

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Paulo César
Lenço E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 15/10/2010

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar
para geração de energia***

Paulo César Lenço

Campinas
Out/2010

Paulo César Lenço

Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia

Tese apresentada ao Curso de Doutorado da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual de Campinas, como
requisito para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmicas e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo.

Campinas
Outubro/2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

L545c Lenço, Paulo César
Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para
geração de energia / Paulo César Lenço. --Campinas, SP:
[s.n.], 2010.

Orientador: Waldir Antonio Bizzo.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biomassa. 2. Cana-de-açúcar. 3. Fluidodinâmica. 4.
Sedimentação. I. Bizzo, Waldir Antonio. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica.
III. Título.

Título em Inglês: Characterization of sugarcane bagasse for energy generation

Palavras-chave em Inglês: Biomass, Sugarcane, Fluid dynamics, Sedimentation

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Manoel Fernandes Martins Nogueira, Adriano Viana Ensinas, Maria
Aparecida Silva, Silvia Azucena Nebra de Pérez

Data da defesa: 15/10/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE TÉRMICAS E FLUIDOS

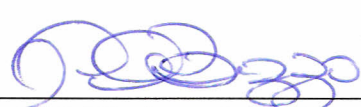
TESE DE DOUTORADO

*Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar
para geração de energia*

Autor: **Paulo César Lenço**

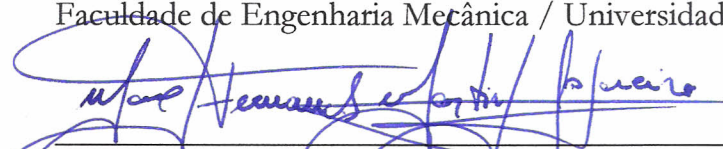
Orientador: Waldir Antonio Bizzo

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, aprovou esta tese.



Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo, Presidente

Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual de Campinas



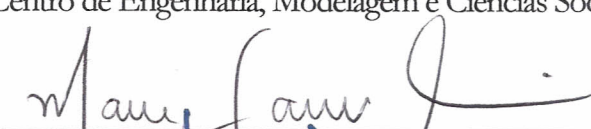
Prof. Dr. Manoel Fernandes Martins Nogueira

Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Pará



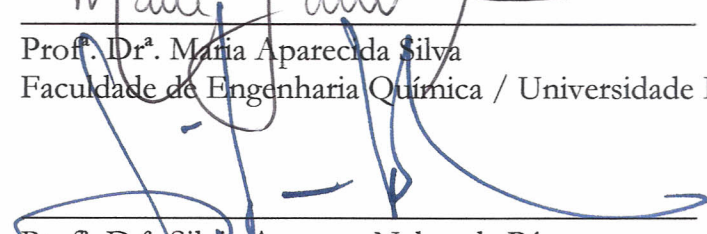
Prof. Dr. Adriano Viana Ensinas

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas / Universidade Federal do ABC



Prof. Dr. Maria Aparecida Silva

Faculdade de Engenharia Química / Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Silvia Azucena Nebra de Pérez

Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 26 de agosto de 2010.

Para Hélia,
mulher, companheira e amiga de todos os momentos.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Waldir A. Bizzo,
pela orientação, apoio e dedicação.

Ao professor Caio Glauco Sanchez,
pela presença constante traduzida, em apoio ao meu trabalho.

Ao meu amigo Ademar Ushima,
pelas discussões, conselhos incentivos na militância da biomassa no Brasil.

Ao professor Kamal Abdel Radi Ismail,
pelas discussões que enriqueceram este trabalho.

À professora Maria Aparecida Silva,
pelo apoio às minhas ideias num momento decisivo.

À Maria Luiza Vannucchi de Almeida Santos,
pela revisão paciente da minha tese.

À todos os amigos do departamento de Térmicas e Fluídos da FEM,
que entre um café e outro, me deram ideias e alegrias.

Aos funcionários dos laboratórios da FEM,
que no cumprimento de seu dever, possibilitaram este trabalho.

À CAPES,
pelo apoio financeiro concedido a essa pesquisa.

Resumo

Este trabalho objetivou a caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia. Para este fim procedeu-se a separação dimensional e granulométrica das partículas que compõe o bagaço de cana utilizando-se do processo de sedimentação e elutrição. Foi desenvolvido um equipamento adequado para a separação e utilizou-se métodos que possibilitam medir de forma simples os parâmetros necessários para comparação dos resultados com os equacionamentos os obtidos por outros autores e ainda identificar parâmetros relevantes ao estudo das características do bagaço de cana proporcionados pelos métodos de separação e medição utilizados.

O equipamento desenvolvido para a separação do bagaço de cana mostrou-se adequado e flexível, podendo variar as velocidades e, conseqüentemente, a área projetada da partícula e sua granulometria, possibilitando uma boa separação granulométrica e fluidodinâmica do bagaço de cana.

Foram estudados a morfologia da cana-de-açúcar e suas características tais como composição química, análises elementar, imediata, termogravimétrica e das cinzas, distribuição granulométrica, densidades e fluidodinâmica da partícula.

A utilização dos métodos de medição através de fotografia, aplicando softwares de tratamento fotográfico, para o dimensionamento e contagem de partículas de pequenas dimensões, além de ser de fácil implementação mostrou-se de baixo custo e adequado, substituindo a caracterização dimensional por peneiramento.

Com a mensuração dimensional proporcionada pelos softwares foi possível o cálculo de parâmetros indispensáveis para o dimensionamento de equipamentos que os utilizam. Os cálculos indicaram que não é necessário o uso do fator de correção Φ (esfericidade) para a determinação do coeficiente de arrasto da partícula, desde que se tenham métodos adequados de mensuração das partículas, como o conseguido neste trabalho.

Palavras-chaves: biomassa, fluidodinâmica, elutrição, sedimentação, bagaço, cana-de-açúcar.

Abstract

The aim of this study is to characterize sugarcane bagasse for energy generation. To achieve such objective we proceeded a granulometric and dimensional separation of particles that composes bagasse using sedimentation and elutriation processes.

It was developed an appropriated equipment to this separation and the simple methods were used to set the necessary parameters in order to compare the results with equations obtained by others authors and also to identify relevant parameters to study sugarcane bagasse characteristics.

The developed equipment for bagasse separation is adequated and flexible, velocity air can be changed and therefore allowing a good particle size separation and fluid dynamics of sugar cane bagasse.

It was studied and analyzed sugarcane bagasse characteristics and morphology, as chemical composition, ultimate, proximate, thermogravimetry, ash, particle size distribution, density and fluid dynamics of particles.

Photographic method with image analysis is suitable for small particles measuring and counting, easy to use and it has a low cost, replacing the screening method.

This characterization provided by photography and image analysis allows to calculate indispensable parameters to design equipment that use them. Calculations indicated that it is not necessary to use the correction factor ϕ (sphericity) to determine particles drag coefficient if adequate methods of particle size measurements are used as in this work.

Keywords: biomass, fluid dynamics, elutriation, sedimentation, bagasse, sugarcane.

Lista de figuras

Figura 1. Esquema da estrutura foliar da cana-de-açúcar	5
Figura 2. Foto do colmo cana-de-açúcar.....	6
Figura 3. Esquema do colmo da cana-de-açúcar	6
Figura 4. Corte transversal do entrenó.....	7
Figura 5. Esquema clássico da disposição dos ternos	11
Figura 6. Esquemas simplificados dos métodos de embebição simples aplicados na extração ..	12
Figura 7. Esq. simplificados dos métodos de embebição composta aplicados na extração	12
Figura 8. Esquemas simplificados dos métodos de embebição mista aplicados na extração.....	13
Figura 9. Foto de um difusor de percolação de colchão horizontal.	15
Figura 10. Esquema de um difusor de cana de açúcar.....	15
Figura 11. Variação da análise elementar de diversos combustíveis sólidos. Construído a partir de Jenkins et al. (1998) e Parikh, Channiwala e Ghosal (2005).	20
Figura 12. Variação da análise elementar do bagaço de cana considerando o C, H e O.....	22
Figura 13. Curvas de TGA para o bagaço de cana em atmosfera inerte.	24
Figura 14. Esquema das fibras em forma de bastonete com diversas granulometrias.	33
Figura 15. Esquema das partículas em forma arredondadas com diversas granulometrias.	33
Figura 16. Esquema do aglomerado de bastonetes e medula com vários tamanhos.....	33
Figura 17. Característica geométrica da fibra do bagaço.....	34
Figura 18. Características da medula ou pó do bagaço.....	34
Figura 19. Análise granulométrica do bagaço separado por peneiras	36
Figura 20. Densidade a granel pela altura de empilhamento do bagaço.....	40
Figura 21. Estrutura da partícula com envelopamento.	51
Figura 22. Esquema simplificado dos estágios da combustão dos sólidos.....	52
Figura 23. Esquema do processo de aquecimento e secagem.....	53

Figura 24. Esquema de um processo de pirólise em uma partícula sólida	56
Figura 25. Esquema da bancada experimental.....	59
Figura 26. Fluxograma do processo experimental	61
Figura 27. Foto da coleta do bagaço na Usina Ester	63
Figura 28. Equipamento usado para o quarteamento.....	64
Figura 29. Resultado do primeiro quarteamento.....	64
Figura 30. Bagaço de cana, amostra úmida 2, $136 \pm 5g$	65
Figura 31. Bagaço de cana, amostra úmida 2, $136 \pm 5g$	65
Figura 32. Bagaço de cana, amostra seca 2, $62 \pm 5g$	65
Figura 33. Foto original, não tratada, das partículas de calibração	69
Figura 34. Imagem das partículas de calibração após tratamento no Corel Photo Paint X4.....	69
Figura 35. Balança termogravimétrica Netzsch STA 409	72
Figura 36. Cadinhos usados nas análises termogravimétricas	72
Figura 37. Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise, modelo JEOL JXA-840 A....	73
Figura 38. Espectro por energia dispersiva mostrando a ordem dos números atômicos de uma amostra.....	73
Figura 39. Partícula típica da amostra 2 elutriada com velocidade de 2,227m/s revestida de ouro para análise de imagem no MEV.....	74
Figura 40. Amostra 2, úmida, antes da separação	77
Figura 41. Amostra 2, úmida, após a separação	77
Figura 42. Distribuição da massa das partículas em função da velocidade de separação da amostra úmida 2.....	78
Figura 43. Amostra 2, em equilíbrio, antes da separação	79
Figura 44. Amostra 2, em equilíbrio, após a separação	79
Figura 45. Distribuição da massa das partículas da amostra 1 com umidade em equilíbrio, em função da velocidade de separação	80
Figura 46. Distribuição da massa das partículas da amostra 2 com umidade em equilíbrio, em função da velocidade de separação	81

Figura 47. Quantidade relativa das massas separadas das três amostras, pela velocidade de separação.	82
Figura 48. Dispersão da amostra 1 com umidade em equilíbrio e com velocidade de separação de 0,504 m/s	83
Figura 49. Dispersão da amostra 2 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 0,504 m/s	84
Figura 50. Dispersão da amostra 1 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 1,062 m/s	84
Figura 51. Dispersão da amostra 2 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 1,062 m/s	85
Figura 52. Dispersão da amostra 1 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 2,277 m/s	85
Figura 53. Dispersão da amostra 2 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 2,277 m/s	86
Figura 54. Comprimento maior e menor da partícula	87
Figura 55. Mostra a medida usada como o diâmetro da partícula (D_p).....	87
Figura 56. Mostra a diferença entre as áreas projetadas das amostras 1 e 2.....	90
Figura 57. Volume médio das partículas em função da velocidade de separação.	91
Figura 58. Densidade aparente média das partículas pela velocidade de separação, com média polinomial, das amostras 1 e 2	92
Figura 59. Média das densidades aparentes das amostras 1 e 2, pela velocidade de separação..	93
Figura 60. Disposição das forças atuantes em uma partícula, durante o escoamento.....	94
Figura 61. Comparativo entre os coeficientes de arrasto (CD) médios da amostra 1.	98
Figura 62. Comparativo entre os coeficientes de arrasto (CD) médios da amostra 2.	98
Figura 63. Amostra 2 em umidade de equilíbrio; velocidade de separação de 0,504 m/s, com aproximação de 10 vezes.....	100
Figura 64. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 0,701 m/s, com aproximação de 10 vezes.....	101
Figura 65. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 0,701 m/s, com aproximação de 25 vezes.....	101

Figura 66. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 1,578 m/s, com aproximação de 10 vezes.....	102
Figura 67. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 1,578 m/s, com aproximação de 25 vezes.....	103
Figura 68. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 1,062 m/s, com aproximação de 200 vezes.....	103
Figura 69. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação $> 2,277$ m/s, com aproximação de 200 vezes.....	104
Figura 70. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 0,710 m/s, com aproximação de 200 vezes (detalhe de uma medula).	104
Figura 71. TGA de todas as frações da amostra 2.	105
Figura 72. DTG de todas as frações da amostra 2 em ambiente inerte.....	106
Figura 73. TGA de todas as frações da amostra 2 em ambiente oxidante	107
Figura 74. Percentual de cinzas da TGA e da mufla pela velocidade de separação das frações da amostra 2 com umidade de equilíbrio.....	108
Figura 75. Fração da amostra 2 com velocidade de separação $> 2,277$ m/s	109
Figura 76. Fração da amostra 2 com velocidade de separação de 0,504 m/s	109
Figura 77. DTG de todas as frações da amostra 2 em ambiente oxidante.....	109
Figura 78. Percentual de cinzas pelos óxidos dos elementos, para cada veloc. separação	111
Figura 79. Percentual dos elementos pela velocidade de separação das frações de bagaço de cana da amostra 2 com umidade de equilíbrio.....	113
Figura 80. Percentual dos elementos isentos de cinzas pela velocidade de separação das frações de bagaço de cana da amostra 2 com umidade de equilíbrio.....	114

Lista de tabelas

Tabela 1. Composição típica da cana-de-açúcar (em kg/100kg de cana) em diferentes países (Rein, 2007)	8
Tabela 2. Composição típica do bagaço de cana	19
Tabela 3. Variação da análise elementar do bagaço de cana.	21
Tabela 4. Variação da análise imediata do bagaço de cana de diversos autores.....	23
Tabela 5. Dados da literatura da análise termogravimétrica do bagaço de cana.	25
Tabela 6. Composição das cinzas do bagaço de cana.....	27
Tabela 7. Temperatura de fusibilidade e de amolecimento das cinzas °C, Camargo et al (1992).....	27
Tabela 8. PCS do bagaço de cana fornecido e calculado pelas equações Channiwala e Parikh (2002)	29
Tabela 9. Cálculo comparativo do PCS das equações 7, 8 e 9.....	31
Tabela 10. Distribuição granulométrica do bagaço separado por peneiras (Sosa-Arno, 2007) ...	35
Tabela 11. Distribuição granulométrica de uma amostra do bagaço separada por peneiras (Sosa-Arno, 2007)	36
Tabela 12. Densidade a granel em função do diâmetro da partícula segundo Alarcon et al (2006)	39
Tabela 13. Densidade absoluta do bagaço de cana em função do diâmetro da partícula. Alarcon et al (2006).....	42
Tabela 14. Especificação da instrumentação	61
Tabela 15. Velocidades escolhidas para a separação das partículas.....	62
Tabela 16. Divisão das amostras de bagaço.....	64
Tabela 17. Umidade do bagaço estudado neste trabalho.....	79
Tabela 18. Massas e percentuais das frações separadas pelo elutriador sedimentador.....	80
Tabela 19. Médias, das áreas do maior e do menor comprimento.....	88
Tabela 20. Densidades médias das amostra 1 e 2 com umidade de equilíbrio.	93

Tabela 21. Médias dos parâmetros que foram usados no cálculo do coeficiente de arrasto.....	96
Tabela 22. Coeficientes médios de arrasto das partículas das amostra 1 e 2, sua velocidade de separação (elutriação) e os números de Reynolds do escoamento e da partícula.	97
Tabela 23. Quantidade de massa de bagaço de cana e quantidade obtida de cinzas em função da velocidade de separação no elutriador sedimentador	108
Tabela 24. Percentuais dos elementos oxidados da amostra 2	110
Tabela 25. Massa da amostra, seu percentual e o percentual de cinzas de cada fração.	112
Tabela 26. Percentuais dos elementos que compõem o bagaço de cana nas diferentes velocidades de separação.....	113
Tabela 27. Percentuais dos elementos que compõem o bagaço de cana, isento de cinzas, nas diferentes velocidades de separação.	114

Nomenclatura

Letras latinas

A	área de superfície da partícula	[m ²]
a _p	área da base	[m ²]
A _p	projeção normal da área da partícula	[m ²]
Ar	número de Arquimedes	[-]
b.s.	base seca	[%]
b _p	base elipsóide	[m]
Cz	cinzas	[-]
d _e	diâmetro de uma esfera	[m]
d _{ec}	valor da menor esfera circunscrita	[m]
D _f	diâmetro equivalente à área da partícula	[m]
d _n	diâmetro da esfera	[m]
d _p	diâmetro médio da partícula	[m]
d _p	diâmetro da partícula	[m]
d _p [*]	partícula adimensional proposto pó hider	[-]
d _s	diâmetro de superfície	[m]
d _{sv}	diâmetro Sauter	[m]
d _v	volume da partícula expresso como uma esfera	[m ³]
E	razão de massa	[-]
e _i	espaçamento na peneira inferior	[mm]
e _s	espaçamento da peneira superior	[mm]
F _D	força de arrasto	[N]
g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
h _{lv}	entalpia de vaporização da água	[kJ/kg]
H _u	poder calorífico inferior relativo ao material úmido	[kJ/kg]
k	condutividade térmica do combustível	[W/mK]

k_c	coeficiente em função do tipo de parede	[-]
L_p	altura	[m]
L_w	distância entre o centro da partícula e a parede	[m]
$\dot{m}$	vazão mássica	[kg/s]
m	massa	[kg]
M_p	massa da partícula	[kg]
q	calor transferido	[kJ/kg]
Re	número de Reynolds	[-]
Re_{esc}	número de Reynolds do escoamento	[-]
Re_p	número de Reynolds da partícula	[-]
S_p	área da superfície da partícula	[m ²]
ss	sólidos solúveis no bagaço (brix)	[%]
T	temperatura	°C
ubs	conteúdo de umidade do bagaço em base úmida (b.u.)	[%]
V	volume da partícula	[m ³]
w	velocidade	[m/s]
z_a	fração mássica da água (%)	[%]

Letras gregas

μ	viscosidade dinâmica	[kg/m.s]
ρ	densidade	[kg/m ³]
ϕ	esfericidade	[-]

Siglas

CD	coeficiente de arrasto
DTG	termogravimetria derivada
EDS	espectroscopia por energia dispersiva
FC	carbono fixo
MEV	microscopia eletrônica de varredura e microanálise
PCI	poder calorífico inferior (kJ/kg)
PCS	poder calorífico superior (kJ/kg)
PVC	cloreto de polivinila
TCD	detector de condutividade térmica
TGA	análise termogravimétrica
VM	material volátil

Índice

Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de figuras.....	viii
Lista de tabelas.....	xii
Nomenclatura.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Estrutura da tese.....	2
2. Revisão da Literatura.....	4
2.1. Propriedades físicas do bagaço de cana.....	4
2.1.1. Morfologia da cana-de-açúcar.....	4
2.1.2. Produção do bagaço de cana-de-açúcar.....	8
2.1.2.1. Preparo da cana.....	9
2.1.2.2. Extração do caldo por moagem.....	10
2.1.2.3. Extração do suco por difusão.....	14
2.1.3. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar.....	17
2.1.3.1. Composição química do bagaço.....	18
2.1.3.2. Análise elementar.....	19
2.1.3.3. Análise imediata.....	22
2.1.3.4. Análise termogravimétrica.....	23
2.1.3.5. Análise das cinzas.....	26
2.1.3.6. Poder calorífico.....	28
2.1.3.7. Morfologia das partículas de bagaço.....	32
2.1.3.8. Densidade do bagaço.....	38

2.2. Fluidodinâmica da partícula	42
2.3. Combustão de sólidos.....	52
2.3.1. Mecanismos de combustão de sólidos	52
2.3.2. O processo de pirólise para uma partícula sólida.....	54
2.3.3. Oxidação do carvão.....	56
3. Processo Experimental.....	58
3.1. Descrição do equipamento.....	58
3.1.1. Histórico sobre a bancada experimental	59
3.2. Fluxograma do processo	60
3.2.1. Descrição da instrumentação.....	61
3.3. Descrição do procedimento experimental.....	62
3.3.1. Aquisição e adequação das amostras	62
3.3.2. Medição das dimensões das partículas	66
3.3.3. O software UTHSCSA Image Tool (IT)	70
3.3.4. Determinação do volume e da densidade aparente.....	70
3.3.5. Análise termogravimétrica.....	71
3.3.6. Análise elementar das cinzas.....	72
3.3.7. Análise de imagem utilizando o MEV.....	74
3.3.8. Determinação das quantidades de voláteis CHN e S.....	75
3.3.8.1. Análise Elementar CHN.....	75
3.3.8.2. Análise de Enxofre	75
4. Apresentação e análise dos resultados	76
4.1. Separação granulométrica da partícula	76
4.2. Mensuração através de imagem.....	82
4.3. Densidade aparente e volume.....	90
4.4. Fluidodinâmica da partícula	94

4.5. Morfologia do bagaço de cana.....	99
4.6. Análise termogravimétrica.....	105
4.7. Análise elementar das cinzas.....	110
4.8. Análise elementar dos voláteis.....	112
5. Conclusões e sugestões para próximos trabalhos	115
5.1. Conclusões.....	115
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	117
Bibliografia.....	118
 Anexo I: Aplicativo desenvolvido no EES	 123
Anexo II: Fotografias relativas à morfologia do bagaço de cana.....	124
Anexo III: Gráficos da TGA e da DTG	135
Anexo IV: Resultados da análise elementar das cinzas.....	141

I. Introdução

O bagaço de cana-de-açúcar é tradicionalmente empregado na geração de vapor utilizado nas plantas de concentração de açúcar e na destilação do álcool. No Brasil, na década de 70, teve início o Pro-Álcool, que foi o primeiro grande programa de substituição de combustível fóssil por um combustível renovável: o etanol hidratado. Naquele período, o excedente do bagaço era considerado resíduo e, como qualquer resíduo, era necessário descartá-lo. A queima ou a incineração na caldeira era a alternativa dada a esse “resíduo” e ainda gerava parte da energia elétrica consumida na planta de produção. Para isso era utilizado, e ainda hoje se utiliza, o Ciclo Rankine que gera o vapor para produzir energia elétrica e utiliza o vapor de escape das turbinas geradoras, no processo de produção de açúcar e álcool. Nesse período inicial da industrialização dava-se então uma destinação ao subproduto, de grandes volumes e consequentemente difícil descarte, para a produção de parte da energia utilizada na usina. Nem todas as usinas eram autônomas na produção de energia elétrica; isto ocorreu pelo fato da produção brasileira de energia elétrica, até meados da década de 1980, ter um custo muito baixo e a capacidade de geração ser muito maior que a demanda.

