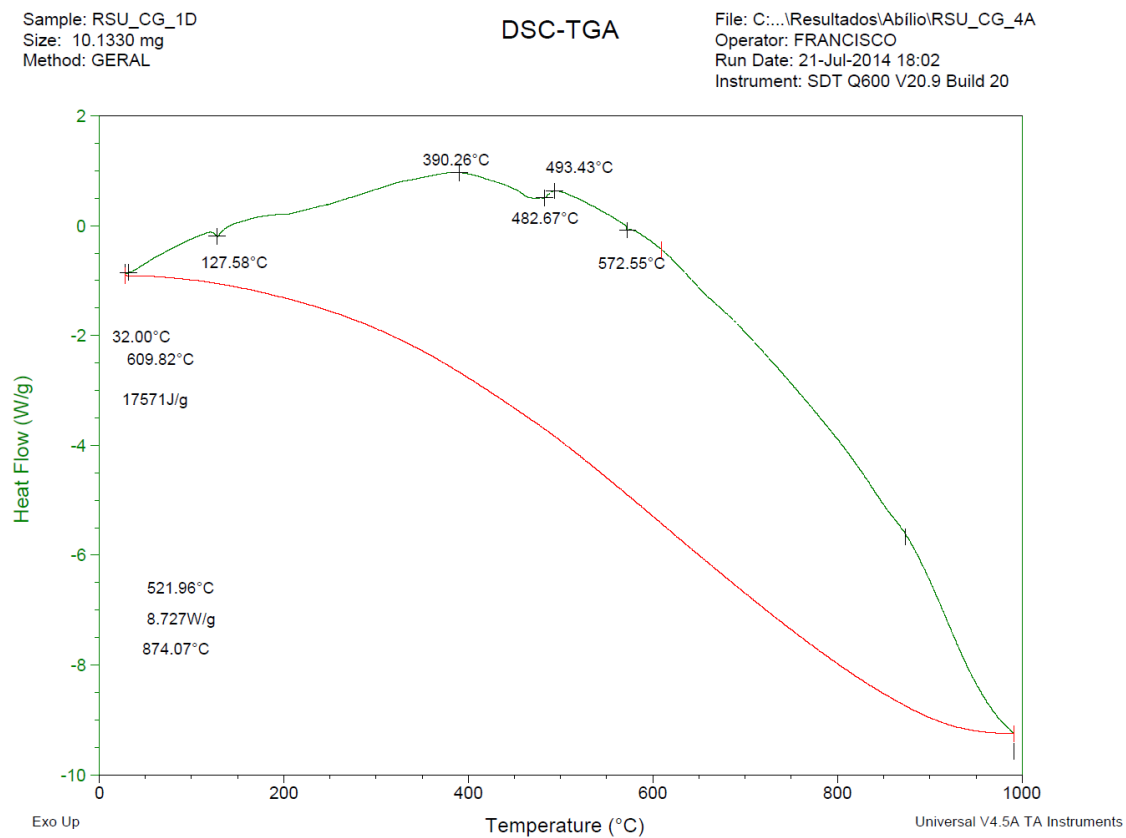
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura D.6** – Curva DSC da amostra RSU CG C sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



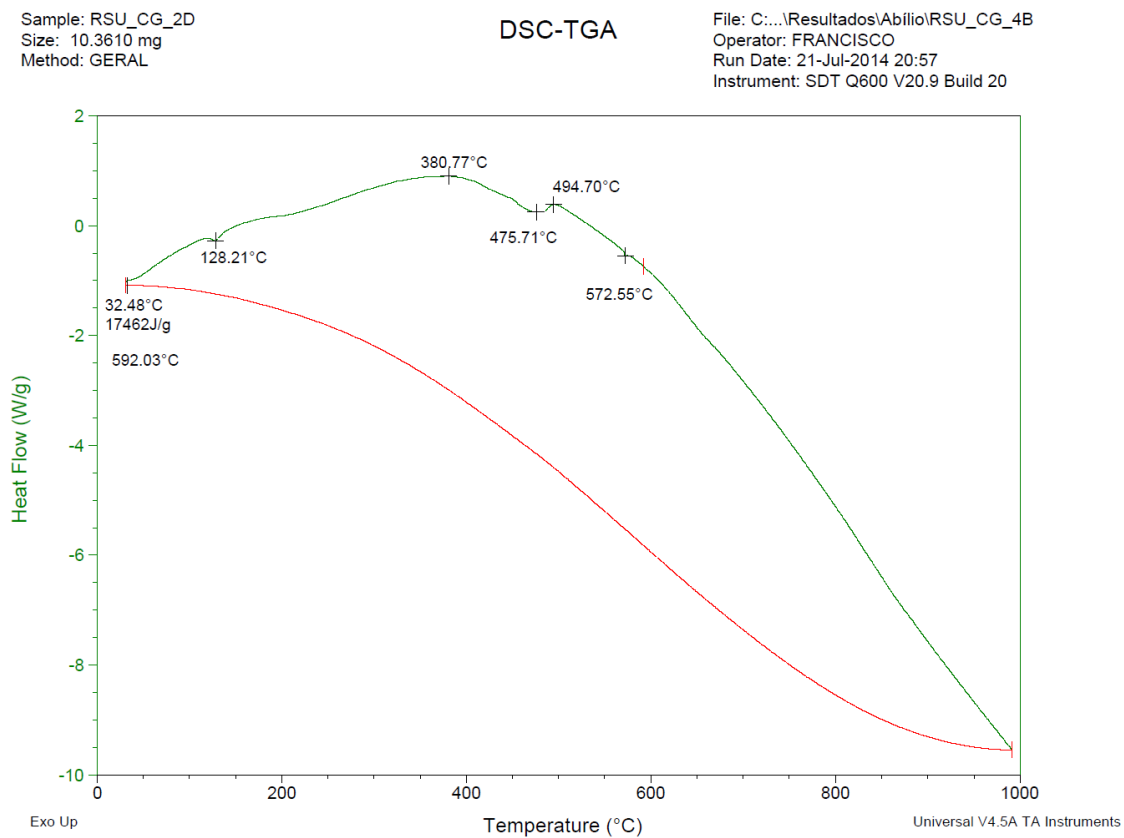
Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura D.7** – Curva DSC da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina.



Fonte: Do Autor, 2014.

**Figura D.8** – Curva DSC da amostra RSU CG D sob atmosfera dinâmica de N<sub>2</sub> a 50 ml/min, razão de aquecimento de 10 °C/mim da temperatura ambiente até 1000 °C e em cadinho de alumina (repetição).



Fonte: Do Autor, 2014.