A partir dos anos 1990, o custo da energia elétrica começou a se elevar e a geração interna de energia elétrica nas usinas foi aumentando até atingir a autossuficiência, usando basicamente o vapor para a geração de energia elétrica (Camargo *et al.*, 1992). Assim, ao longo dos anos, o bagaço passou de resíduo a ser descartado a uma fonte relevante de energia e a cada dia que passa esta importância aumenta proporcionalmente à evolução dos preços da energia no mercado internacional. Desta forma, esse subproduto deixou de ser considerado um resíduo e constituiu-se em um insumo energético importante.

Nos últimos trinta anos, com o aumento da demanda e dos custos da energia elétrica, as crises do petróleo e a possibilidade de se ter um combustível renovável com ciclo global de emissões de CO₂ muito baixo, comparado com os combustíveis fósseis, houve um aumento no

interesse de se desenvolver a indústria sucroalcooleira e a melhora de sua eficiência, já que a venda de energia excedente esta regulamentada desde 2005.

O bagaço de cana-de-açúcar apresenta também grande potencial como matéria-prima para produção de combustíveis derivados a partir de processos como a gaseificação, a pirólise rápida ou a hidrólise seguida de fermentação. Para o desenvolvimento destas tecnologias, o conhecimento detalhado das características físicas e químicas do bagaço de cana se faz necessário. Com o progresso nos estudos das características mais conhecidas notou-se a falta de um estudo mais adequado da fluidodinâmica do bagaço de cana e consequentemente da sua granulometria, morfologia e coeficiente de arrasto, parâmetros que influenciam muito na fluidodinâmica das partículas que o compõem, além de possíveis diferentes características em função da morfologia e granulometria.

Este trabalho tem por objetivo a caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia. Para este fim procedeu-se a separação dimensional e granulométrica das partículas que compõem o bagaço de cana utilizando-se do processo de sedimentação e elutriação. Foi desenvolvido um equipamento adequado para a separação e utilizaram-se métodos que possibilitam medir de forma simples os parâmetros necessários para comparação dos resultados com os equacionamentos obtidos por outros autores e possibilitam também identificar parâmetros relevantes ao estudo das características do bagaço de cana proporcionados pelos métodos de separação e medição utilizados.

Para a realização deste trabalho foi elaborada uma revisão bibliográfica dos processos utilizados na produção e no processamento do bagaço de cana; em consequência destes estudos foram identificados os principais parâmetros para a utilização do bagaço de cana como fonte de energia limpa e renovável.

I.1. Estrutura da tese

Este trabalho está organizado em capítulos, conforme descrito a seguir.

Capítulo 1 – Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica abrange a origem e a morfologia da cana-de-açúcar, seu preparo, a extração do caldo por moagem e por difusão, as características do bagaço de cana tais como composição química, análises elementar, imediata, termogravimétrica e das cinzas, poder calorífico, morfologia das partículas do bagaço de cana, distribuição granulométrica, densidades e fluidodinâmica da partícula não esférica.

Capítulo 2 - Processo Experimental

Descreve o equipamento desenvolvido para este trabalho, trazendo detalhes construtivos do equipamento, a instrumentação utilizada e o procedimento experimental adotado, desde a aquisição e coleta das amostras.

Dentro do procedimento são descritos a separação e o uso de software para medição das partículas. São descritos também os procedimentos utilizados para a determinação do volume e da densidade aparente, a análise termogravimétrica, a análise elementar das cinzas e dos voláteis e análise fotográfica das partículas para observação de sua morfologia.

Capítulo 3 – Resultados experimentais

Este capítulo apresenta todos os resultados dos estudos elencados no capítulo 2, iniciando pela separação granulométrica das partículas, mensuração através de imagem e medição da densidade aparente e do volume da partícula. Com estes resultados utilizaram-se equacionamentos para a determinação do coeficiente de arrasto da partícula do bagaço de cana. Seguem-se os resultados obtidos no estudo da morfologia do bagaço de cana e suas análises termogravimétrica, elementar das cinzas e dos voláteis.

Conclusão

Apresenta as conclusões obtidas e faz sugestões para futuros trabalhos.

Este trabalho traz ainda quatro anexos com informações obtidas durante a coleta de dados e o script do aplicativo desenvolvido no EES (Engineering Equations Solver) para a determinação dos parâmetros necessários para o cálculo do coeficiente de arrasto no escoamento.

2. Revisão da Literatura

2.1. Propriedades físicas do bagaço de cana

O bagaço de cana-de-açúcar é o resíduo produzido nas usinas após a extração do caldo. Ao longo dos anos deixou de ser um resíduo e se tornou um insumo energético importante, e para que se tenha um aproveitamento eficiente, com rendimento adequado na secagem, geração de vapor, gaseificação, pirólise ou mesmo na utilização do bagaço como insumo para a hidrólise ácida ou enzimática, é necessário o conhecimento das suas propriedades e características.

2.1.1. Morfologia da cana-de-açúcar

O plantio da cana-de-açúcar no Brasil teve início do século XVI, através de Martim Afonso de Sousa, que a trouxe para a então Capitania de São Vicente, hoje região de São Paulo. Entre 1500 e 1600, a cana-de-açúcar estendeu-se por todos os países da América, e no Brasil foi uma das primeiras culturas agrícolas introduzidas com fins comerciais, como afirma Castro e Kluge (2001).

Hoje a cultura da cana-de-açúcar se estende por quase todos estados brasileiros. O maior estado produtor é o de São Paulo que tem cerca de 60% da produção nacional e é seguido pelos estados do Paraná, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, conforme dados publicados pelo Ministério da Agricultura (Balanço da Cana-de-Açúcar e Agro Energia de 2007).

A cana-de-açúcar, de nome científico *Saccharum officinarum*, é conhecida desde 8000 a.C. e é uma das seis espécies do gênero *Saccharum*, gramíneas altas provenientes do Sudeste Asiático. É um complexo híbrido de regiões tropicais e subtropicais (Fernandes, 1984).

A cana-de-açúcar possui um sistema radicular (raízes), colmos, folhas e eflorescência, sendo os colmos a parte de maior interesse industrial, pois é desta parte que é extraído o caldo e o bagaço (Fernandes, 1984). No entanto as folhas (ou palhas) podem ter um papel relevante para a geração de energia ou biocombustível (Boog *et al.*, 2005).

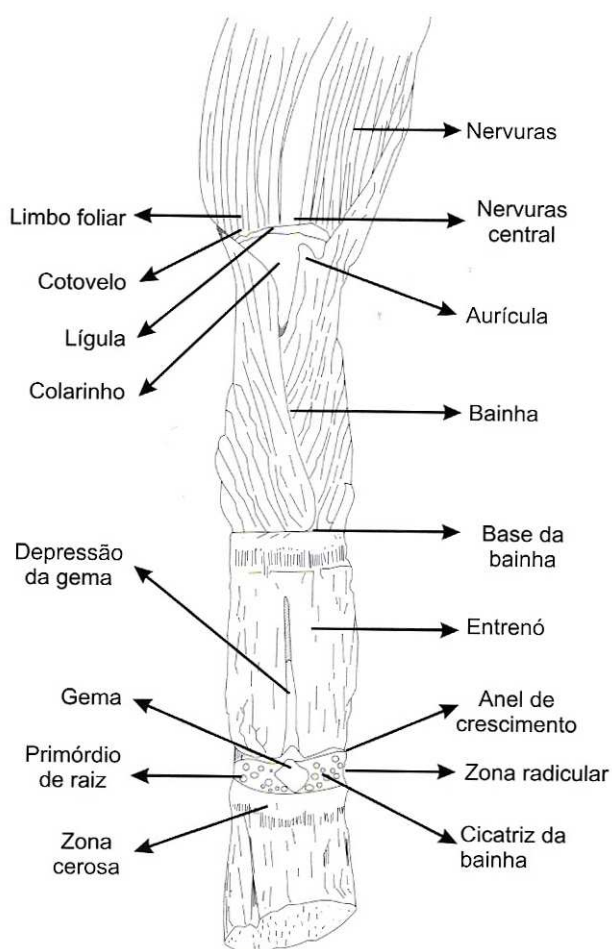


Figura 1. Esquema da estrutura foliar da cana-de-açúcar (Dinardo-Miranda; Vasconcelo; Landell, 2008)

O colmo da cana-de-açúcar é cilíndrico, reto, fibroso e rico em açúcar (Figuras 1, 2 e 3).

A Figura 4 apresenta o colmo em corte transversal no entrenó da cana-de-açúcar. A casca é a parte mais exterior e o córtex é formado por várias camadas de células lignificadas de

paredes grossas que dão resistência mecânica e proteção aos tecidos interiores aos colmos, comumente chamados de fibras. Os tecidos interiores são formados pelos vasos vasculares e o tecido fundamental, ou parenquimatoso, conhecido como medula. A cor do colmo é dada por pigmentos, os quais estão nas células mais externas da epiderme, claramente vistas na Figura 2. O tecido fundamental é composto de células frouxas e curtas, cujas dimensões são praticamente iguais em todos os sentidos, pois são células isodiamétricas (Fernandes, 1984; Payne, 1989).



Figura 2. Foto do colmo cana-de-açúcar (Unica, 2008)

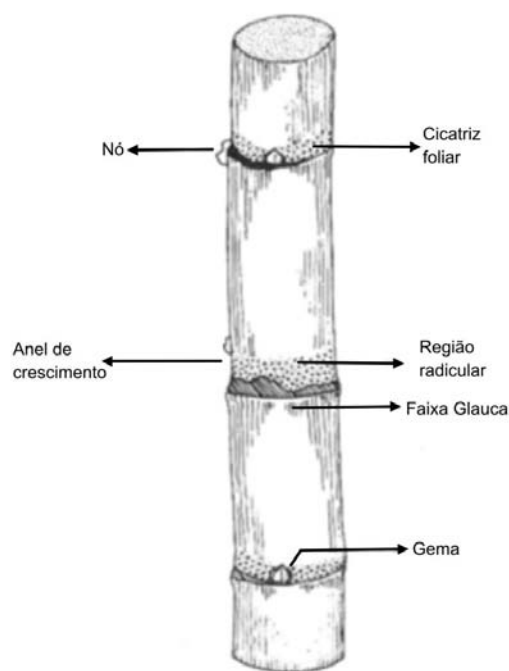


Figura 3. Esquema do colmo da cana-de-açúcar (Fernandes, 1984)

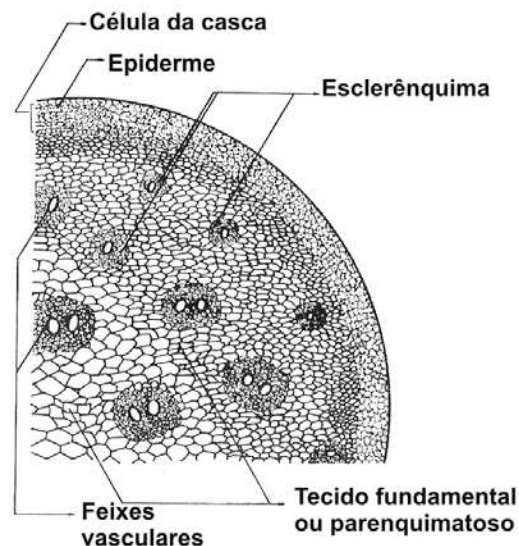


Figura 4. Corte transversal do entrenó. (Fernandes, 1984)

A composição da cana é aproximadamente de 86 a 92% de caldo e de 8 a 14% de material fibroso, ou seja, materiais insolúveis em água (Castro e Kluge, 2001). Os colmos contêm 13g de material fibroso para cada 100g de colmo (Rein, 2007). O valor típico hoje adotado no Brasil, para efeito de balanço de massa de processo, é de 11 a 12 % de fibras, em função do período de colheita.

A composição da cana-de-açúcar recebida nas usinas não depende somente da composição dos colmos da cana, mas também de outros fatores, tais como a variedade, a quantidade de pontas e folhas, a maturação, o período de colheita, se é queimada ou se é crua, se a colheita é mecanizada ou manual, além dos fatores climáticos (se choveu ou não no período do plantio).

Considerando esses fatores, Rein (2007) mostra a composição típica da cana-de-açúcar em alguns países produtores, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. *Composição típica da cana-de-açúcar (em kg/ 100kg de cana) em diferentes países (Rein, 2007)*

	Brasil	Austrália	África do Sul	Colômbia	Filipinas	I. Mauricius	Luisiana (USA)
Pol	14	14,6	12,8	13,2	10	12	14
Brix	16,2	16,4	15	15	12,5	13,8	16
Água	70,51	69,3	70	70	72,5	71,2	71
Fibra	13,3	14,3	15	15	15	15	13

O teor de sólidos solúveis em graus brix, segundo Fernandes (2003), é o parâmetro utilizado na indústria do açúcar e álcool, e expressa estritamente a percentagem peso/peso dos sólidos contidos em uma solução de sacarose, representando o teor de sacarose na solução.

Pol representa a percentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares, determinada por método sacarimétrico, baseado na propriedade do açúcar de desviar a luz polarizada, conforme afirma Fernandes (2003).

O caldo por sua vez é composto por 70 a 73% de água e 27 a 30% de sólidos solúveis (sólidos solúveis e brix), desse total 13 a 18% é de brix. Castro e Kluge (2001) afirmam que além da sacarose (açúcares) são encontrados outros elementos residuais (gorduras, ceras, ácidos aminados, sais minerais e outros elementos).

2.1.2. Produção do bagaço de cana-de-açúcar

A produção do bagaço de cana-de-açúcar é derivada do processo de obtenção do caldo que contém a sacarose. A partir do caldo pode ser produzido o açúcar, através de um processo de concentração, ou o etanol através do processo de fermentação seguido da destilação.

A obtenção do caldo é feita através de dois processos básicos: a preparação da cana e a extração do caldo. No processo de extração de caldo podem ser utilizadas duas técnicas diferentes, a extração por moagem ou a extração por difusão. Cada um destes processos dá origem ao bagaço de cana com características ligeiramente diferentes.

2.1.2.1. Preparo da cana

A preparação da cana é o processo de cominuição do tamanho dos colmos da cana de açúcar, em pedaços de tamanho adequado para a alimentação das moendas, para o subsequente processo de extração do caldo da cana-de-açúcar (Rein, 2007).

A eficiência da extração do caldo da cana-de-açúcar tem uma significativa dependência do preparo que é dado à cana e que geralmente é feito usando-se facas e martelos rotativos, que cortam e desfibram os colmos da cana-de-açúcar.

Os principais objetivos do processo de preparação são a redução do tamanho dos colmos, a ruptura das células que contém a sacarose e a produção de um material que possua boas características para a extração por moagem ou a extração por difusão. O preparo, requerido tanto na difusão quanto na moagem, não é diferente entre si, pois para os dois processos é necessário reduzir o tamanho dos colmos em partes pequenas que permitam a extração do suco, mas que mantenham as características para a alimentação nas moendas ou na compactação do leito de difusão. A preparação ótima é aquela que conduz a uma ruptura das células mas que preserve as fibras ainda longas para facilitar a remoção do suco tanto na difusão quanto na moagem (Rein, 2007). Assim o preparo da cana-de-açúcar tem o objetivo de facilitar ao máximo a extração do caldo (sacarose) contido nas células dos colmos, e para isso é necessário romper completamente as células que o contém, para que as moendas ou difusores tenham uma boa eficiência de extração.

Um bom índice de preparo ou índice de células abertas (“open-cell”), obtido em ensaios padronizados, está em torno de 90% da cana que entra no processo de moagem; nos difusores, esses índices devem ser maiores (Camargo *et al.*, 1992).

Os equipamentos mais utilizados para o preparo da cana são as facas rotativas, seguidas de desfibradores, pois as facas proporcionam a obtenção de um colchão de cana de espessura quase uniforme e os desfibradores, na sequência, destroem completamente a estrutura da cana, dando um ganho significativo na extração do caldo, devido ao grande número de células abertas.

Para se aumentar em 1% a extração em uma moenda é necessário melhorar em 4% o preparo da cana, ou seja, é necessário acrescer em 4% o número de células abertas (Payne, 1989).

2.1.2.2. Extração do caldo por moagem

O objetivo da moagem da cana-de-açúcar é separar a sacarose contida no caldo, que é extraída através da compressão da parte fibrosa (colmos). A extração é mensurada por uma taxa percentual entre a sacarose contida na cana e a sacarose extraída.

Segundo Rein (2007), a percentagem da sacarose da cana-de-açúcar que é removida com o caldo é denominada de sacarose extraída e é expressa pela equação:

$$E = \frac{\dot{m}_{caldo}}{\dot{m}_{cana}} \quad (1)$$

ou por

$$E = \frac{(\dot{m}_{cana} - \dot{m}_{bagaço})}{\dot{m}_{cana}} \quad (2)$$

onde:

$\dot{m}$ é a vazão mássica da sacarose, e os subscritos referentes à massa do caldo, cana e bagaço para as correntes que as contém.

Após o preparo, a cana passa pelo equipamento de moagem que é chamado de tande de moendas, que é normalmente composto de um conjunto de 4 a 7 ternos, que são conjuntos de três cilindros com ranhuras radiais que estão dispostas pelo centro na forma de um triângulo isósceles ou em “V”, que servem para esmagar e retirar o suco da cana (Figura 5). Os cilindros inferiores têm seus eixos fixos e giram no mesmo sentido enquanto o cilindro superior móvel tem a posição do seu eixo controlado por pressão hidráulica mantendo a pressão de esmagamento e gira no sentido contrário aos eixos inferiores.

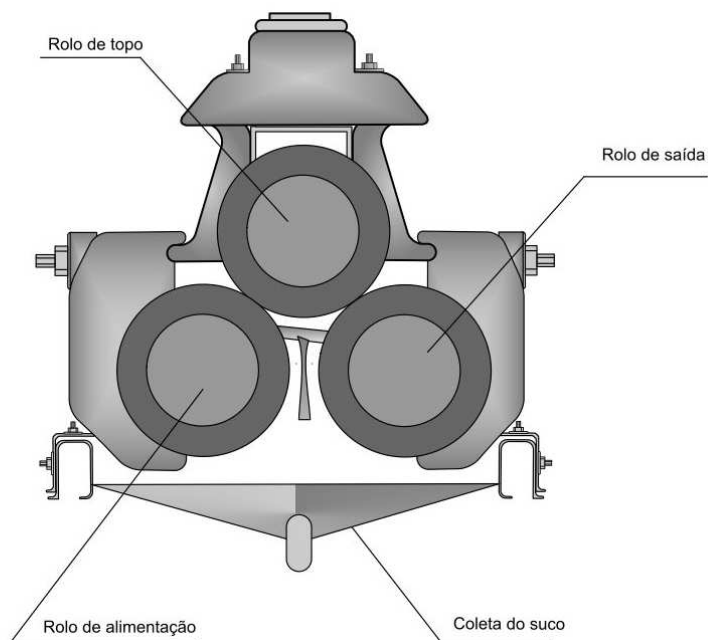


Figura 5. Esquema clássico da disposição dos ternos

Embora os ternos normalmente sejam compostos de três cilindros, atualmente usa-se um ou dois cilindros auxiliares pra comprimir o colchão formado pelas fibras e assim melhorar a alimentação, sendo que esses cilindros adicionais têm diâmetros menores que os de esmagamento. (Payne, 1989 e Camargo *et al.*, 1992).

Os cilindros das moendas possuem ranhuras para melhorar a capacidade de alimentação e da drenagem. Essas ranhuras têm influência na forma que o bagaço sai do processo de moagem. Segundo Payne (1989), as ranhuras são em forma de V ao longo do cilindro, formando um ângulo de 30° a 35°, podendo chegar até 45° quando se tem um potencial de danos devido à possibilidade da entrada de pedras ou peças de ferro; o passo dessas ranhuras está entre 12,5 a 25 mm para uma maior eficiência de extração. Para Rein (2007) o passo varia entre 25 a 75 mm, sendo o mais usado o de 50 mm com ângulos de 40° a 50°.

Para aumentar a extração de sacarose realiza-se a adição de água à cana durante o processo de moagem. Esse processo é chamado de embebição uma vez que o bagaço, ao sair

dos ternos, ainda retém uma quantidade de caldo por capilaridade, ou ainda, em células não esmagadas (Camargo *et al.*, 1992).

Existem três tipos de embebição: a simples (Figura 6), a composta (Figura 7), e a mista (Figura 8). A embebição simples é a aplicação da água sobre o bagaço após cada terno, o caldo obtido não sofre retorno e vai diretamente à fabricação. Já na embebição composta, a água é aplicada somente no último terno do tande e o caldo diluído é retornado totalmente ou em parte à frente do terno anterior, sendo que a extração do caldo para a fabricação se dá no 1º e no 2º terno. Na embebição mista, como o nome diz, há uma mistura da embebição simples com a mista, que utiliza a água em mais de um terno, e os caldos intermediários retornam parcialmente aos ternos anteriores (Camargo *et al.*, 1992).

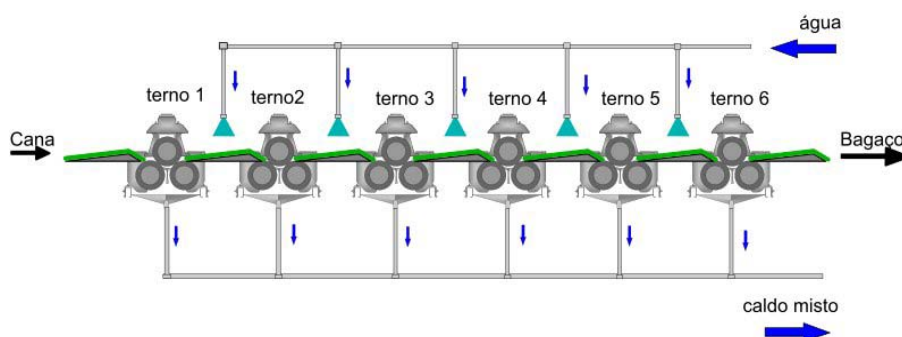


Figura 6. Esquemas simplificados dos métodos de embebição simples aplicados na extração

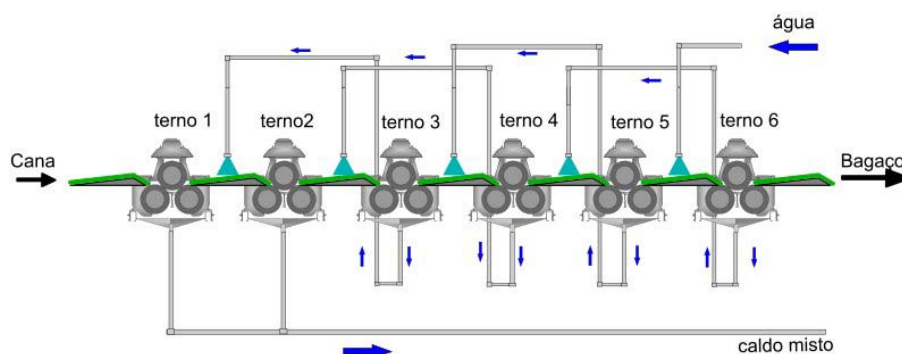


Figura 7. Esquemas simplificados dos métodos de embebição composta aplicados na extração

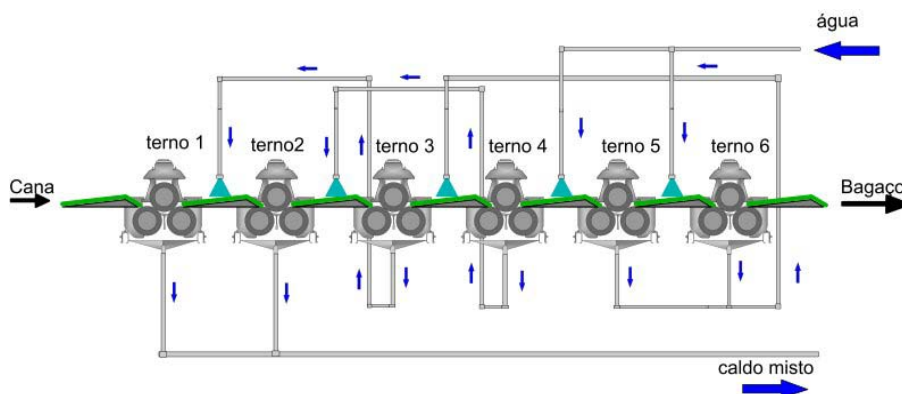


Figura 8. Esquemas simplificados dos métodos de embebição mista aplicados na extração.

Payne (1989) afirma que o bagaço pode absorver até 650% de líquido em relação à sua massa, mas que a extração máxima se estabiliza a uma taxa de 250% em relação à fibra, o que é confirmado por Rein (2007), que diz que na prática, a extração nos tandes de moagem aumenta rapidamente com a adição da embebição até a taxa de 250 a 280% em relação à fibra. Acima destes valores a quantidade de sacarose extraída não justifica o incremento na embebição.

A água de embebição, segundo Payne (1989), necessariamente deve ser aplicada o mais quente possível, para melhorar a extração da sacarose. A temperatura normalmente utilizada é da ordem de 70° a 80°C e é limitada por possíveis problemas de alimentação, pois a fibra torna-se plástica em altas temperaturas, tornando-se muito escorregadia.

Mas segundo Camargo *et al.* (1992), a utilização de água quente de até 80°C é controversa e pode causar alguns efeitos na extração, tais como a floculação antecipada das substâncias proteicas, maior permeabilidade do bagaço dificultando sua aderência, maior dissolução de impurezas no caldo, maior difusão, lubrificação maior das camisas dos cilindros na moenda, redução das perdas por fermentação bacteriana, pré-clarificação do caldo e pequena redução de umidade no bagaço.

Porém Rein (2007) afirma que essa questão tem sido amplamente debatida sem obter-se um consenso aceitável a respeito da temperatura adequada da água de embebição.

O acréscimo de água para a maior extração do caldo, e consequentemente a maior extração da sacarose, tem fatores limitantes tais como a capacidade de evaporação do caldo misto (caldo misturado com água). Para se fabricar o açúcar e álcool a embebição deve ser compatível com a capacidade de evaporação da planta industrial, sendo que nessa operação a

maior parte da água é eliminada, e tem consequência direta no consumo de energia do processo.

O bagaço de cana, como muitas biomassas, é higroscópico, retém a umidade nos interstícios das fibras. A umidade se mantém em torno 48 a 52% no final do processo de moagem mesmo se utilizando a embebição, uma vez que os ternos têm a capacidade de eliminar o líquido independentemente do acréscimo de água ao processo.

2.1.2.3. Extração do suco por difusão

Por definição, a difusão é o fenômeno pelo qual duas soluções de diferentes concentrações, separadas por uma membrana permeável ou porosa, se misturam e adquirem a mesma concentração, ao longo de um tempo. Na extração do caldo da cana-de-açúcar, as células de parênquima, em contato com a água, funcionam como uma parede semipermeável, e a sacarose nela contida é extraída por um processo que consiste basicamente no escoamento de um fluido (água e caldo diluído) através de um leito poroso formado pela cana desfibrada (Camargo *et al.*, 1992).

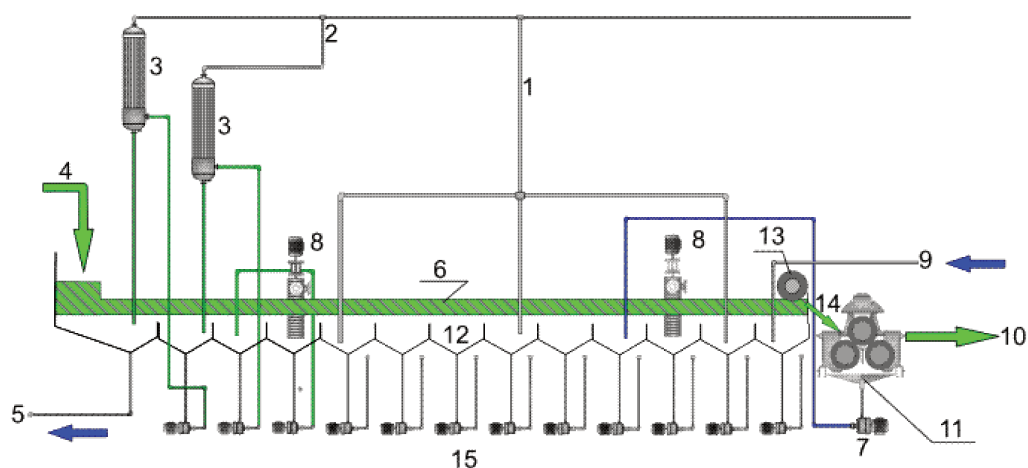
Na extração sólido-líquido parte do caldo é extraído por meio de um processo de lavagem, tecnicamente chamado de lixiviação. A parte restante do caldo contido nas células não fragmentadas e em pequenos capilares no interior das partículas é extraído por meio de processo de troca físico-química causado por pressão osmótica e difusão molecular entre o caldo dentro das células e o líquido de extração (Camargo *et al.*, 1992).

Os difusores mais utilizados são os de percolação da cana (Figura 9), processo em que a água e o caldo quente são recirculados em sentido contrário ao movimento da cana já preparada (desfibrada).

Existem vários tipos de difusores de percolação, nos formatos em “U” anulares ou mesmo inclinados, mas os mais usados são os de colchão horizontal, formado por um túnel aberto nas extremidades. O fundo é feito por chapas perfuradas onde o leito feito de cana desfibrada é arrastada por meio de uma esteira no sentido contrário ao meio difusor (água e suco diluído), conforme ilustrado na Figura 10.



Figura 9. Foto de um difusor de percolação de colchão horizontal (imagem cedida por Uni-systems).



1. injeção direta de vapor, 2.vapor de aquecimento, 3. trocador de calor, 4. cana preparada, 5. caldo misto, 6. leito da cana 7. retirada da água da prensagem do bagaço, 8. parafuso de movimentação do leito de bagaço, 9. embebição de água e reposição, 10. saída do bagaço, 11. coleta da água de prensagem. 12. placas perfuradas, 13. rolo de pré-prensagem, 14. bagaço processado. 15. bateria de bombas de recalque.

Figura 10. Esquema de um difusor de cana de açúcar

Para que o processo de difusão ocorra no extrator de caldo é necessário um leito permeável compacto e com um índice de ruptura das células que armazena o suco próximo a 94% e com um mínimo de moagem das fibras, mantendo um comprimento do feixe fibroso na ordem de 10 a 15 cm (Payne, 1989). Esse número é um número mínimo, mas isso vai depender do tipo de facas usadas no preparo da cana, ou seja existem processos que picam a cana em tamanhos menores. Sosa-Araoz (2007) cita a existência de fibras longas nessa ordem de grandeza, com 35% das fibras estudadas maiores que 5,66 mm. Desses 35%, 52% eram maiores que 15 mm, chegando até 148 mm, com uma média de 100 mm.

Após o deslocamento pela dorna de difusão o bagaço passa pelo processo de retirada da água, etapa final do processo de extração do caldo. Para isso o mecanismo mais comum é a utilização de ternos de cilindros iguais aos das moendas.

A temperatura da água de extração na dorna de difusão normalmente fica em torno de 70° a 75°C, conseqüentemente, o bagaço sai do difusor a essa mesma temperatura, portanto, mais plástico e escorregadio, com um menor coeficiente de atrito, dificultando a retirada da água.

Payne (1989) sugere a utilização de prensa de parafuso, enquanto Rein (2007) afirma que as drenagens em ternos rotativos são mais rápidas, e que inovações, como feitas no Brasil, que mantêm as ranhuras nesses ternos e acrescentam furos passantes transversalmente entre as ranhuras, melhoram ainda mais a performance da drenagem.

Alguns aspectos que influenciam da difusão e da estrutura do bagaço e que devem ser controlados são:

- As dimensões das partículas, que são altamente dependentes do grau de preparo da cana e diferentemente da moagem, não sofrem deformação mecânica ao longo do processo de extração. O formato, tamanho e rigidez das partículas influenciam diretamente da distribuição do líquido de extração através do colchão de cana (taxa de percolação), e posteriormente terão influência na utilização do bagaço como combustível.
- A desnaturação térmica, que é o tratamento térmico no tecido vegetal e deve ser aplicado de modo que não ocorra sobreaquecimento e dissolução em outros materiais.

- A temperatura de extração, que é responsável por grande consumo de energia a alta temperatura (média em torno de 75°C), é vantajosa pois reduz a viscosidade do líquido lixiviador, reduz a atividade microbológica e enzimática. Por outro lado temperaturas demasiadamente altas causam degradação térmica reduzindo a extração.

Em países como da América Central, da Europa e África do Sul, Egito é utilizado o método de extração do caldo por difusão, seja com a beterraba ou mesmo com a cana-de-açúcar. No Brasil, entretanto, esse processo é pouco difundido (Camargo *et al.*, 1992). Até 1985, num universo de 347 usinas, somente 8 utilizavam difusores, e de um total de 398 usinas implantadas ou em construção, apenas 22 optaram pelo sistema de difusão (revista Álcoolbras, 2008).

2.1.3. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar

As características físicas e químicas do bagaço de cana têm influência direta no seu aproveitamento como fonte de energia. O método comumente utilizado é a combustão do bagaço em geradores de vapor e o conhecimento das características do bagaço é necessário para o projeto dos equipamentos de geração de vapor.

Outros métodos de aproveitamento energético para o bagaço incluem a gaseificação e a pirólise e ainda a produção de etanol através da hidrólise da parte ligno-celulósica. Qualquer que seja o processo, o conhecimento das características do bagaço é necessário para o desenvolvimento do processo e para o projeto dos equipamentos.

A caracterização do bagaço depende de alguns fatores, tais como a espécie da planta, o método e a época da colheita e o processo de extração do caldo que determina obviamente, o processo de produção do bagaço.

Difícilmente, no entanto, estão disponíveis na literatura especializada estas informações correlacionadas com a caracterização.

Esta revisão traz uma coletânea dos dados obtidos por diferentes autores, com a finalidade de apresentar e consolidar informações importantes relativas à caracterização física e química do bagaço de cana para fins energéticos.

2.1.3.1. Composição química do bagaço

O bagaço da cana-de-açúcar é uma complexa mistura de celulose, hemicelulose e lignina que compõe as células das paredes dos feixes vasculares da cana-de-açúcar (Rein, 2007). A quantidade de fibra nos colmos depende do comprimento e do diâmetro dos colmos. Os números de nós, e da distância entre os nós, influenciam a quantidade de fibras obtida na extração.

A celulose é um polímero de alta massa molecular, composta em grande parte por unidades de glicose. A hemicelulose é composta em grande parte por unidades de xilose com pequenas partes de arabinose, ambas com cinco carbonos na estrutura molecular (pentose), em oposição à glicose que tem seis carbonos na estrutura molecular (hexose). Lignina é uma substância complexa composta em grande parte de fenólicos aromáticos compostos que geralmente dão a rigidez e a dureza da fibra da cana-de-açúcar (Camargo *et al.*, 1992).

A quantidade relativa destes compostos é dependente da variedade da cana, da idade e do tamanho dos colmos. Existem também pequenas quantidades de compostos inorgânicos, tais como cálcio e sílica presentes nas estruturas celulares da cana, mas que não são significativos na composição geral da fibra.

As cinzas são compostos inorgânicos encontrados na estrutura do bagaço, sendo que sua composição depende das espécies de planta, do solo, do tipo de adubação e também os inorgânicos arrastados pelo tipo de colheita (mecanizada ou manual). Os principais elementos são sílica, potássio, cálcio, fósforo, magnésio e outros inorgânicos (Fernandes, 1984).

A Tabela 2, mostra a composição química típica do bagaço de cana com relação aos principais elementos.

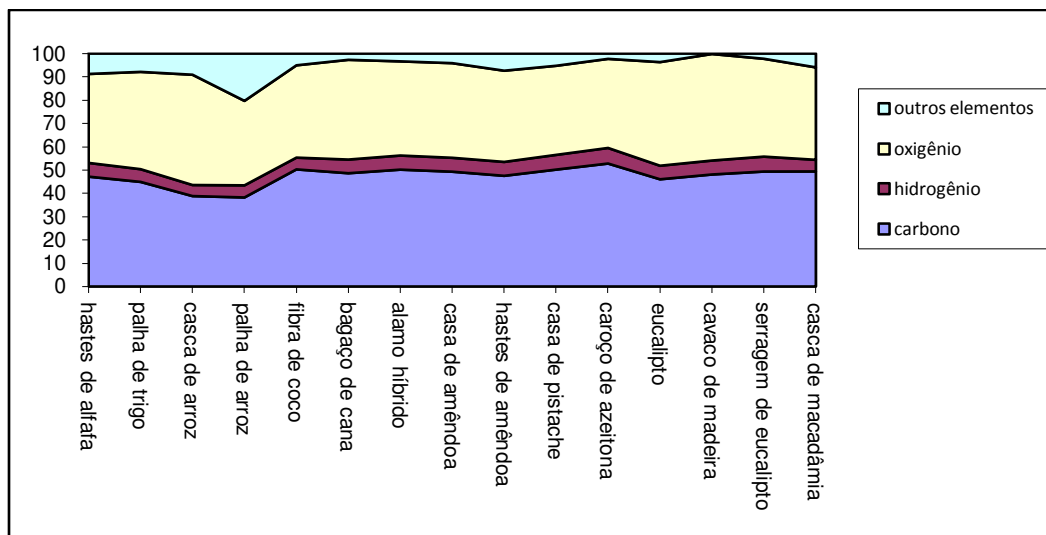
Tabela 2. *Composição típica do bagaço de cana*

	bagaço	celulose %	lignina %	hemicelulose %	cinzas %
Purchase, 1995	integral	40,0	22,0	33,0	5,0
Bernar, 1992	integral	51,2	20,6	24,1	2,6
	fibra	52,0	19,4	24,7	1,4
	medula	46,2	21,6	24,1	5,4
Trina <i>et al.</i> , 1990	integral	46,6	20,7	25,2	2,6
	fibra	47,0	19,5	25,1	1,4
	medula	41,2	21,7	26,0	5,4
Nassar <i>et al.</i> , 1996	integral	33,6	18,5	33,6	

2.1.3.2. Análise elementar

A análise elementar de um combustível caracteriza sua composição química em termos dos principais elementos químicos que o compõem, normalmente representados por C, H, O, N e S.

A Figura 11 apresenta uma comparação da análise elementar de diversas biomassas, incluído o bagaço de cana.



*Figura 11. Variação da análise elementar de diversos combustíveis sólidos.
Construído a partir de Jenkins et al. (1998) e Parikh, Channiwala e Ghosal (2005).*

Valores típicos da análise elementar do bagaço de cana encontrados na literatura são mostrados na Tabela 3. Não há praticamente dispersão dos valores encontrados, sendo possível utilizar-se de um valor médio generalizado.

Para uma melhor visualização foi construída a Figura 12 que apresenta os valores da análise elementar do bagaço de cana-de-açúcar. Comparando-se as Figuras 11 e 12 nota-se que não há uma variação significativa na análise elementar, independentemente do tipo de biomassa. Apesar dos diferentes critérios, produtos e regiões usados por cada autor para obtenção dos valores dispostos acima, as ordens de grandeza se mantêm para os teores estudados nas diferentes condições.

Tabela 3. *Variação da análise elementar do bagaço de cana.*

Referência	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre	Cloro	Oxigênio	Cinzas
Rein, 2007	47,00	5,92	0,33	0,05		45,81	
Camargo <i>et al.</i> , 1992	46,30	6,40		0,10		43,00	4,00
Van der Poel, 1998	47,20	6,30	0,30	0,10		44,50	2,50
Gabra, 2001	45,20	5,40	0,20	0,02	0,30	41,80	7,40
Jenkins <i>et al.</i> , 1998	48,64	5,87	0,16	0,04	0,03	42,82	2,44
Turn <i>et al.</i> , 1997	48,19	5,67	0,14	0,08		42,35	3,61
IPT, 2007	45,48	5,70	0,40	0,06		45,21	0,24
Permchart e Kouprianov, 2004	42,00	6,58	0,26	0,16		51,00	1,84
De Filippis, 2004	42,90	5,90	0,20			49,00	0,20
Manyà e Arauzo, 2008	43,60	5,52	0,25	0,07		50,63	
Resende, 2003	45,92	6,23	0,38			50,47	
valor médio	45,65	5,98	0,26	0,08	0,17	45,61	2,78

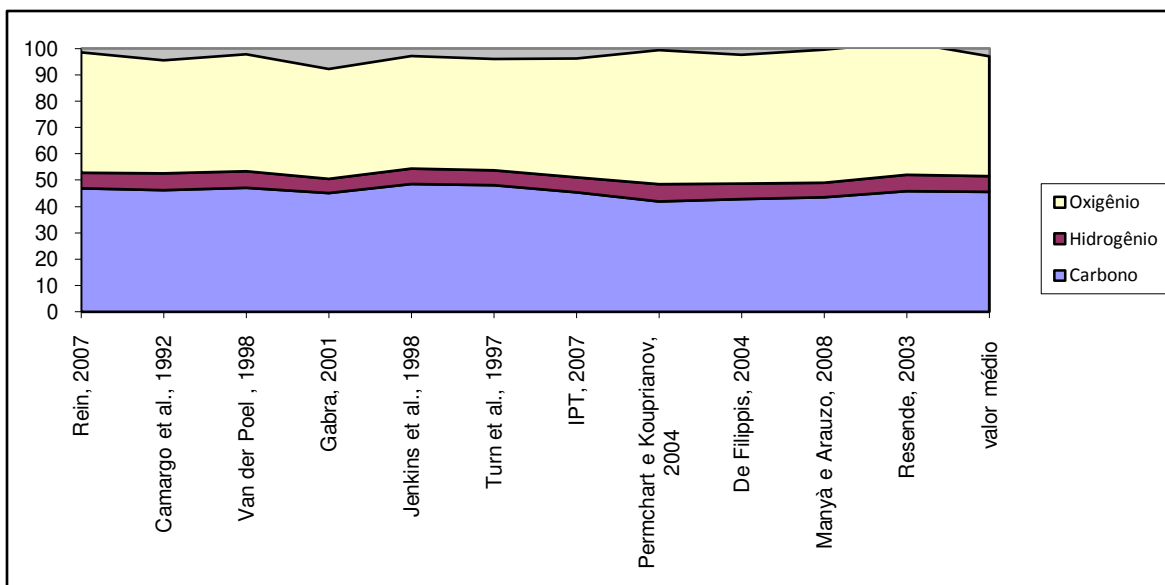


Figura 12. Variação da análise elementar do bagaço de cana considerando o C, H e O.

2.1.3.3. Análise imediata

Como visto anteriormente, a cana-de-açúcar passa pela extração da sacarose, considerado o processo mais importante na indústria do açúcar e álcool. Nesse processo, que pode ser através de moendas ou por difusão, o bagaço (subproduto da extração da sacarose) tem uma umidade entre 47 a 52%, na base úmida. Comumente, nas usinas de açúcar e álcool usa-se como valor padrão 50% de umidade para efeito de balanço de massa, e é com esta umidade que é realizada a combustão do bagaço nos geradores de vapor das usinas.

A análise imediata determina os teores de umidade, carbono fixo, voláteis e cinzas do combustível sólido. Estes teores servem para prever o comportamento do combustível no processo de combustão.

Na análise imediata, primeiro se determina a sua umidade. Posteriormente, a amostra seca é colocada em um cadinho de porcelana com tampa e colocada em uma mufla, em torno de 600°C, até o peso ficar constante. Após a remoção da fração volátil, o material restante no

cadinho fechado é constituído principalmente por carbono fixo e cinzas. Em seguida retorna-se o cadinho à mufla, agora sem a tampa. O carbono é consumido pelo oxigênio presente no interior da mufla, restando a cinza. Nota-se que é um processo simples e que não há necessidade de equipamentos sofisticados ou mesmo técnicas complexas.

A Tabela 4 apresenta a análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, elaborada por diversos autores.

Tabela 4. *Variação da análise imediata do bagaço de cana de diversos autores.*

Referência		Umidade	Carbono fixo	Teor de voláteis	Cinzas
Rein, 2007	b s	0	12,94	87,06	livre
	b u	52	5,95	40,05	2
Camargo <i>et al.</i> , 1992	b s	0	13	83	4
Jenkins <i>et al.</i> , 1998	b s	0	11,95	85,61	2,44
Turn <i>et al.</i> , 1997	b s	0	11,81	84,51	3,61
IPT, 2007	b s	0	13	83	1,9
De Filippis, 2004	b s	0	9,3	88,7	2
Nassar, 1996	b u	7,6	12,3	84,3	3,4
Manyà e Arauzo, 2008	b u	2,2	17,8	74,98	5,02
Resende, 2003	b u	9,24	8,4	88,67	2,93

bs = base seca

bu = base úmida

2.1.3.4. Análise termogravimétrica

A análise térmica é a análise do comportamento físico de uma substância, bem como das transformações químicas que podem ocorrer, através de um processo de aquecimento ou resfriamento da amostra. Neste caso, a perda de massa da amostra é registrada no tempo em função da temperatura.

Estas análises mais específicas são comumente realizadas em materiais de natureza diversas, desde plásticos até materiais orgânicos compostos de polímeros naturais como é o caso da biomassa.

O método termogravimétrico de determinação de parâmetros cinéticos consiste em se aquecer uma amostra de matéria em um forno com temperatura (ou taxa de aquecimento) controlada, medindo-se a perda de massa desta amostra com uma balança de precisão, acoplada ao forno.

Neste processo se obtém a análise imediata do material estudado e parâmetros da cinética da evaporação e volatilização de seus compostos.

Para o bagaço de cana e outras biomassas é possível identificar as temperaturas de evaporação da umidade e a volatilização dos compostos orgânicos.

A Figura 13, elaborado por Resende (2003), traz a análise termogravimétrica do bagaço de cana com diversas velocidades de aquecimento, em atmosfera inerte (nitrogênio).

A Tabela 5 apresenta dados das análises termogravimétricas do bagaço de cana-de-açúcar, realizadas por diversos autores.

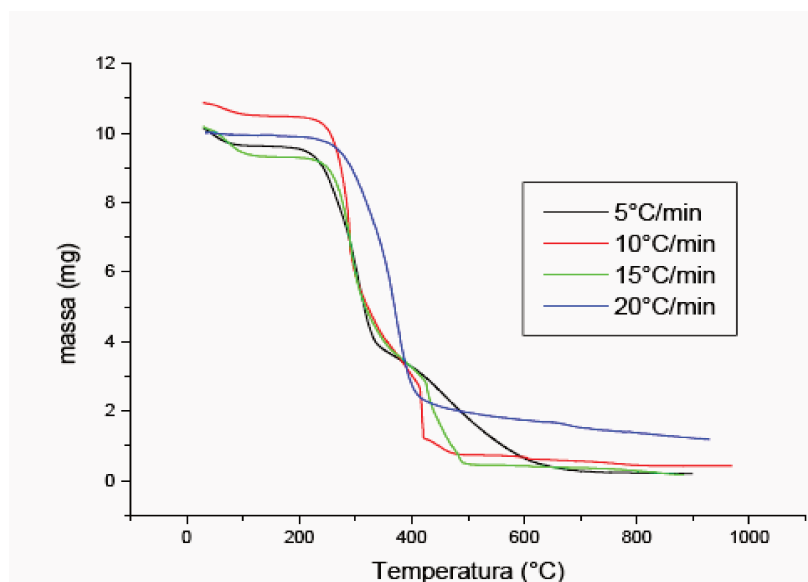


Figura 13. Curvas de TGA para o bagaço de cana em atmosfera inerte (Resende, 2003).

Tabela 5. *Dados da literatura da análise termogravimétrica do bagaço de cana.*

Referência	Meio usado	Massa usada (mg)	Taxa de aquecimento °c/min	Evaporação da H ₂ O				Volatilização		Descarbonização	
								Temperatura °c		Temperatura °c	
				Temperatura °c		Temperatura °c					
				Primeira perda		Segunda perda					
				Início	Final	Início	Final	Início	Final	Início	Final
Nassar, Ashour, Wahid (1996)	oxigênio atm.	18	5	ambiente	>100	125	200	225	347,5	400	455
	nitrogênio atm.	18	5	ambiente	>100	125	200	225	350	380	560
Sosa-Arnao (2007)	oxigênio atm.	1 a 2	10	ambiente	>100	110	200	200	420	350	700
	nitrogênio atm.	1 a 2	10	ambiente	>100	110	210	210	380	380	1200
García-Pérez <i>et al.</i> (2002)	nitrogênio atm.	4	10	amostra seca sem perdas		100	199	199	373	373	600
			20	amostra seca sem perdas		100	207	207	385	385	600
			30	amostra seca sem perdas		100	215	215	407	407	600
			40	amostra seca sem perdas		100	215	215	414	414	600
Resende (2003)	nitrogênio atm.	10	5	25	>100	100	215	215	400	400	800
			10	25	>100	100	220	220	425	425	800
			15	25	>100	100	220	220	480	480	800
			20	25	>100	100	240	240	460	460	800

Nota-se a existência de diferenças na apresentação dos resultados disponibilizado pelos autores.

2.1.3.5. Análise das cinzas

Cinzas são resíduos da combustão, compostas de óxidos que se apresentam normalmente em estado sólido à temperatura ambiente. As cinzas formadas pela combustão podem ser arrastadas bem como depositadas nos cinzeiros do combustor.

As cinzas nos combustíveis podem ter diversas origens, como elementos metálicos e não metálicos presentes na estrutura molecular do combustível devido a sua formação, fragmentos de argila, areia, sais, e outros compostos agregados ao combustível sólido e ainda fragmento de solo misturado ao combustível devido ao manuseio.

Os fragmentos agregados ou mesmo os fragmentos de mistura do solo podem ser retirados em partes por processos físicos tais como lavagem, decantação gravitacional, centrifugação, flotação ou outro método de separação.

As propriedades de interesse nas análises laboratoriais são a composição química e a fusibilidade das cinzas.

Estes parâmetros dão subsídios para avaliar o ataque ao refratário, ou seja escolhe-se refratários com composições semelhantes as das cinzas para que o refratário não seja atacado.

O ensaio de fusibilidade permite determinar a temperatura inicial e final do amolecimento das cinzas, uma vez que processos de combustão com temperaturas superiores ao ponto de amolecimento podem causar sinterização ou aglomeração de cinzas fundidas em partes que prejudicam a troca térmica.

É de interesse também a análise das cinzas para identificar óxidos alcalinos como Na_2O e K_2O que volatilizam e condensam por volta de 760°C propiciando aglomeração em partes frias causando corrosão e aglomeração que reduz também a taxa de troca térmica. A Tabela 6 apresenta a composição das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e a Tabela 7, as temperaturas de fusibilidade e amolecimento.

Tabela 6. *Composição das cinzas do bagaço de cana*

Referências	Rein, 2007	Camargo <i>et al.</i> , 1992	Jenkins <i>et al.</i> , 1998	Turn <i>et al.</i> , 1997	Gabra, 2001	Manyà e Arauzo, 2008
SiO ₂	75,20	46,00	46,61	41,87	72,30	64,29
Al ₂ O ₃	2,70	2,80	17,69	22,25	8,00	3,44
Fe ₃ O ₃	2,60	3,00	14,14	20,90	6,20	3,69
Ti ₃ O ₂	0,01	0,53	2,63	3,87	0,60	1,25
BaO		0,13				0,70
P ₂ O ₅	1,46		2,72	1,13	0,90	2,89
CaO	6,90	5,40	4,47	3,50	4,20	4,84
MgO	1,70	0,79	3,33	1,45	2,30	1,33
NaO ₂	0,60	0,50	0,79	0,26	1,00	0,31
K ₂ O	5,10	23,00	0,15	2,59	4,50	14,34
SO ₃	2,70		2,08	0,90		0,97
MnO ₂	0,02	7,30	3,33		0,10	0,54
outros elementos	0,92	10,55	2,06	1,28	-0,10	1,41
Total	99,91	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 7. *Temperatura de fusibilidade e de amolecimento das cinzas °C, Camargo et al (1992)*

Atmosfera oxidante	T inicial	960
	T final	1235
Atmosfera redutora	T inicial	915
	T final	1130

Miles *et al.* (1996) alertam que os métodos de determinação de composição e ponto de fusão de cinzas desenvolvidos para carvões minerais não são adequados para biomassas com teores elevados de álcalis. Primeiro, porque os álcalis se volatilizam nas temperaturas recomendadas para obtenção de cinzas de carvão mineral, alterando a sua composição.

Segundo, porque grande quantidade de álcalis é perdida durante o processo de obtenção de cinzas e testes de fusibilidade, aumentando artificialmente a temperatura de fusão. Assim sendo, amostras de cinzas de biomassas com teor elevado de álcalis devem ser obtidas a 600°C, segundo a norma ASTM D1102, desenvolvida especificamente para combustíveis com cinzas com teores elevados de álcalis.

2.1.3.6. Poder calorífico

Moran e Shapiro (2002) definem, de forma objetiva, o poder calorífico de um combustível como sendo um número positivo e igual ao módulo da entalpia de combustão. E que dois poderes caloríficos são reconhecidos por esse nome, o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). O PCS é obtido quando toda a água formada na combustão é líquido e que o PCI é obtido quando toda a água formada na combustão é vapor, e a diferença entre esses poderes caloríficos equivale a energia necessária para vaporizar a água formada na combustão.

Estes números têm grande relevância nos trabalhos de dimensionamento de equipamentos de combustão e a medição do poder calorífico superior é uma análise importante para a caracterização de um combustível. Para combustíveis sólidos com determinadas características previamente conhecidas, PCS e PCI podem ser calculados através de equações específicas, utilizando tanto a análise elementar quanto a análise imediata.

É comum encontrar na literatura a determinação do poder calorífico superior (PCS) com um equacionamento em função da análise elementar do bagaço. Estas equações também podem ser usadas para muitas outras biomassas pois, a variação dos principais elementos como carbono, hidrogênio e oxigênio é relativamente pequena para qualquer biomassa.

Observando essas informações é possível utilizar um equacionamento para a determinação do poder calorífico superior (PCS) e obteremos um valor relativamente próximo aos mensurados, desde que se conheça a análise elementar.

O que causa uma grande variação no poder calorífico de uma biomassa são a sua umidade e o teor de cinzas. Channiwala e Parikh (2002) apresentam uma fórmula universal para o cálculo do PCS de diversos combustíveis, dentre eles, o das biomassas secas.

$$PCS = 0,3491 C + 1,1783 H - 0,1034 O - 0,0151 N - 0,0211 CZ + 0,1005 S \quad (3)$$

cuja faixa de validade é: $0\% \leq C \leq 92,25\%$; $0,43\% \leq H \leq 25,15\%$; $0,00\% \leq O \leq 50,00\%$; $0,00\% \leq N \leq 5,60\%$; $0,00\% \leq S \leq 94,08\%$; $0,00\% \leq CZ \leq 71,4\%$; $4,745 \text{ MJ/kg} \leq PCS \leq 55,345 \text{ MJ/kg}$.

Segundo os autores, o valor calculado a partir desta expressão, apresenta um erro absoluto da ordem de 1,45 % para um grande número de combustíveis.

Tabela 8. *PCS do bagaço de cana fornecido e calculado pelas equações Channiwala e Parikh (2002)*

Poder Calorífico Superior (b.s.)			
Referência	Fornecido pelo autor (MJ/kg)	Calculado segundo a equação (3) (MJ/kg)	Diferença (%)
Camargo 1989	18,90	19,18	1,5
Rain 2007	18,66	18,65	0,1
Jenkins et all 1998	18,99	19,42	2,3
S. Q.Turn,et all 1997	18,50	19,05	3,0
IPT 2007	18,90	17,91	5,2

Normalmente, para combustíveis sólidos, o valor determinado em laboratório é o poder calorífico superior (PCS) do material seco. O poder calorífico inferior do material seco (PCI) é calculado a partir do PCS e da análise elementar, onde desconta-se a entalpia de vaporização do vapor de água formado na combustão. A fórmula de cálculo do PCI é apresentada a seguir.

$$m_{H_2O} * h_{lv(25^\circ C)} = PCS - PCI \quad (4)$$

onde:

$h_{lv(25^\circ C)}$ é a entalpia de vaporização da água a 25°C

A massa de água formada na combustão é calculada através da expressão

$$m_{H_2O} = 9.h \quad (5)$$

onde:

h é o teor de hidrogênio no combustível sólido seco, determinado a partir da análise elementar apresentada anteriormente.

Se o combustível tiver uma determinada umidade (a), em base úmida, a relação entre os poderes caloríficos é:

$$H_u = (1-a)PCS - 9*(1-a) h * h_{lv(25^\circ C)} - a * h_{lv(25^\circ C)} \quad (6)$$

onde:

H_u é o poder calorífico inferior relativo ao material úmido (a), que é fração mássica de água de material úmido.

Utilizando a análise imediata do combustível pode-se obter também o poder calorífico. Demirbas (1997) propõe dois equacionamentos para a determinação do poder calorífico superior (PCS), apresentados pelas equações 7 e 8, em (MJ/kg). Da mesma forma Cardero *et al.* (2001) propõem outro equacionamento com o mesmo intuito, na equação (9), também em MJ/kg. Nos três casos o material é isento de umidade e a soma de carbono fixo, material volátil e cinzas é igual a 100%.

$$PCS = 0,196(FC) + 14,119 \quad (7)$$

$$PCS = 0,312(FC) + 0,1534(VM) \quad (8)$$

$$PCS = 0,3543(FC) + 0,1708(VM) \quad (9)$$

onde:

FC = carbono fixo

VM = material volátil

Cz = cinzas

Utilizando os dados que disponíveis sobre o bagaço de cana na literatura e aplicando a eles os equacionamentos, obtemos os resultados da Tabela 9. Pode-se notar que o equacionamento 9 se ajusta melhor para o bagaço de cana, de acordo com os dados experimentais obtidos da literatura. Utilizando esses equacionamentos pode-se ter uma estimativa razoável do poder calorífico superior, através da análise imediata do combustível.

Tabela 9. *Cálculo comparativo do PCS das equações 7, 8 e 9.*

Poder Calorífico (b.s.)			
Referência	Superior (MJ/kg)	PCS calculado segundo a equação (7) (MJ/kg)	Diferença em % entre o experimental e o calculado
Camargo <i>et al.</i> , 1992	18,9000	16,6552	13,48
Rein, 2007	18,6600	17,3923	7,29
Jenkins <i>et al.</i> , 1998	18,9900	16,8610	12,63
Turn <i>et al.</i> , 1997	18,5000	16,7882	10,20

Referência	Superior (MJ/kg)	PCS calculado segundo a equação (8) (MJ/kg)	Diferença em % entre o experimental e o calculado
Camargo <i>et al.</i> , 1992	18,9000	16,67	13,48
Rein, 2007	18,6600	16,66	7,29
Jenkins <i>et al.</i> , 1998	18,9900	16,46	12,63
Turn <i>et al.</i> , 1997	18,5000	16,43	10,20

Referência	Superior (MJ/kg)	PCS calculado segundo a equação (9) (MJ/kg)	Diferença em % entre o experimental e o calculado
Camargo <i>et al.</i> , 1992	18,9000	18,78	0,63
Rein, 2007	18,6600	19,45	-4,08
Jenkins <i>et al.</i> , 1998	18,9900	18,86	0,71
Turn <i>et al.</i> , 1997	18,5000	18,62	-0,64

Por outro lado é possível determinar o poder calorífico inferior (PCI) do bagaço de cana também através de equacionamentos, como foi proposto empiricamente por Hugot (1986):

$$PCI = 17790 - 50,23ss - 203ubc \quad (10)$$

Ou ainda de acordo com a proposição de Wienese (2001, apud Rein, 2007):

$$PCI = 18260 - 207,01*ubc - 182,6*z_a - 31,14ss \quad (11)$$

onde:

ss = Sólidos Solúveis no bagaço (%) (brix)

ubs = Conteúdo de umidade do bagaço em base úmida (b.u.)

PCI = Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)

z_a = fração mássica da água (%)

Nota-se que não importa qual das equações se utiliza (10 ou 11), há sempre um decréscimo progressivo do poder calorífico com relação ao aumento da umidade contida no bagaço, ou seja, quanto maior a umidade, menor o poder calorífico do bagaço.

2.1.3.7. Morfologia das partículas de bagaço

O bagaço de cana, como foi discutido anteriormente, é composto de uma grande quantidade de partículas de diferentes formas e tamanhos e geometria, e é formado por aglomerados dessas partículas, fisicamente diferentes. Essa diversidade de forma, as características do armazenamento (compactação) e a umidade fazem com que o bagaço forme “aglomerados” das mais diversas dimensões, desde poucos milímetros até de poucos metros, com formatos irregulares. Mas esses “aglomerados” apesar de terem baixa resistência mecânica trazem dificuldades para o uso que é feito hoje, a queima direta em fornalha de caldeira.

Basicamente o bagaço é formado por fibras, em formato de bastonetes, e medula, de forma mais arredondada, conforme mostrado nas Figuras 14, 15 e 16. Ambas são muito porosas e higroscópicas e com diversas granulometrias.

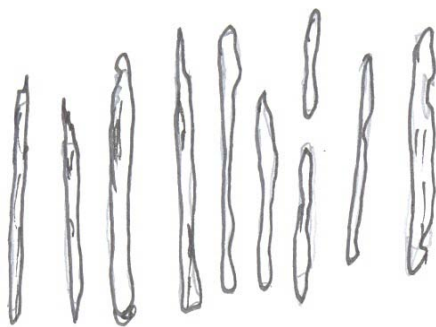


Figura 14. Esquema das fibras em forma de bastonete com diversas granulometrias.

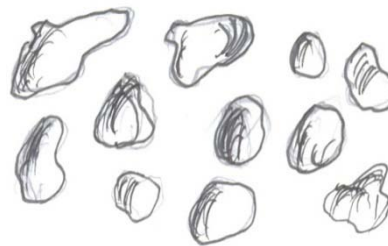


Figura 15. Esquema das partículas em forma arredondadas com diversas granulometrias.

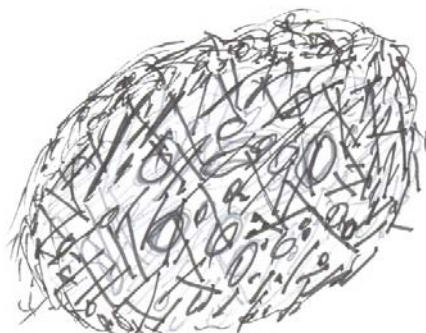


Figura 16. Esquema do aglomerado de bastonetes e medula com vários tamanhos.

Nebra (1985) afirma que ao observar uma amostra de bagaço de cana é fácil notar dois grupos distintos bem diferenciados, não importando o processo de extração. Partículas maiores comumente denominadas fibra e partículas menores denominadas medula.

Nebra e Macedo (1988) após separarem o bagaço por peneiras determinaram o formato típico da fibra e da medula ou pó, e observaram ainda que o formato típico, tanto da fibra quanto da medula, é na forma de tronco cilíndrico. A relação entre altura (L_p) e base (a_p) configura-se diferentemente na fibra e na medula. A fibra apresenta uma grande altura (L_p) em relação a base elipsóide (b_p), e a medula, uma base (a_p) maior em relação a altura (L_p), conforme mostrado nas Figuras 17 e 18.

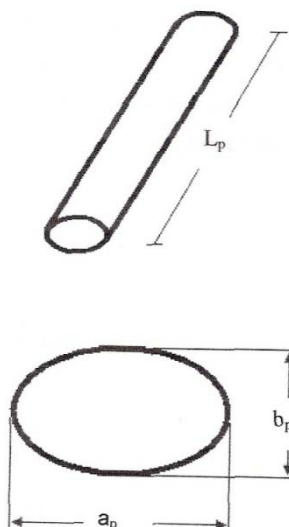


Figura 17. Característica geométrica da fibra do bagaço
(Nebra e Macedo, 1988)

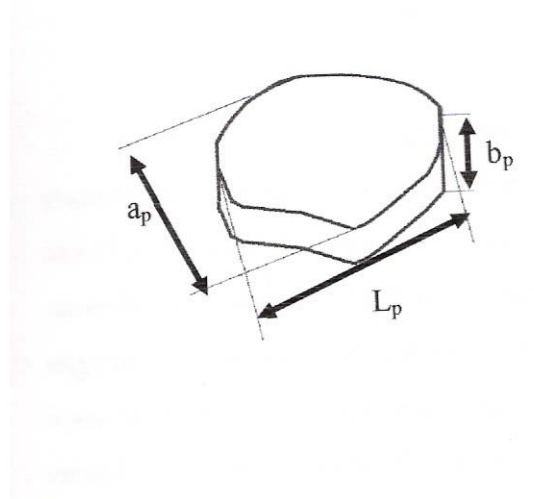


Figura 18. Características da medula ou pó do bagaço (Nebra e Macedo, 1988)

Sosa-Arnan (2007) analisando amostras de bagaço de cana obtidas tanto através de difusores como através de moendas obteve cerca de 72,5% de fibras e 27,5% de pó ou medula, independente da forma de obtenção.

Kunii e Levenspiel (1991) recomendam a separação das partículas através de peneiras previamente definidas para determinar o diâmetro médio das partículas. Para que se possa ter uma representatividade da população das partículas usa-se uma série de peneiras sobrepostas para que as partículas maiores fiquem retidas nas peneiras superiores, assim as partículas ficam segregadas por frações de diâmetro ou tamanho utilizando a equação (12).

$$\overline{d_p} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x}{d_p} \right)} \quad (12)$$

onde :

x = fração de peso no intervalo

d_p = o diâmetro médio da partícula para cada peneira (mm)

Foust (1982) propõe que para cada malha é determinado o “diâmetro” médio da partícula (d_p) de acordo com as dimensões das peneiras conforme a equação (13):

$$\ln d_p = \frac{\ln e_s + \ln e_i}{2} \quad (13)$$

onde:

e_s = Espaçamento da peneira superior;

e_i = Espaçamento na peneira inferior em que as partículas ficam retidas.

Utilizando esse método, Sosa-Arno (2007) separou o bagaço de cana processado em difusor e outro processado em moenda e obteve a distribuição granulométrica conforme Tabela 10 e Figura 19.

Tabela 10. *Distribuição granulométrica do bagaço separado por peneiras (Sosa-Arno, 2007)*

Análise granulométrica do bagaço separado por peneiras			
Abertura das peneiras	Fração em massa - difusor	Fração em massa - moenda	Diâmetro médio
(mm)	(g)	(g)	(mm)
0,000	1,403	1,128	< 0,3
0,223	3,123	5,546	0,314
0,444	9,903	12,739	0,628
0,890	7,912	15,476	1,337
2,010	2,171	6,360	2,921
4,245	0,936	4,755	4,902
5,660	13,862	3,180	5,660

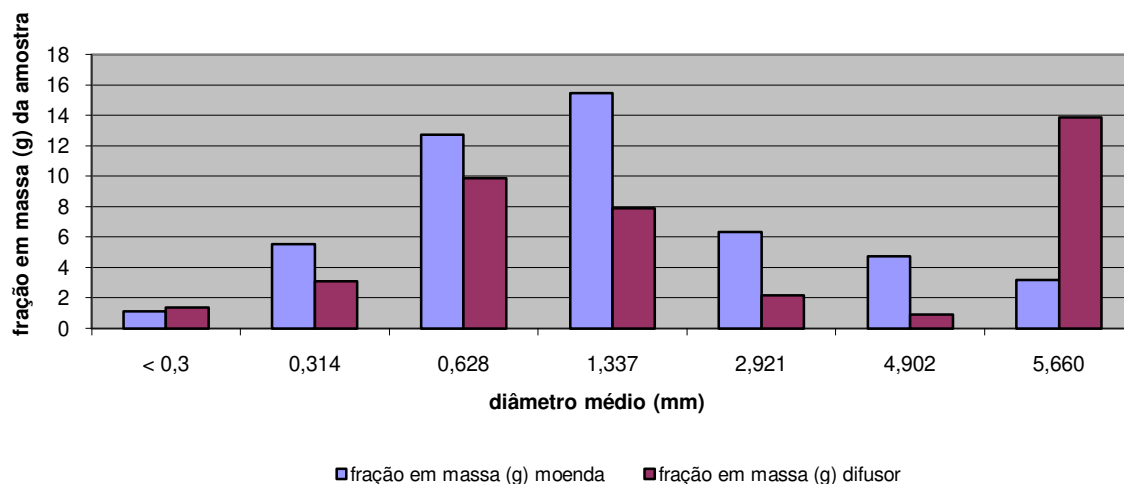


Figura 19. Análise granulométrica do bagaço separado por peneiras (Sosa-Arnan, 2007)

A utilização de peneiras para caracterizar a geometria das partículas do bagaço de cana-de-açúcar não é suficiente, pois o bagaço apresenta uma diversidade muito grande de forma e tamanho (Sosa-Arnan, 2007).

Sosa-Arnan (2007) separou as partículas de medula da fibra, manualmente uma a uma, identificando a distribuição de fibra e medula em uma amostra, conforme Tabela 11.

Tabela 11. Distribuição granulométrica de uma amostra do bagaço separada por peneiras (Sosa-Arnan, 2007)

Abertura das peneiras (mm)	Diâmetro médio (mm)	Moenda			Difusor		
		Fibra (g)	Medula (g)	Total (g)	Fibra (g)	Medula (g)	Total (g)
5,660	5,660	3,3093	0,0280	3,3373	14,4668	0,1283	14,5951
4,245	4,902	5,176	0,0790	5,2550	0,3920	0,0078	0,3998
2,010	2,921	5,069	0,6221	5,6915	2,7143	0,3630	3,0773
0,890	1,337	12,545	3,7429	16,2877	7,1779	3,3478	10,5257
0,444	0,470	5,443	5,5218	10,9646	4,7776	5,5703	10,3479
0,220	0,230	2,603	2,7070	5,3099	2,1079	2,5753	4,6832
total		34,1452	12,7008	46,8460	31,6365	11,9925	43,6290

Com esses estudos verifica-se uma grande dificuldade para a separação do bagaço de cana com o intuito de deixá-lo mais homogêneo, e a difícil caracterização quanto à forma desta biomassa.

Forma e tamanho são inseparáveis em um objeto qualquer, e ambos são necessários para se descrevê-lo satisfatoriamente (Mohsenin, 1986). No entanto, para o bagaço de cana é muito difícil mensurar a forma e o tamanho das diversas partículas que compõem seu aglomerado, o que torna muito difícil determinar as dimensões exatas das partículas do bagaço de cana.

Para a determinação dos dimensionamentos fluidodinâmicos ou para a utilização em simulações computacionais, determina-se a esfericidade utilizando-se do fator de forma, que é uma aproximação para que a partícula seja considerada uma esfera, este formato conhecido facilita os dimensionamentos e cálculos.

Mohsenin (1986) propõe uma expressão muito prática para o cálculo da aproximação da esfericidade onde se relaciona o diâmetro de uma esfera de igual volume que se quer medir e o diâmetro da menor esfera circunscrita, através da correlação:

$$\phi = d_e/d_{ec} \quad (14)$$

onde :

d_e é o diâmetro de uma esfera de mesmo volume da partícula a ser medida.

d_{ec} é o diâmetro da menor esfera circunscrita na partícula.

Este método é muito utilizado para a medição de partículas sólidas de areia, carvão, grãos e outras, com resultados bem próximos a uma esfera. Existem outros métodos na literatura para se calcular a esfericidade dos materiais, mas todos necessitam dos diâmetros médios para o cálculo das esfericidades.

2.1.3.8. Densidade do bagaço

A densidade de uma biomassa qualquer pode ser mensurada de três maneiras distintas, dependendo do interesse ou necessidade, são elas a densidade a granel, a densidade real ou absoluta e a densidade aparente.

2.1.3.8.1. Densidade a granel do bagaço

Na literatura, o mais comum de se obter é a densidade a granel, que é definida como sendo a razão entre a massa das partículas pelo volume ocupado pelas mesmas incluindo seus poros e os vazios entre elas, e é dado em kg/m^3 .

Na literatura a densidade a granel do bagaço de cana é caracterizada por um valor não homogêneo. Isso é bem compreensível, pois as variações das características do bagaço são determinadas por muitas condições, tais como a umidade, a granulometria, influência do tipo de moenda ou difusor, e todas as demais variáveis vistas anteriormente.

Rein (2007) afirma que a medida mais comum para o bagaço da cana-de-açúcar é a densidade a granel da fibra seca (massa por unidade de volume do bagaço seco) e que é uma medida relativamente constante, desde que a fibra seja bem fragmentada ou picada, não compactada. No entanto, a fibra pode absorver de 5 a 6 vezes a sua massa em água sem que se altere seu volume a granel (pay).

Alarcon *et al.* (2006) publicaram um estudo com valores da densidades a granel em relação a diversas granulometrias do bagaço de cana como mostra a Tabela 12.

Tabela 12. *Densidade a granel em função do diâmetro da partícula segundo Alarcon et al (2006)*

Diâmetro médio da partícula (mm)	valor experimental (kg/m³)
1,595	52
1,015	29
0,63	69
0,358	87
0,253	95
0,157	104

Segundo Murry (1960), a densidade a granel do bagaço de cana seco e picado pode variar de 55 kg/m³ até 66 kg/m³, e Rein (2007) completa que, com os novos métodos padrão utilizados, com alguma compressão, em fibras finas se tem densidade a granel de até 90 kg/m³ ou ainda, com fibras grossas esta densidade pode ser de até 75 kg/m³.

Rein (2007) sugere que, quando o bagaço de cana é armazenado úmido e em grandes montes ou pilhas com vários metros de altura, a densidade a granel está em torno de 200kg/m³ e que esse número, de uma forma grosseira, pode ser usado como estimativa.

Morgan *et al.* (1974) mostram, através de gráfico (Figura 20), uma relação útil entre a densidade a granel e a altura das pilhas, e mostram claramente que a compactação é de fato um fator que altera muito a densidade a granel.

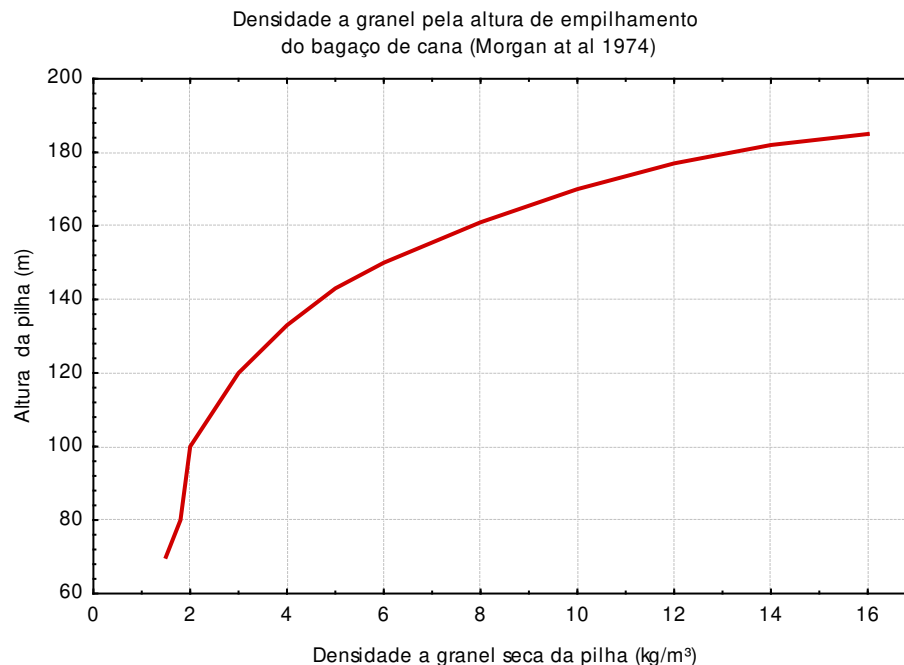


Figura 20. Densidade a granel pela altura de empilhamento do bagaço. (Morgan et al., 1974).

Em função das variáveis que influenciam na determinação da densidade do bagaço de cana, a existência da normalização para a determinação da densidade a granel de biomassas pela ASTM E873-82 não é suficiente para uma padronização.

2.1.3.8.2. Densidade real do bagaço

A densidade real ou simplesmente densidade de uma partícula de biomassa ou de qualquer outro material, é dada também em kg/m^3 e definida como sendo a razão entre a massa da partícula sólida pelo volume do material sólido que compõe a partícula, não incluindo o volume dos poros que eventualmente possam compor a estrutura sólida da partícula.

Para materiais sólidos e não higroscópicos essa medida não é muito complicada de se obter utilizando-se o picnômetro para mensurar este parâmetro, usando água ou outro líquido conhecido, uma vez que as partículas não incorporarão esse fluido.

Já para as biomassas como o bagaço de cana, que não tem homogeneidade de formato de partículas e também é um material poroso, o método é a utilização de um picnômetro a gás de hélio. Uma amostra é colocada em um volume conhecido, retira-se o ar e depois coloca-se gás hélio em uma pressão conhecida e pela diferença de massa determina-se a densidade real da partícula com grande precisão.

2.1.3.8.3. Densidade aparente do bagaço

A densidade aparente de uma partícula de bagaço ou de outra partícula qualquer é dada em kg/m^3 e definida pela razão da massa da partícula pelo volume ocupado por essa partícula e seus poros.

Esse parâmetro é de grande relevância quando se estuda a fluidodinâmica das partículas de bagaço pois volume e massa têm grande influência nos resultados.

O método de mensuração deste parâmetro pode ser através de um picnômetro de líquido ou mesmo um picnômetro de gás, mas o cuidado que deve se ter é a impermeabilização completa das partículas, o que é trabalhoso e não preciso pois mascara a rugosidade e se não for feito com critério gera uma alteração nas dimensões da partícula.

Um método simples para se determinar a densidade aparente, porém de resultados limitados, é proposto por Alarcon *et al.* (2006) onde, usando o método de fluxo de gás de Ergum (1952) calcula-se a porosidade do leito de bagaço e em função da granulometria e da massa das partículas se obtém o valor da densidade aparente do bagaço.

Alarcon *et al.* (2006) mostram a densidade aparente do bagaço de cana, em função do diâmetro média das partículas, conforme apresentado na Tabela 13. Vale ressaltar que os autores denominam esta densidade de densidade real.

Tabela 13. *Densidade absoluta do bagaço de cana em função do diâmetro da partícula. Alarcon et al (2006)*

Diâmetro médio da partícula (mm)	Valor experimental (kg/m³)
1,595	123,3
1,015	146,4
0,63	175,4
0,358	232,9
0,253	273,6
0,157	411,3

2.2. Fluidodinâmica da partícula

A caracterização das partículas do bagaço é uma das etapas necessárias ao conhecimento deste material para aproveitamento energético, que inclui não só os aspectos intrínsecos como as dimensões, densidade, forma e morfologia, mas também seus comportamentos fluidodinâmicos.

A maneira usual de caracterização granulométrica do bagaço de cana é a separação das partículas através de peneiramento. Esse método mecânico é o mais empregado para separação de partículas com grande dispersão de tamanho. A separação das diferentes frações é feita usando peneiras padronizadas pela abertura de furos. Essas peneiras são dispostas umas sobre as outras, na sequência do topo para a base em ordem decrescente, ou seja, da maior para a menor malha de interesse. As malhas da série Tyler são as mais usadas, sua malha é padronizada em função do número de furos pela área que esses furos ocupam e numeradas em uma escala própria.

O processo de peneiramento é realizado quando uma amostra é cuidadosamente pesada e colocada na peneira de maior malha no topo da bateria de peneiras, que são colocadas num dispositivo vibratório, por um tempo pré-determinado. Assim as partículas de maior dimensão ficam retidas e subsequentemente as malhas capturam as partículas menores que a anterior e

maiores que a malha, retendo-as e deixando passar as partículas menores que a malha, assim se obtém uma classificação das partículas em função das dimensões.

Esse método de classificação é muito adequado para partículas de formatos onde as dimensões largura, comprimento, e altura são próximos, como em um cubo ou mesmo uma esfera. No entanto, para partículas com dimensões de comprimento muito maiores que a altura e a largura, como um cilindro longo, seu uso pode causar distorções na classificação, tal como acontece com o bagaço de cana, que é composto de uma mistura de partículas de diferentes formas e granulometrias, como afirmam Nebra (1985), Rasul e Rudolph (2000) e Sosa-Arnan (2007).

Existem várias maneiras de caracterização de forma e de tamanho de partículas não necessariamente separando fisicamente as partículas, como as técnicas de imagem, de resistividade e a óptica.

Outro método de caracterização e separação de partículas sólidas é a sedimentação, que segundo Yang (2004), parte do princípio físico de que as partículas tendem a precipitar segundo as leis de queda livre. Com a velocidade de queda livre da partícula em um meio viscoso conhecido sob influência da força gravitacional pode-se medir o tamanho da partícula em relação à gravidade. A distribuição de tamanhos das partículas, neste caso, é expressa em termos do diâmetro da esfera que tem a mesma velocidade terminal que a partícula no movimento, como afirma Cortez *et al.* (2008).

As partículas sólidas ocorrem na natureza de quase todas as formas imagináveis sendo que a maioria delas são de formatos irregulares. Todos os fatores de forma propostos até hoje, segundo Yang (2004), podem ser criticados, pois uma série de corpos com diferentes formas podem ter o mesmo fator de forma. Isso é realmente inevitável quando se usa um único parâmetro, então, na escolha do fator de forma da partícula os cuidados devem ser no sentido de garantir a relevância deste parâmetro.

Em 1933, Wadell propôs o grau de esfericidade da partícula, que é definido como:

$$\phi = \left(\frac{\text{Área superficial de uma esfera de volume equivalente a partícula}}{\text{Área superficial da partícula}} \right)^2 = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2 = \frac{d_{sv}}{d_s} \quad (15)$$

onde:

d_v é o diâmetro de esfera, ou seja, o volume da partícula é expresso como uma esfera, que matematicamente se escreve:

$$d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad (16)$$

e V_p é o volume da partícula.

O diâmetro de superfície d_s é definido como o diâmetro de uma esfera com a mesma superfície da partícula e matematicamente pode ser escrito como:

$$d_s = \left(\frac{S_p}{\pi} \right)^{1/2} \quad (17)$$

onde S_p é a área da superfície da partícula.

E d_{sv} que é o diâmetro de superfície do volume estudado, também conhecido como diâmetro Sauter, é definido como uma esfera com a mesma área da superfície externa da partícula com relação ao seu volume (Yang, 2004), que pode ser escrito como:

$$d_{sv} = \frac{6V_p}{S_p} = \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (18)$$

Assim pode-se obter um fator de forma com um número adimensional. Estes estudos que estão bem detalhados em Clif *et al.* (1978), Kunii e Levenspiel (1991), Yang (2004) e Chhabra (2007).

Os cuidados que se deve ter para o método de sedimentação são com relação à concentração das partículas, para que a interação entre elas seja pequena, e à influência das paredes do leito sobre as partículas, que também não podem ser desprezadas (Yang, 2004). O efeito parede é exhaustivamente estudado em Chhabra (2007) e Clift *et al.* (1978).

Quando um fluido está contido em dimensões finitas o fluxo deste fluido sofre distorções quando está próximo à parede que o delimita. Em função dessas distorções tem-se um acréscimo das forças de arraste nas partículas que também estão próximas à mesma parede e que podem ser expressas pela equação (19):

$$F_s = 3\pi d_p \mu U_r \left(1 + k_c \frac{d_p}{L_w} \right) \quad (19)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e L_w é a distância entre o centro da partícula e a parede, sendo k_c o coeficiente em função do tipo de parede. Para parede única o K_c é 0,563, para duas paredes paralelas o K_c é dado por 1,004 e para parede cilíndrica o K_c é 2,104 (Yang 2004).

Um outro método que usa os mesmos princípios físicos da sedimentação é a elutriação, que ao invés das partículas serem dispostas em um meio viscoso e à velocidade menor que a de queda livre, são dispostas em um escoamento contra a corrente com velocidades do escoamento maiores que a de queda livre das partículas e são arrastadas e posteriormente capturadas e separadas.

Quando os elutriadores forem operados com diferentes velocidade do escoamento pode-se obter partículas com diferentes tamanhos e com diferentes velocidades de arrasto.

Também na elutriação as concentrações de partículas afetam os resultados das medições, e o cuidado com o efeito das paredes tem que ser levado em consideração, tal como na sedimentação. Tanto a técnica de elutriação quanto a de sedimentação são muito dependentes das forças que regem a fluidodinâmica da partícula.

Para uma partícula em movimento em um fluido, a força que atua sobre a superfície de uma partícula depende apenas do fluxo do fluido na sua proximidade imediata. Em muitos casos pode-se considerar uma partícula única movendo-se com velocidade constante w_s , em relação a suas imediações; pode-se ainda assumir também o fluido newtoniano para avaliar os parâmetros fluidodinâmicos que governam o fenômeno.

A força de arrasto F_D exercida em uma partícula precipitando em velocidade uniforme w_s em um fluido em repouso que é dada em termos do coeficiente de arrasto CD , que é dado pela equação (20):

$$F_D = \frac{CD \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot w_s^2}{2} \quad (20)$$

onde A_p é a projeção normal da área da partícula na direção do movimento e ρ_f é a densidade do fluido.

Yang (2004) diz que coeficiente de arrasto é a razão entre a força e a pressão do fluido exercida sobre a área projetada pela partícula.

No caso de queda livre Tran-Cong *et al.* (2004) afirmam que quando uma partícula está em queda livre sob a ação da gravidade, em um gás ou líquido em repouso, esta acelera até atingir a velocidade terminal w_t e o arrasto que o gás ou líquido exerce gera uma força sobre a partícula que se contrapõe à força gravitacional.

O coeficiente de arrasto CD é dependente do número de Reynolds da partícula, da compressibilidade do gás, do grau de turbulência do fluido, da rugosidade externa da partícula, da permeabilidade (se houver), do gradiente de temperatura e da forma da partícula.

A equação normalmente usada para a determinação do coeficiente de arrasto de uma única partícula em queda livre, sendo essa partícula esférica e obedecendo as condições de Stokes $Re_p < 0,2$, é:

$$CD = 24 \left(\frac{\mu}{d_p \rho_f w_s} \right) = \frac{24}{Re_p} \quad (21)$$

ou

$$CD = \frac{3}{4} \frac{d_p (\rho_p - \rho_f) g}{\rho_f w_s} \quad (22)$$

onde g é a aceleração da gravidade.

Para uma esfera em queda livre em um meio infinito o coeficiente de arrasto tem sido correlacionado ao parâmetro adimensional conhecido como número de Reynolds (Re_p) que é dado por:

$$Re_p = \frac{w_s d_p \rho_f}{\mu_f} \quad (23)$$

onde μ_f é a viscosidade dinâmica do fluido.

Diversas correlações de CD para partículas esféricas são mostradas por Clif *et al.* (1978), Yang (2004) e Chhabra (2007), e são disponibilizadas em tabelas em função das faixas dos números de Reynolds, ou seja, para cada faixa de Reynolds existe igual quantidade de correlações, começando pelas definidas por Stokes em 1851 até as mais recentes. Clif *et al.* (1978) também sugerem uma correlação para Re_p maiores que 3×10^{-5}

$$CD = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 Re_p^{-1,16}} \quad (24)$$

Para uma partícula esférica, Turton e Levenspiel (1986), também citados por Yang (2004) e Chhabra (2007), propõem uma única correlação aplicável em toda a faixa do número de Reynolds simplificando o cálculo do coeficiente de arrasto para uma única partícula, que é dado pela equação (25):

$$CD = \frac{24}{Re_p} \left[1 + 0,173 (Re_p)^{0,657} \right] + \frac{0,413}{1 + 16300 (Re_p)^{-1,09}} \quad (25)$$

E subsequentemente Haider e Levenspiel (1989) ampliam o equacionamento para partículas não esféricas e propõem:

$$CD = \frac{24}{Re_p} \left[1 + (8,1716 \cdot e^{0,0964 + 0,5565\phi}) \right] + \frac{73,69 (e^{-5,0748\phi}) Re}{Re_p + 5,378 e^{6,2122\phi}} \quad (26)$$

E para partículas esféricas, o reduzem para:

$$CD = \frac{24}{Re_p} + 3,3643 Re^{0,3471} + \frac{0,4607 Re}{Re_p + 2682,5} \quad (27)$$

Chhabra (2007) afirma que a equação (26) tem erros muito grandes ao longo do espectro do número de Reynolds, mas que isso ocorre em qualquer equacionamento para partículas não esféricas e que esse equacionamento é o melhor que pode-se ter até o momento, pois surgem

fatores de complicações adicionais em caso de partículas irregulares, devido aos problemas inerentes da medição de tamanho e superfície das partículas.

A velocidade terminal de uma única partícula é intrínseca às características dela, seu cálculo e medidas são tão importantes quanto outros parâmetros que foram discutidos, tal como tamanho, forma, densidade e outros.

Haider e Levenspiel (1989) mostram que é possível o cálculo direto da velocidade terminal de uma única partícula esférica em função da equação (22).

$$w_s = w_t = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_p (\rho_p - \rho_f) g}{\rho_f C_D}} \quad (28)$$

Combinando a equação (28) e recorrendo ao equacionamento proposto por Haider e Levenspiel (1989) na equação (26), a velocidade terminal pode ser calculada.

Haider e Levenspiel (1989) sugerem um método de aproximação para a avaliação direta da velocidade terminal definindo o tamanho da partícula adimensional d_p^* e o adimensional de velocidade w^* , que é dado por:

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2} \right]^{1/3} = Ar^{1/3} = \left(\frac{3}{4} C_D Re^2 \right)^{1/3} \quad (29)$$

$$w^* = w \left[\frac{\rho_f^2}{\mu (\rho_p - \rho_f) g} \right]^{1/3} = \frac{Re}{Ar^{1/3}} = \left(\frac{4}{3} \frac{Re}{C_D} \right)^{1/3} \quad (30)$$

A velocidade terminal de uma partícula irregular pode ser calculada com:

$$w_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2,335 - 1,744\phi}{(d_p^*)^{0,5}} \right]^{-1} \quad \text{para } 0,5 < \phi < 1 \quad (31)$$

Para partícula esférica o equacionamento se reduz para:

$$w_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0,591}{(d_p^*)^{0,5}} \right]^{-1} \quad \text{para } \phi = 1 \quad (32)$$

onde Ar é o número de Arquimedes.

Nota-se que um dos parâmetros importantes é a densidade da partícula ρ_p e, como foi dito por Chhabra (2007) esse parâmetro é um dos que podem ser de difícil mensuração.

Ganser (1993) propõe outro equacionamento para partículas isométricas e não isométricas, dada por:

$$CD = \left(\frac{24}{Re1} \right) [1 + 0,1118(K_2 Re1)^{0,657}] + \frac{0,4305 K_2}{1 + \left(\frac{3305}{K_2 Re1} \right)} \quad (33)$$

Sendo

$$Re1 = K_1 Re_p$$

K_1 e K_2 são dois fatores de forma relacionados com ϕ e o d_n diâmetro da esfera, com área projetada equivalente.

Para partícula isométrica:

$$\left(\frac{1}{K_1} \right) = [0,33 + 0,67(\phi)^{-0,5}] \quad (34)$$

Para partícula não isométrica:

$$\left(\frac{1}{k_1} \right) = \left(\frac{d_n}{3d_s} \right) + \left(\frac{2}{3} \right) \phi^{-0,5} \quad (35)$$

O fator de forma K_2 é dado por:

$$\log k_2 = 1,815(-\log \phi)^{0,574} \quad (36)$$

Em 1994 Chien propõe uma equação que Chhabra (2007) afirma ter um erro menor que as outras propostas até então, e que o erro é maior nas partículas com esfericidade (ϕ) menores.

$$CD = \frac{30}{Re} + 67,289e^{(5,03\phi)} \quad (37)$$

Um estudo específico do CD para as partículas de bagaço de cana onde também mostra a dependência do coeficiente de arrasto pelo número de Reynolds foi feito por Nebra e Macedo (1988) que estudaram experimentalmente a hidrodinâmica das fibras de bagaço de cana), conforme equação (38).

$$CD = K_a Re^{K_b} \quad (38)$$

onde K_a e K_b são constantes a serem determinadas.

Para o cálculo do CD das fibras do bagaço de cana extraídas por moendas, Sosa-Arnan (2007) sugere a equação (39):

$$CD = 1,3Re^{-0,1} \quad (39)$$

Outro fator que influencia a fluidodinâmica da partícula do bagaço de cana é a densidade ou massa específica, como é nomeada por alguns autores, e nesse texto é denominada como densidade aparente. Essa medida é um fator complicador, pois o bagaço é um material higroscópico, poroso, com grande variedade de tamanhos, com superfícies irregulares e a maioria das partículas possui comprimento muito maior que a largura e a altura.

Existem muitas definições de densidade disponíveis na literatura especializada, conforme já discutido anteriormente no item 2.1.3.8. Dependendo da aplicação, uma definição pode ser mais adequada que a outra.

Para partícula não porosa a definição de densidade de uma partícula é simples e muito clara, isto é, a massa da partícula (M_p) é dividida pelo volume que essa partícula ocupa (V_p).

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} = \frac{\text{Massa da partícula}}{\text{Volume da partícula com a porosidade}} \quad (40)$$

Nas partículas com pequenos poros seu volume deve ser substituído pelo volume envolado, considerando-se a partícula como não porosa, como mostra a Figura 21.

Este procedimento é fluidodinamicamente adequado, pois os poros influenciam no volume da partícula e é esse volume que afeta a densidade e consequentemente o coeficiente de arrasto C_D , e o comportamento da partícula em um escoamento.

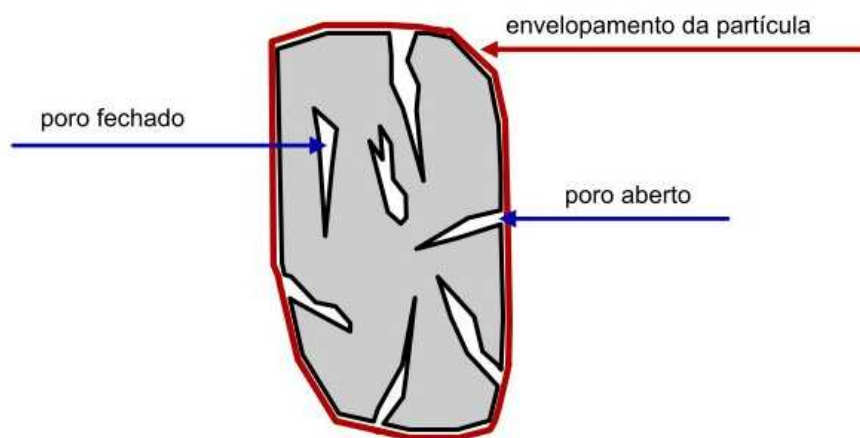


Figura 21. Estrutura da partícula com envelopamento.

Sendo assim, é interessante considerar as partículas com seus poros e com o seu volume envelopado, para a determinação de sua densidade aparente.

Colocando-se essas partículas em um escoamento com velocidade conhecida w_s , as partículas com velocidade terminal menor que w_s , serão elutriadas e partículas com velocidade terminal maior serão sedimentadas.

Parâmetros como volume envelopado da partícula, área projetada e densidade, serão determinantes para o equilíbrio das forças que atuam sobre cada partícula que será elutriada ou sedimentada.

2.3. Combustão de sólidos

Diferentemente da combustão dos gases e dos líquidos, a combustão dos sólidos depende de um número maior de parâmetros operacionais.

A combustão de sólidos é inerentemente mais complexa que a combustão de líquidos e gases (Tillman, 1991).

Na combustão de gases, os parâmetros mais importantes são a temperatura e a mistura entre os gases ou vapores reagentes. Na de líquidos, o diâmetro de gotas também passa a ser um parâmetro relevante. Na combustão de sólidos além dos citados anteriormente outros parâmetros assumem importância, como umidade, teor de voláteis, geometria (forma), porosidade da partícula, velocidade relativa gás-sólido etc. (Ushima, 2007).

2.3.1. Mecanismos de combustão de sólidos

Todo combustível sólido quando disposto em um ambiente oxidante a alta temperatura, passa por etapas de aquecimento com regiões de secagem, pirólise, combustão simultânea dos gases volatilizados e do carbono fixo residual (Figura 22), sendo que cada etapa varia conforme as características de cada combustível.

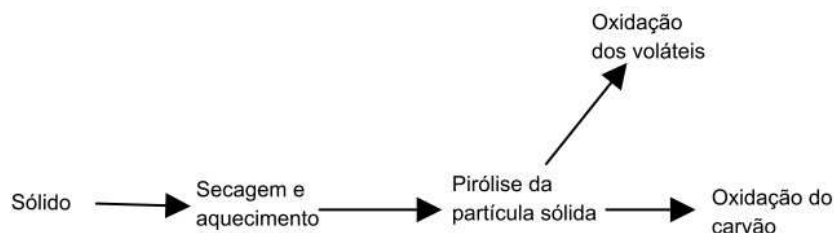


Figura 22. Esquema simplificado dos estágios da combustão dos sólidos.

O combustível sólido disposto em qualquer fornalha contém alguma umidade em sua estrutura, estando esse combustível disposto em condição ambiente.

Durante o processo de aquecimento de uma partícula de um combustível sólido a umidade contida nos poros do combustível sólido é aquecida e evaporada, e o vapor escapa da partícula do combustível pelos poros, conforme ilustrado no esquema da Figura 23.

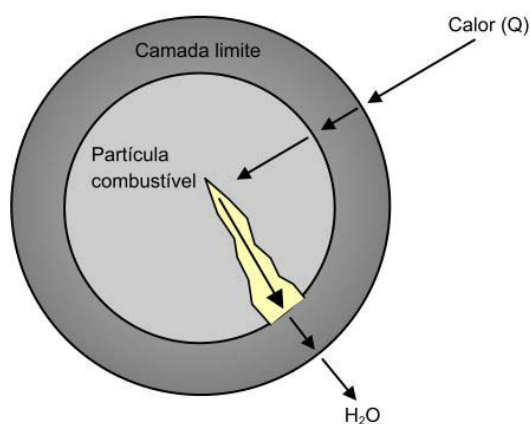


Figura 23. Esquema do processo de aquecimento e secagem (Tillman, 1991).

Para uma partícula de biomassa com teores de umidade e de voláteis elevados, todas as etapas apresentadas são importantes. Já para uma partícula de coque, com baixo teor de umidade e voláteis, somente as etapas de aquecimento e combustão são relevantes. Os teores de umidade, voláteis, carbono fixo e cinza de um combustível sólido são determinados a partir da análise imediata ou termogravimetria.

O aquecimento e a secagem e a pirólise são processos endotérmicos, governados pela transferência de calor e pela quantidade de energia necessária em função do combustível sólido utilizado e da umidade contida no mesmo.

A secagem da partícula é uma limitação do processo de transferência de calor e as taxas de secagem da partícula dependem de inúmeras variáveis, incluindo a temperatura média da fornalha, que depende do tipo de fornalha, se é de leito fixo, leito fluidizado, queima em grelha, queima em suspensão ou outro tipo de fornalha. A secagem depende também do tamanho e forma da partícula do combustível sólido, com especial atenção às de menor dimensão. Depende, fundamentalmente, da umidade das partículas, sendo que quanto maior a

umidade, maior a quantidade de energia necessária para a evaporação da umidade contida na partícula.

A porosidade da partícula é outro fator de dependência, pois refere-se à capacidade de transportar o vapor da partícula para o ambiente da fornalha.

A secagem da partícula em grande medida é análoga à pirólise.

Uma reação distinta ocorre na partícula de combustível no processo de secagem quando a frente de temperatura excede os 105°C (Tillman, 1991), em que a umidade é convertida em vapor e move-se através dos poros para a camada limite da partícula e para o ambiente da fornalha.

O processo que ocorre no interior da partícula é o mecanismo de transferência de calor por condutividade, ou seja, o calor é transferido para a partícula tanto por radiação como por convecção do ambiente da fornalha, e conseqüentemente é transferido por condução para a umidade presente no interior da partícula, que evapora. Esse vapor relativamente frio entre 120° a 175°C vai para a superfície da partícula e para o ambiente da fornalha realizando a secagem da partícula.

Para que o processo de secagem se complete é necessário que a temperatura no centro da partícula atinja pelo menos 120°C (Tillman, 1991).

Segundo Alves e Figueiredo (1988), quando a temperatura dos gases em contato com o sólido está acima de 400°C, a velocidade de secagem depende principalmente da transferência de calor. A difusão de vapor d'água pela partícula, importante em processos de secagem a baixa temperatura, passa a ter um papel secundário.

2.3.2. O processo de pirólise para uma partícula sólida

Pirólise é o aquecimento de uma única partícula, gota ou molécula de gás, sem a presença de oxigênio. E para o sólido pode ser representada pela equação:



Existem três principais produtos da pirólise que são os voláteis, o alcatrão e o carbono fixo ou carvão. Os voláteis são os produtos que não são condensáveis em condições ambientais normais, no entanto são gases compostos e combustíveis. O alcatrão é uma mistura de hidrocarbonetos pesados e oxigenados, substância com uma distribuição atômica $H/C > 1,0$. O alcatrão, para toda a finalidade prática, pode ser tratado como um produto da pirólise. O carbono fixo é geralmente rico em carbono sólido com uma menor fração de hidrogênio, oxigênio e heteroatômicos presentes no combustível ou resíduo.

Embora possam existir regiões exotérmicas associadas às reações de pirólise, esse processo é majoritariamente endotérmico, ou seja, é necessário fornecer energia para que a reação ocorra, o que contribui ainda mais para o atraso no aquecimento da partícula. Desta forma, toda a região seca, ao atingir temperaturas acima de 200°C , fica submetida à pirólise, ocorrendo formação de uma frente de pirólise, equivalente à de secagem.

Para biomassas, a temperatura de início de pirólise, à pressão de 1 bar, é de cerca de 200°C . Os gases e vapores liberados durante a pirólise também caminham em sentido contrário ao fluxo de calor, de forma semelhante ao vapor d'água de secagem, também contribuindo para o retardamento do aquecimento da partícula (Ushima, 2007).

A equação (41) apresenta um resumo dos processos químicos fundamentais envolvidos na pirólise.

Na pirólise a localização específica de onde estão ocorrendo as reações de termo degradação é chamada de região de pirólise (Figura 24) (Tillman, 1991). A temperatura de reação e a temperatura da região de pirólise não são a mesma temperatura distribuída pela partícula e a frente de pirólise move-se em função do gradiente de temperatura na partícula.

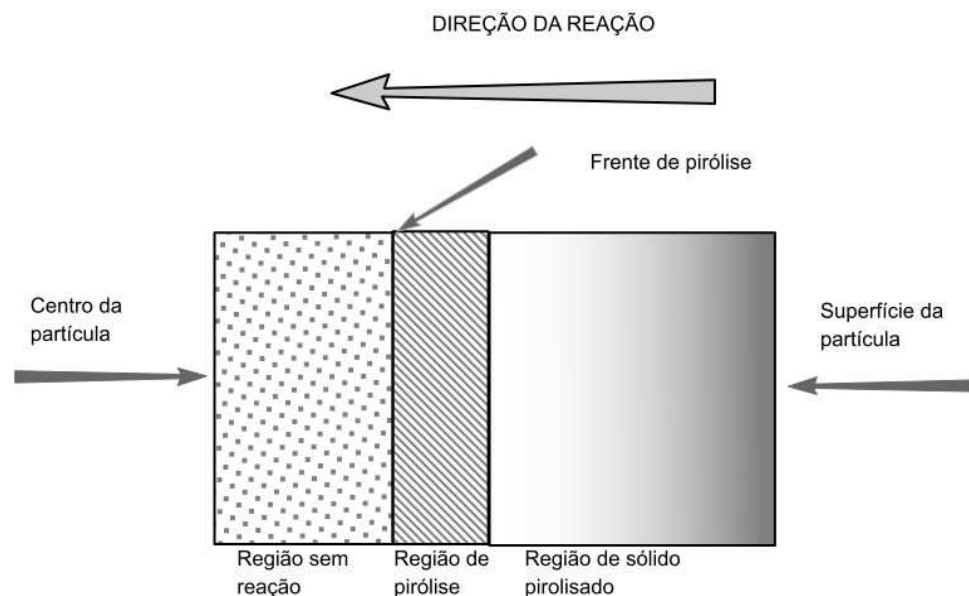


Figura 24. Esquema de um processo de pirólise em uma partícula sólida

2.3.3. Oxidação do carvão

O processo de queima ou oxidação do carvão é facilmente encontrado em operações industriais ou plantas de geração de energia.

A maior preocupação no ambiente da fornalha é a difusão do oxigênio sobre a superfície da partícula. Essa difusão acelera o mecanismo de combustão, que a partir do fim da etapa de pirólise, quando os fluxos de gases e vapores de dentro para fora da partícula se reduzem drasticamente, permitem que o oxigênio e outros gases reagentes presentes no lado externo penetrem no interior do resíduo carbonoso e reajam com os componentes sólidos. O mecanismo predominante, nesta etapa, diferentemente das etapas de secagem e pirólise, é o de difusão dos gases reagentes para dentro do resíduo carbonoso.

A reação do carbono com oxigênio, encontrada normalmente em equipamentos de combustão, é muito rápida, ocorrendo praticamente na superfície da partícula de carvão. O oxigênio quase não penetra no seu interior, sendo totalmente consumido na superfície e levando a uma diminuição da espessura da camada de carvão ao longo da combustão (Ushima, 2007).

Tanto na secagem quanto na pirólise, na combustão do carvão ou na fluidodinâmica da partícula, a forma e as dimensões da partícula são fatores importantes no entendimento de cada um desses fenômenos, o que reforça a necessidade do conhecimento das características da partícula de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de energia.

3. Processo Experimental

3.1. Descrição do equipamento

A bancada experimental (Figura 25) é composta de um tubo elutriador sedimentador de plástico (PVC) com diâmetro interno de 100 mm (1) com uma tomada de pressão (4) e um alimentador manual de particulado (bagaço de cana) (5) construído em plástico (PVC) com uma rosca alimentadora de 20 mm de passo e um diâmetro de 50 mm. O elutriador sedimentador é composto ainda por uma câmara de sedimentação com filtro (7), onde as partículas que são arrastadas no tubo são capturadas.

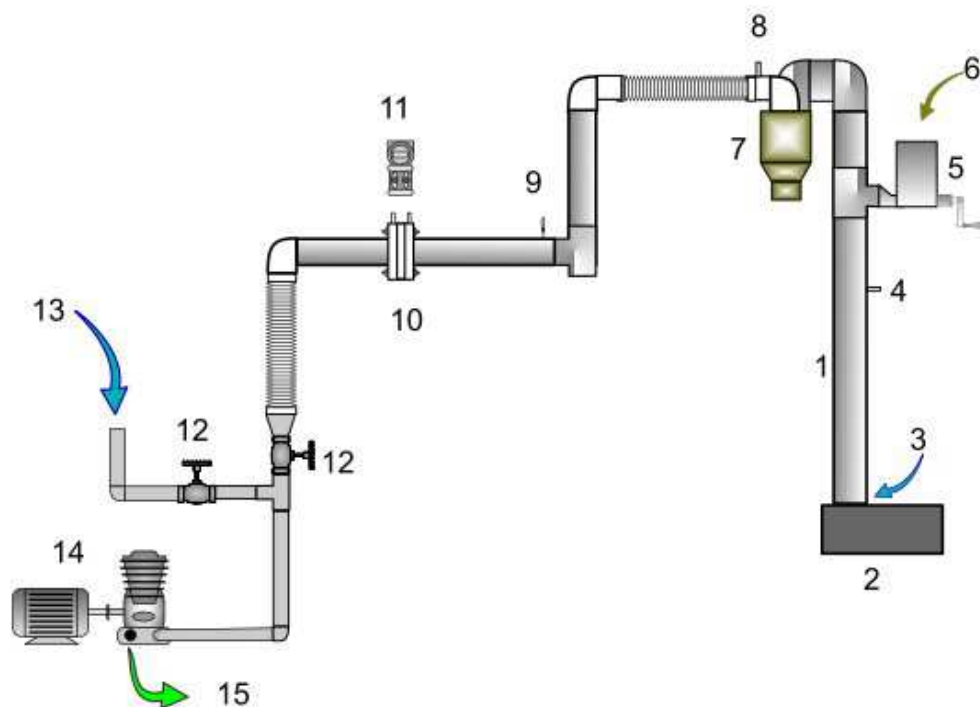
As medidas de vazão são feitas através de uma placa de orifício com tomada de canto (10) construída em aço inox 316, segundo a norma ISO 5167, instalada em um tubo de plástico (PVC) de diâmetro de 75 mm, acoplada a um transdutor de pressão diferencial marca Smar modelo LD 301 (11).

A sucção de ar é feita com um compressor radial da marca Ibram CR-8 acionado por motor trifásico de 5 cv (14).

A tomada de pressão (8) é colocada imediatamente após o filtro de ar existente no precipitador de partículas, para a monitoração das perdas de carga e conectado a um medidor de pressão estática em “U” com colunas de água e uma escala de 2000 mm.

A tomada de ar, localizada a montante da placa de orifício (10), é conectada a um medidor de pressão estática em “U” com colunas de água e uma escala de 2000 mm.

As válvulas de gaveta (12) são utilizadas para o controle do fluxo de ar (3 e 13), são construídas em bronze com diâmetros nominal de 50 mm, e instaladas em uma tubulação em aço galvanizado com diâmetro nominal de 50 mm.



- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1-tubo sedimentador elutriador | 9-termopar |
| 2-caixa para partículas | 10-placa de orifício |
| 3-entrada de ar de trabalho | 11-transdutor de pressão diferencial |
| 4-tomada de pressão | 12-válvulas de controle de fluxo |
| 5-alimentador de bagaço | 13-entrada de ar secundária |
| 6-entrada do bagaço | 14-compressor |
| 7-precipitador de partículas | 15-saída de ar |
| 8-tomada de pressão | |

Figura 25. Esquema da bancada experimental

3.1.1. Histórico sobre a bancada experimental

Na concepção inicial desta bancada experimental idealizou-se, a disposição de um leito de bagaço sobre uma grade, na qual passaria um escoamento de ar, que elutriaria as partículas em função das velocidades do escoamento. Esta ideia inicial não teve sucesso, pois devido às

características do bagaço de cana, este aglomerava-se de forma coesa, impedindo que as partículas menores fossem arrastadas pelo escoamento.

Observando-se o comportamento do leito do bagaço de cana no escoamento, notou-se que quando havia desprendimento de parte do bagaço, essas partes poderiam ser elutriadas.

Concebeu-se assim a disposição contínua de pequenas quantidades do bagaço de cana no escoamento já desenvolvido, dosando-o através de uma esteira.

Essa nova concepção melhorou muito a elutriação das partículas, mas quando caía grande quantidade de bagaço simultaneamente, em virtude do uso da esteira, o comportamento de coesão do bagaço permanecia e todas estas partículas unidas sedimentavam.

Experimentou-se assim o uso de uma rosca alimentadora com passo de 20 mm, para a dosagem pequena e constante, e obteve-se o resultado esperado.

Da concepção do primeiro projeto até ao que deu o resultado esperado, foram investidos 11 meses de trabalho de experimentações e adaptações.

3.2. Fluxograma do processo

A Figura 26 ilustra o fluxograma do processo de separação. O material particulado é disposto no alimentador estanque (5), é dosado no tubo elutriador (1), no qual as partículas com velocidade terminal menor que a velocidade imposta pelo fluxo de ar são arrastadas para o precipitador de partículas (7); esse material é considerado separado e o material com velocidade terminal maior que a imposta no tubo elutriador precipita para a caixa de partículas (2). Com o material desta caixa repete-se o processo para se obter nova separação com velocidade maior no tubo do sedimentador elutriador (1).

O ar passa pelo filtro instalado no precipitador de partículas (7) para ser completamente limpo e, logo em seguida, passa pelo sistema de medição de vazão (10 e 11) e vai ao compressor para ser disposto no ambiente.

A entrada de ar secundária tem a função de controlar a vazão e a velocidade no tubo sedimentador elutriador, mantendo este fluxo constante durante o processo de separação.

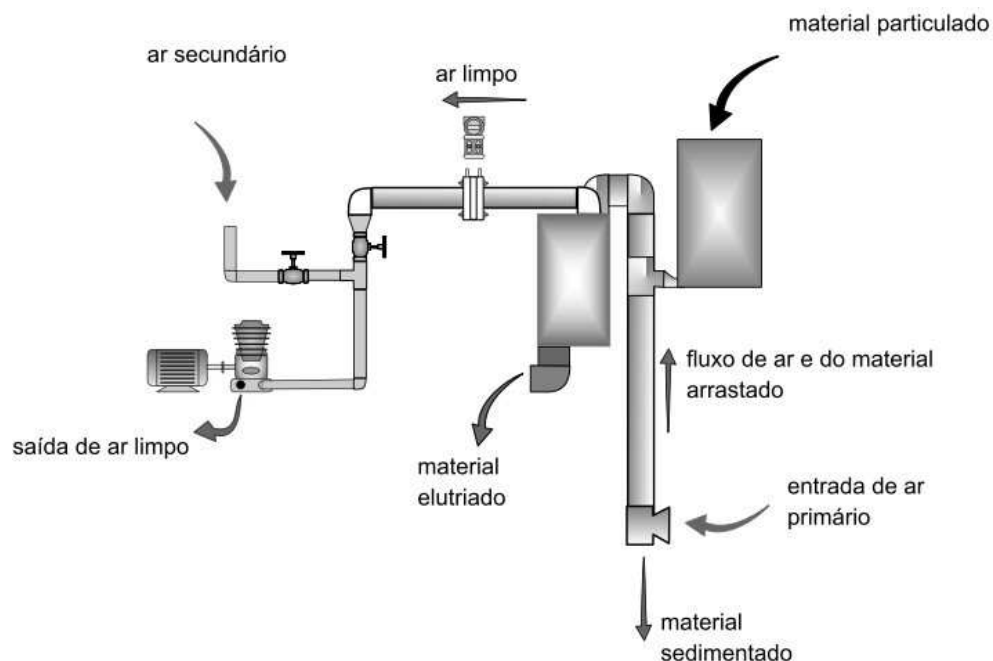


Figura 26. Fluxograma do processo experimental

3.2.1. Descrição da instrumentação

A instrumentação utilizada no equipamento é especificada na Tabela 14.

Tabela 14. Especificação da instrumentação

Item	Tipo	Escala	Precisão	Fabricante
4	Manômetro de coluna de água	1000 a -1000 mm	1 mm	Laboratórios Unicamp
8	Manômetro de coluna de água	1000 a -1000 mm	1 mm	Laboratórios Unicamp
10	Placa de orifício $d/D = 0,346$	de 14 a 200 Kg/h de ar	0,8 %	Laboratórios Unicamp
11	Transdutor de pressão diferencial	-5000 a 5000 mmca	0,04 %	Smar, modelo LD 301
	Higrômetro	0 a 100 %	1%	Sundo
	Barômetro	900 a 1070	1 mbar	Präzisions

3.3. Descrição do procedimento experimental

3.3.1. Aquisição e adequação das amostras

Com o equipamento construído, conforme descrito, foram feitos os testes de aprovação utilizando bagaço de cana com umidade estável, a aproximadamente 7%, para se observar o comportamento do equipamento com relação à variação da dosagem, às velocidades do ar no tubo elutriador sedimentador e à variação na granulometria das partículas.

Notou-se que as dosagens das partículas deveriam ser feitas de forma constante e em pequeno número, evitando que uma grande quantidade fosse disposta simultaneamente no tubo do elutriador sedimentador minimizando efeito de interação das partículas, quando no escoamento.

As velocidades escolhidas para a separação após vários testes preliminares, foram as que mostraram diferenças visualmente significativas na granulometria do material separado conforme Tabela 15.

Tabela 15. *Velocidades escolhidas para a separação das partículas*

Velocidades em m/s	0,504	0,710	1,062	1,578	1,936	2,277	> 2,277
-----------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---------

A coleta de bagaço de cana foi realizada no dia de 21/12/2009 na Usina Ester, uma usina de açúcar e álcool da região de Campinas, após a ocorrência de vários dias de chuva. Nessa coleta foram retirados aleatoriamente 1900 ± 100 g de bagaço de cana na saída das moendas da usina (Figura 27).



Figura 27. Foto da coleta do bagaço na Usina Ester

Imediatamente após a coleta do bagaço foi feito o quarteamento do material dividindo essa amostra em duas partes, sendo uma com $900 \pm 100\text{g}$ e outra com $1000 \pm 100\text{g}$ (Figuras 28 e 29).

A amostra com $1000 \pm 100\text{g}$ foi quarteada novamente em duas outras amostras, uma com $540 \pm 20\text{g}$ e outra com $498 \pm 20\text{g}$. A amostra de $540 \pm 20\text{g}$ foi subdividida mais uma vez em outras duas amostras, uma com $265 \pm 20\text{g}$ e outra com $296 \pm 20\text{g}$. Essas duas amostras foram divididas mais uma vez em duas partes, e essas duas partes que juntas pesavam $296 \pm 20\text{g}$ foram para o processo de secagem, enquanto as outras duas partes foram mantidas úmidas para a tentativa de separação nessa condição.

O processo de secagem foi feito no dia seguinte ao da coleta, a uma temperatura de 70°C durante 24 horas e posteriormente estabilizada à umidade ambiente. Com isso houve uma perda de massa em torno de 60%, correspondente à umidade evaporada, resultando em uma amostra com peso final 62g e a outra com 46g (Tabela 16).

As amostras que foram mantidas úmidas estavam divididas em duas, uma com $129 \pm 5\text{g}$ (amostra úmida 1) e outra com $136 \pm 5\text{g}$ (amostra úmida 2).



Figura 28. Equipamento usado para o quarteamento



Figura 29. Resultado do primeiro quarteamento

Tabela 16. Divisão das amostras de bagaço

Massa total da amostra	$1900 \pm 100\text{g}$				
Primeiro quarteamento	$1000 \pm 100\text{g}$				$900 \pm 100\text{g}$
Segundo quarteamento	$540 \pm 20\text{g}$			$498 \pm 20\text{g}$	
Terceiro quarteamento	$265 \pm 20\text{g}$		$296 \pm 20\text{g}$		
Quarto quarteamento	$129 \pm 5\text{g}$	$136 \pm 5\text{g}$	$46 \pm 5\text{g}$	$62 \pm 5\text{g}$	Amostras estudadas
	Amostra úmida 1	Amostra úmida 2	Amostra seca 1	Amostra seca 2	



Figura 30. Bagaço de cana, amostra úmida 2, 136 ± 5 g



Figura 31. Bagaço de cana, amostra úmida 2, 136 ± 5 g



Figura 32. Bagaço de cana, amostra seca 2, 62 ± 5 g

Logo após o quarteamento, a amostra úmida 1 foi levada para a separação por elutriação e sedimentação no equipamento desenvolvido para este trabalho.

Como todo o trabalho de teste havia sido feito com bagaço na umidade de equilíbrio com o ambiente em torno de 7%, esperava-se um comportamento diferente do equipamento com relação ao bagaço úmido, o que se confirmou.

Houve uma maior dificuldade para a alimentação, o bagaço se aglomerava na rosca alimentadora, necessitando um esforço maior pra mantê-la em movimento para a dosagem. Esse esforço comprometeu a rosca alimentadora e o experimento teve que ser adiado.

Até que o experimento pudesse ser completado adequadamente, o bagaço permaneceu embalado e em geladeira para conservar as suas características.

Após a manutenção da rosca alimentadora do elutriador sedimentador, reiniciou-se o experimento de separação das partículas com o bagaço úmido. Foi possível notar que a umidade desse bagaço diminuía rapidamente à medida que as partes sedimentadas eram repassadas pelo elutriador sedimentador.

Para o bagaço com umidade de equilíbrio com o ambiente, a alimentação manteve-se mais constante sem exigir aumento no esforço mecânico do equipamento. Notou-se também que à medida que se retirava da amostra as partículas menores do que as que tinham sido sedimentadas, as partículas maiores fluíam com maior facilidade na rosca transportadora, mostrando que quanto mais homogênea a granulometria, melhor e mais fácil o transporte pela rosca alimentadora.

A separação do bagaço ocorreu conforme o previsto e não houve perdas significativas de massa para o sistema, apesar do equipamento ser aberto.

Tanto na amostra úmida quanto nas amostras com umidade estável, houve a separação com as velocidades pré-estabelecidas segundo os critérios observados em testes preliminares.

3.3.2. Medição das dimensões das partículas

Para a continuidade do estudo foi necessário mensurar a maior área projetada, a densidade aparente e o volume das partículas.

Esse processo de mensuração se mostrou de grande dificuldade, uma vez que não são muitas as alternativas simples para se alcançar este objetivo, principalmente com as partículas que foram elutriadas com velocidades menores (0.5042 e 0.7105 m/s).

Optou-se pela mensuração através da imagem fotográfica, ou seja, fotografar, contar e medir as partículas.

Depois de muita pesquisa e testes com vários softwares, optou-se pelo UTHSCSA Image Tool (IT), software projetado para uso em medicina e biologia, que analisa as variações

de tons de cinza de uma imagem, e que se apresentou como o mais adequado para as mensurações desejadas neste trabalho.

Este software é disponibilizado gratuitamente na rede mundial de computadores no endereço <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>. Por ter sido desenvolvido em 1998, sua utilização não é possível com sistema operacional Windows Vista e Windows 7, limitando-se no máximo, ao Windows XP.

Para um desempenho adequado do software IT, a imagem obtida teve que passar por alguns cuidados na sua aquisição e tratamentos específicos.

A aquisição da imagem através de uma fotografia direta das partículas se mostrou improdutiva, pois o uso do flash formava regiões de alta incidência de luz, e o tratamento desta fotografia mostrou-se muito difícil e modificava as dimensões das partículas. Já sem flash, com luz indireta, outro problema surgira, o da formação de sombra pela incidência de luz indireta e lateral, também modificando as dimensões das partículas. Posteriormente, tentou-se a aquisição de uma fotografia com as partículas retroprojetadas em uma parede clara, limpa e lisa, que se mostrou ser tão ruim quanto a fotografia direta. Além de formar pontos com diferentes intensidades de luz, apresentou distorções pela formação de sombra e diferença nas dimensões entre as partículas, uma vez que a iluminação do retroprojetor é puntiforme. Notaram-se também distorções entre o centro e a borda da projeção com mudança na verdadeira grandeza da partícula. Outro problema relaciona-se ao fato da lente do retroprojetor ter apresentado retículas que formavam zonas sequenciais e circuncêntricas alternadamente mais claras e mais escuras, exigindo um trabalho muito grande de tratamento de imagem, sem o que distorceria a realidade da fotografia.

Uma boa aquisição de imagem se deu através da digitalização das partículas em um escâner comum, de uma impressora multifuncional (HP PSC 1315). A imagem ficou nítida e para as partículas pequenas inicialmente pareceu ser adequada; com partículas maiores notou-se que a imagem apresentava filetes de sombra que o software identificava como extensão da partícula e ainda pontos claros na imagem da partícula que o software identificava como a não existência da partícula. Em função da impossibilidade da retirada da sombra, posto que esta é consequência da incidência de luz, optou-se por digitalizar as partículas em um fundo totalmente preto, assim as sombras seriam projetadas em um fundo da mesma cor, como é mostrado na Figura 33.

Para garantir a qualidade da imagem o fundo precisava ser opaco e não refletivo; utilizou-se papel cartão preto fosco para esse fim, com resultados muito bons e que seguramente não distorcem a verdadeira grandeza das partículas.

Após obtida a fotografia em formato digital, com o melhor resultado possível, através do escâner, a imagem foi trabalhada em um software de tratamento de imagem (Corel Photo Paint X4). Inicialmente a imagem foi negativada, ou seja, o programa transformou em branco a cor que aparece em preto e os pontos de tons claros em tons escuros. No entanto, somente esse tratamento não foi suficiente para o uso no software IT, sendo necessária a transformação dessa imagem negativada em cores chapadas mais marcantes e claramente delimitadas. Para isso, utilizou-se o recurso de conversão de imagens em preto e branco (do software Corel Photo Paint X4), obtendo-se as projeções adequadas das partículas.

Como o software IT lê e interpreta a variação dos tons de cinza na borda do objeto fotografado, foi necessária outra transformação dessa imagem chapada (em preto e branco) para tons de cinza e a aplicação de um efeito de desfocagem gaussiana. Embora a aplicação do efeito de desfocagem gaussiana pudesse ser feita no próprio IT, que possui este recurso, o resultado ficou melhor utilizando-se o mesmo efeito do Corel Photo Paint X4. Esse recurso torna a borda da imagem aparentemente desfocada, o que dá um aspecto tridimensional para a partícula e atende às necessidades do software IT, mostrado na Figura 34.

Para se ter a certeza de que não haveria distorções entre a imagem obtida e a imagem final adequada para o IT foi realizado um teste com partículas conhecidas. Para este teste foram utilizadas partículas de papel da cor do bagaço de cana, com diâmetro de 3 mm, obtidas através de puncionamento. Estas partículas de papel foram submetidas ao processo citado anteriormente e se verificou um erro próximo a 2%.



*Figura 33. Foto original, não tratada,
das partículas de calibração*



*Figura 34. Imagem das partículas de calibração
após tratamento no Corel Photo Paint X4*

A certeza das dimensões das partículas do bagaço de cana foram garantidas colocando-se, no momento da digitalização, um objeto de dimensão conhecida, juntamente com as partículas estudadas, para que servisse de referência para a calibração feita a partir do comando de medida de calibração espacial (*calibrate spatial mensurament*), do software IT. Após a calibração do software, a partícula referencial foi retirada digitalmente para que não interferisse na contagem final do número de partículas.

Um cuidado que foi tomado na aquisição da imagem através do escâner foi a disposição distanciada das partículas, para que a sobreposição delas não mascarasse suas dimensões.

3.3.3. O software UTHSCSA Image Tool (IT)

O software UTHSCSA Image Tool (IT) é um software livre para processamento e análise de imagens, desenvolvido para sistemas operacionais Microsoft Windows 9x, Windows ME ou Windows NT. Pode adquirir, exibir, editar, analisar, processar, comprimir, gravar e imprimir imagens em escala de cinza e cor. O IT pode ler e gravar mais de 22 formatos de arquivos comuns, incluindo BMP, PCX, TIF, GIF e JPEG. Suas funções de análise de imagem incluem análise dimensional (distância, ângulo, perímetro, área) e medições em escala de cinza (ponto, linha e histograma da área com estatísticas). O IT suporta funções de processamento de imagem padrão, tais como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de bordas, filtragem mediana e circunvolução espacial com máscaras de convolução definidas pelo usuário. O IT também tem embutido recursos que permitem ao usuário gravar e reproduzir tarefas repetitivas a partir de scripts salvos, para automatizar a análise de imagem.

Os recursos utilizados nesse trabalho foram:

Área: A área do objeto. Esta medida tende a produzir estimativa de área do objeto. As medições foram calibradas para a imagem em milímetros.

- **Major Axis Length** (eixo de maior comprimento): O comprimento da linha mais longa que pode ser medida do objeto.
- **Minor Axis Length** (eixo de menor comprimento): O comprimento da linha mais curta que pode ser captada por meio do objeto perpendicular ao eixo principal.

A_p = área projetada da partícula.

3.3.4. Determinação do volume e da densidade aparente

Como foi descrito anteriormente a densidade aparente é definida pela razão da massa pelo volume ocupado por uma partícula e seus poros. Para a mensuração da densidade aparente das partículas de bagaço de cana, das amostras separadas por elutriação e

sedimentação, foi utilizado o picnómetro de líquido, utilizando o n-heptano como fluido de trabalho.

Essa medição tem sua limitação, pois presume-se o envelopamento da partícula, garantida pela tensão superficial do fluido de trabalho, neste caso o n-heptano.

A diferença da massa e do volume entre o picnómetro que contém somente com n-heptano e o picnómetro com bagaço de cana e n-heptano nos dá o volume ocupado pelo bagaço e sua massa, assim determinamos a densidade aparente total da amostra.

A determinação do volume de cada partícula, ou a média delas, foi possível porque a amostra medida foi a mesma que anteriormente havia sido fotografada e trabalhada no software IT que permitiu a contagem do número de partículas de cada amostra estudada.

3.3.5. Análise termogravimétrica

O método termogravimétrico de determinação de parâmetros cinéticos consiste em aquecer uma amostra de matéria em um forno com temperatura (ou taxa de aquecimento) controlada, medindo-se a perda de massa desta amostra com uma balança de precisão, acoplada ao forno. A balança termogravimétrica utilizada neste procedimento foi a Netzsch STA 409 (Figura 35).

Neste processo se obtém a análise imediata do material estudado e parâmetros da cinética e volatilização de seus compostos.

Após a separação do bagaço de cana através do equipamento de elutriação e sedimentação, em sete partes com granulometrias diferentes, foram feitas as análises termogravimétricas destas partes pertencentes à amostra 2. As análises foram feitas com velocidade de aquecimento de 10°C por minuto até atingir a temperatura de 1000°C, utilizando como gás de arraste em atmosfera inerte nitrogênio N_2 e, em atmosfera oxidante, o ar sintético, tendo em sua composição somente N_2 e o O_2 .



Figura 35. Balança termogravimétrica Netzsch STA 409



Figura 36. Cadinhos usados nas análises termogravimétricas

As análises termogravimétricas foram feitas em amostras das frações obtidas do bagaço de cana, com aproximadamente 7 mg de cada fração.

3.3.6. Análise elementar das cinzas

Para a análise elementar das cinzas foram calcinadas sete frações da amostra 2 do bagaço de cana, em uma mufla a 600 °C por um período de 12 horas e garantindo a ausência de voláteis.

A análise elementar quantitativa das amostras de cinzas de bagaço de cana, foi feita através do equipamento "Eletron Probe Microanalyzer" Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise (MEV), modelo JEOL JXA-840 A (Figura 37), que consiste no bombardeamento de elétrons sobre a amostra e captura da reflexão por detectores específicos.



Figura 37. *Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise (MEV), modelo JEOL JXA-840 A*

No caso da análise elementar, o equipamento utiliza a espectroscopia por energia dispersiva (EDS - energy-dispersive spectroscopy), onde os raios-X emitidos pela amostra são distribuídos no espectro por ordem de sua energia e mais comumente do baixo número atômico, conforme pode ser visto no espectro da Figura 38.

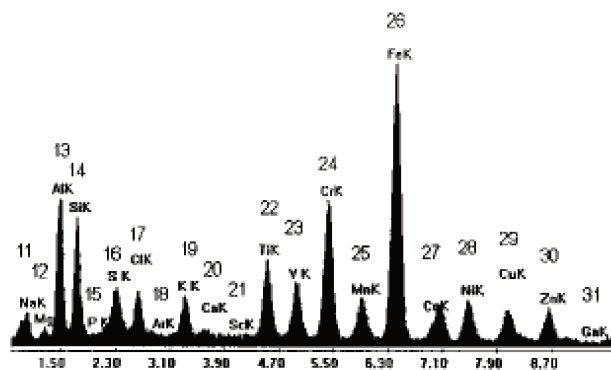


Figura 38. *Espectro por energia dispersiva mostrando a ordem dos números atômicos de uma amostra.*

Normalmente são usados os picos de energia entre 0 e 10 KeV (eletrovolt). A partir das informações contidas no espectro de raios-X é possível obter informações qualitativas e

quantitativas acerca da composição da amostra em escala microscópica com erro próximo a 1% em peso.

3.3.7. Análise de imagem utilizando o MEV

A captura da imagem das frações do bagaço de cana também foi realizada através do equipamento "Eletron Probe Microanalyzer" Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), modelo JEOL JXA-840 A.

A imagem observada no MEV é o resultado da variação de contraste que ocorre quando um feixe de elétrons primários varre a superfície da amostra em análise ponto a ponto. De maneira geral, as variações de contraste ponto a ponto ocorrem devido a variação do número de elétrons que são emitidos da amostra e que atingem o detector, permitindo identificar a topografia da amostra.

No caso da amostra de bagaço de cana, foi necessário revestir sua superfície com uma camada de 100 a 150 nanômetros de ouro (Au), para que a partícula amostral se tornasse condutora e reflexiva (Figura 39).



Figura 39. Partícula típica da amostra 2 elutriada com velocidade de 2,227 m/s revestida de ouro para análise de imagem no MEV

3.3.8. Determinação das quantidades de voláteis CHN e S

3.3.8.1. Análise Elementar CHN

O analisador elementar utilizado foi o Perkin-Elmer modelo 2400CHN.

Foi pesado em torno de 1mg da amostra numa balança analítica de 6 casas decimais e introduzida no equipamento onde, ocorreu combustão a 925 graus em presença de oxigênio puro. Todo carbono passou para a forma de CO_2 , o hidrogênio para a forma de H_2O e o nitrogênio formou vários óxidos (N_xO_x) que, ao passar por uma coluna contendo cobre metálico, foi reduzido para N_2 .

Os gases resultantes (CO_2 , H_2O e N_2) foram arrastados pelo gás hélio puro, homogeneizados e posteriormente separados através de colunas específicas (sílica) e detectados por um detector de condutividade térmica (TCD).

3.3.8.2. Análise de Enxofre

A técnica utilizada para analisar o enxofre foi Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma - ICP-AES - da Spectro modelo Arcos SOP.

A amostra foi pesada em torno de 15mg e queimada em frasco de Schoniger (hermeticamente fechado) onde o enxofre passou para forma de SO_4 . O frasco foi mantido fechado durante um período de 3 horas para que todo SO_4 formado fosse absorvido no líquido absorvente.

Uma curva de calibração com padrão certificado para enxofre (S) foi obtida pelo ICP-AES onde a solução foi analisada, proporcionando a obtenção do teor de S na amostra.

4. Apresentação e análise dos resultados

4.1. Separação granulométrica da partícula

Os resultados deste trabalho são apresentados com o objetivo de possibilitar uma melhor compreensão das características do bagaço de cana, utilizando a separação por elutriação e sedimentação como parâmetros de referências para a sua caracterização.

O fracionamento do bagaço de cana para as fornalhas de caldeiras como estão concebidas hoje queimando bagaço de cana com umidade em torno de 50% e com excesso de ar relativamente alto, não é justificado, mas para se obter maior eficiência térmica de caldeiras de bagaço a homogeneidade dimensional das partículas do combustível poderá ser de grande valia.

Outra aplicação desta separação ou fracionamento é no processamento do bagaço para a fabricação de álcool celulósico, separando as partículas menores, obtendo-se assim maior área superficial em relação ao seu volume, para transferência de calor e massa e para a atuação das enzimas aplicadas à esse fim.

Da mesma forma pode-se desenvolver queimadores adequados para algumas frações de partículas com rendimentos maiores em função da homogeneidade das partículas do bagaço, como é feito hoje para o carvão mineral, além de se avaliar a possibilidade e os custos necessários para um processamento adicional do bagaço com fins de cominuição e homogeneização do tamanho de partícula. Com a homogeneidade das frações das partículas do bagaço de cana pode-se usar métodos de secagem com custos menores e secar somente partes que é de interesse, aumentando significativamente o rendimento do bagaço como combustível.

O parâmetro inicial deste estudo foi a caracterização da partícula do bagaço de cana em função do coeficiente de arrasto médio das partículas que constituem o bagaço de cana.

Essa separação, como dito anteriormente, foi feita através do equipamento desenvolvido para este trabalho, o elutriador sedimentador.

Utilizando ar atmosférico ambiente como fluido de trabalho e provocando um escoamento no tubo elutriador sedimentador, com diferentes velocidades, foram colocadas nesse escoamento as partículas de bagaço de cana.

Com coeficientes de arrasto diferentes, as partículas foram separadas em função das sete velocidades impostas no escoamento, conforme Tabela 15. As partículas de granulometrias menores, que têm coeficiente de arrasto pequeno, foram segregadas por velocidades menores, enquanto as partículas com coeficiente de arrasto maiores foram sedimentadas.

A primeira amostra a ser separada foi a amostra com umidade idêntica ao bagaço que sai das moendas, ou seja, com aproximadamente 50%. Durante o processo de separação, as partículas foram perdendo a umidade paulatinamente.



Figura 40. Amostra 2, úmida, antes da separação



Figura 41. Amostra 2, úmida, após a separação

A amostra úmida foi separada em frações distribuídas conforme apresentado na Tabela 18 e na Figura 42. Após o processo de separação, obteve-se apenas 66 g das 136 g iniciais. A perda de massa do sistema é muito pequena, na ordem de 2%. Isso foi confirmado com a repesagem das amostras com umidade de equilíbrio após a separação por sedimentação e elutriação. Então, pode-se concluir que essa perda de 48% da massa inicial foi relativa à umidade contida na amostra.

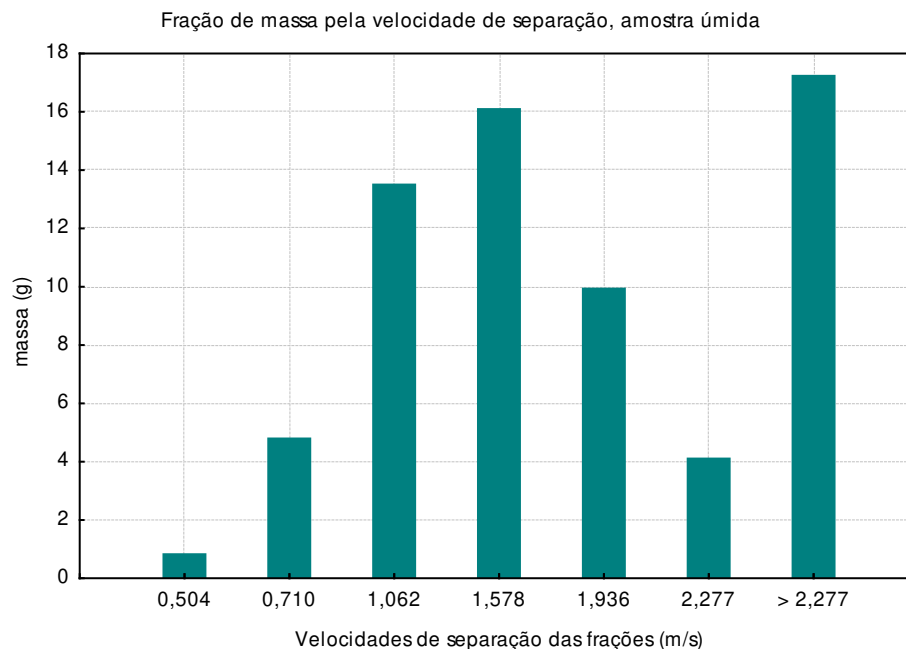


Figura 42. Distribuição da massa das partículas em função da velocidade de separação da amostra úmida 2

Com informação de que existe grande perda de umidade no processo de separação, verificou-se que não seria possível a repetibilidade do experimento com bagaço úmido, visto que seria necessário o controle de vários parâmetros, como pressão atmosférica ou pressão barométrica e umidade relativa do ar, o que tornaria muito difícil uma comparação adequada com outras amostras. Em função disto, optou-se por se trabalhar com o bagaço em umidade de equilíbrio, ou seja, bagaço com umidade estabilizada à umidade relativa do ar, que varia em função das condições atmosféricas, mas que fica em torno de 7 a 9 %.

Neste estudo mediu-se a umidade do bagaço *in natura* (saído da moenda) e a umidade de equilíbrio, conforme Tabela 17. Assim foi considerada a umidade de equilíbrio do bagaço de cana-de-açúcar como de 7,5 %.

Tabela 17. *Umidade do bagaço estudado neste trabalho*

Determinação de umidade		
Fração	Umidade média (%)	Desvio padrão médio (%)
In natura	46,14	0,47
Equilíbrio	7,53	0,35

A separação com o bagaço de cana-de-açúcar em equilíbrio foi mais fácil em relação ao bagaço úmido, exigindo menor esforço no equipamento e não havendo praticamente perda de massa para o sistema, que é aberto.



Figura 43. *Amostra 2, em equilíbrio, antes da separação*



Figura 44. *Amostra 2, em equilíbrio, após a separação*

A distribuição granulométrica das partículas do bagaço em equilíbrio se deu em função da velocidade no tubo elutriador sedimentador, conforme Tabela 18, e Figuras 45 e 46.

A Tabela 18 mostra as massas e os percentuais das massas que foram separadas pelas diferentes velocidades no elutriador sedimentador.

Tabela 18. *Massas e percentuais das frações separadas pelo elutriador sedimentador*

Velocidades de separação m/s	Massa das frações da amostra 1, umidade em equilíbrio (g)	% de massa da amostra 1, umidade em equilíbrio	Massa das frações da amostra 2, umidade em equilíbrio (g)	% de massa da amostra 2, umidade em equilíbrio	Massa das frações da amostra úmida 1 (g)	% de massa da amostra úmida 1
0,504	5,86	14,27	9,24	15,36	0,81	1,22
0,710	4,16	10,13	5,79	9,63	4,78	7,20
1,062	7,07	17,22	10,91	18,14	13,49	20,32
1,578	8,63	21,02	13,01	21,63	16,08	24,22
1,936	4,8	11,69	6,09	10,12	9,92	14,94
2,277	2,73	6,65	3,37	5,60	4,09	6,16
> 2,277	7,81	19,02	11,74	19,52	17,22	25,94
total	41,06	100	60,15	100	66,39	100

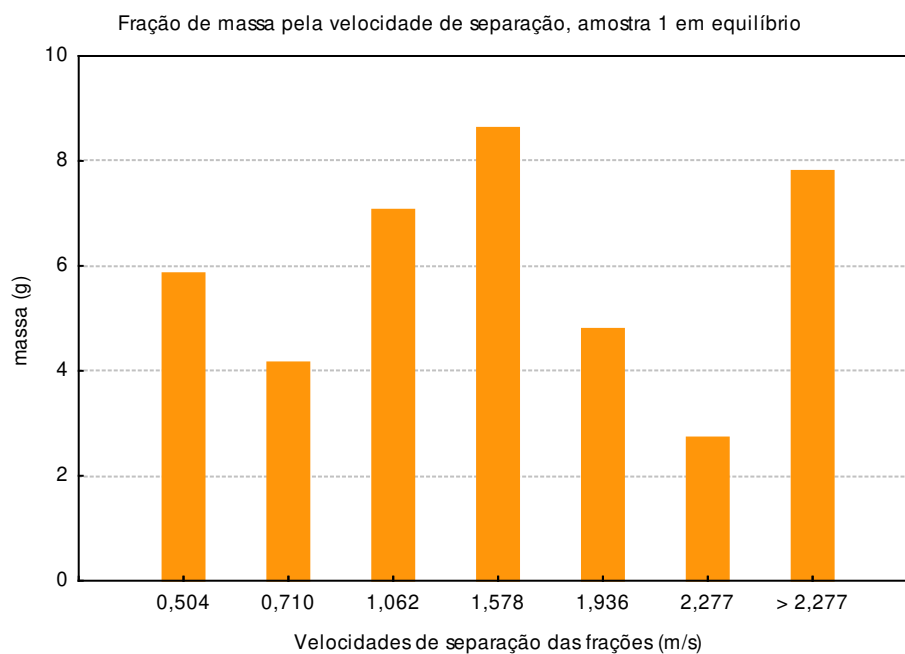


Figura 45. *Distribuição da massa das partículas da amostra 1 com umidade em equilíbrio, em função da velocidade de separação*

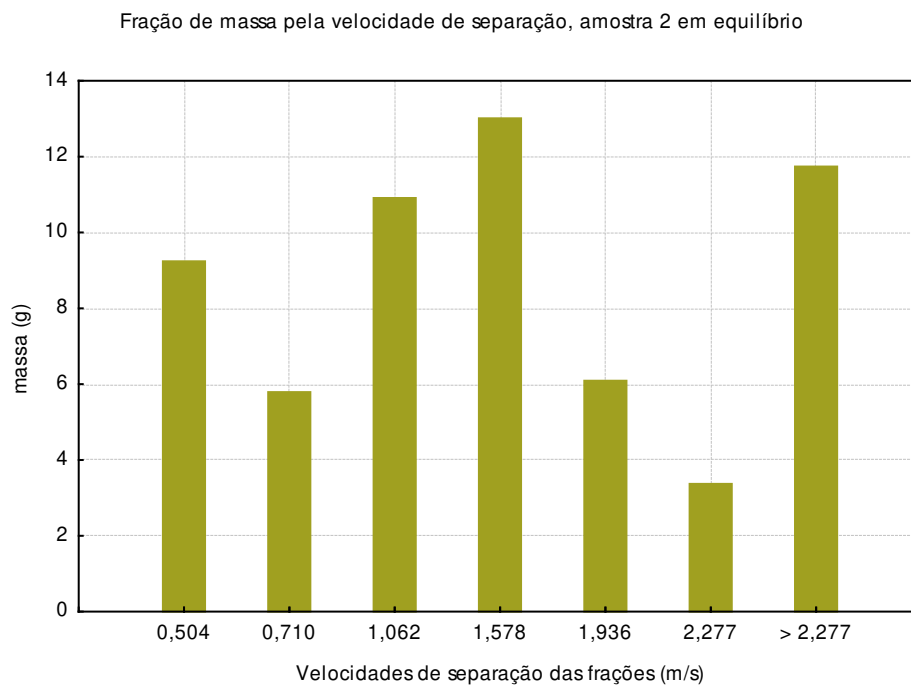


Figura 46. Distribuição da massa das partículas da amostra 2 com umidade em equilíbrio, em função da velocidade de separação

Para uma melhor comparação entre a quantidade separada de cada fração das amostras, com relação à velocidade do fluido de trabalho do elutriador sedimentador, foi construído um gráfico (Figura 47), que mostra as quantidades relativas das massas separadas. A amostra úmida tem 66,39 g, a amostra 1, em equilíbrio, 41,6 g, e a amostra 2, em equilíbrio, 60,15 g.

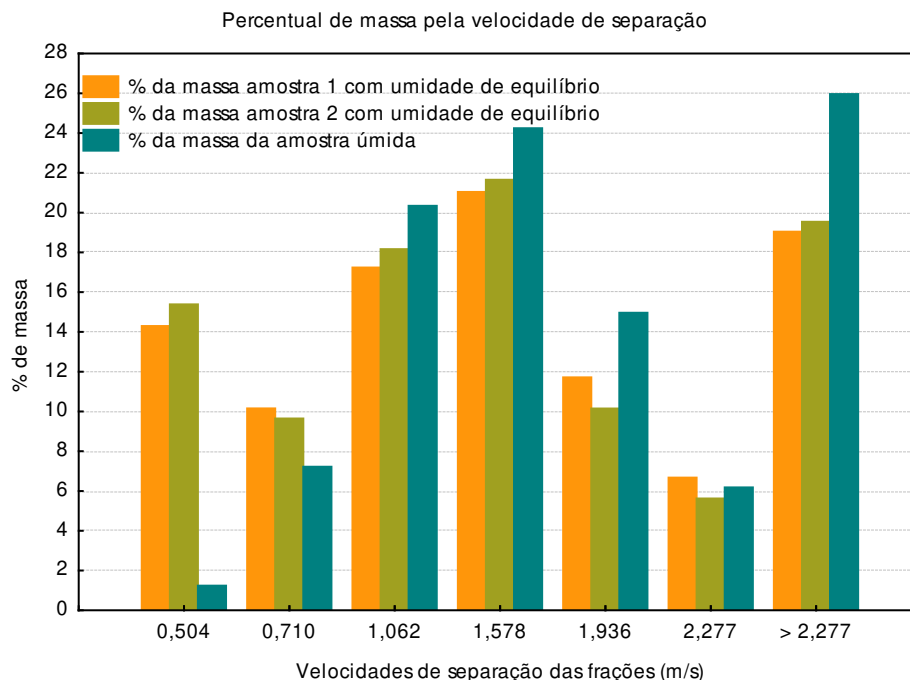


Figura 47. Quantidade relativa das massas separadas das três amostras, pela velocidade de separação.

Nota-se que, nas amostras com umidade de equilíbrio, as quantidades separadas em função das velocidades são muito próximas entre si e tendem a se equiparar; enquanto na amostra úmida se obtém uma quantidade menor de bagaço nas partículas de menor velocidade de elutriação e uma quantidade maior na fração que tem velocidade de elutriação maior. Isto porque a massa das partículas da amostra úmida é maior em função da umidade, com tendência à se aglomerarem, sendo necessária uma velocidade maior para que sejam elutriadas.

4.2. Mensuração através de imagem

O uso de imagem para a mensuração dimensional é comum e empregado há muito tempo. Neste trabalho, este uso vem substituir outros processos de medida de partículas, como o que utiliza o peneiramento e os métodos de medição por micrômetro ou paquímetro, sendo estes dois últimos métodos trabalhosos e pouco precisos.

O processo de medição foi feito através do software Image Tools (IT), conforme procedimento descrito anteriormente no item 3.3.2. Um dos parâmetros mensurados pelo software é a área ocupada pela partícula. Esta medida é necessária para o cálculo do coeficiente de arrasto da partícula em um escoamento e corresponde à maior área projetada pela partícula. Quando for necessário o uso da área projetada, será esta a medida a ser considerada.

Na medição da área da partícula verificou-se que existe uma dispersão relativamente grande, que já era esperada. A maior área projetada é apenas um fator a ser considerado no processo de elutriação e na sedimentação dessa partícula, diferentemente no processo de separação por peneiramento, onde a área é o principal fator utilizado.

Nas Figuras 48 a 53 é possível ver claramente essa dispersão, é possível notar também que as linhas médias das áreas das partículas são relativamente próximas nas mesmas velocidades de separação.

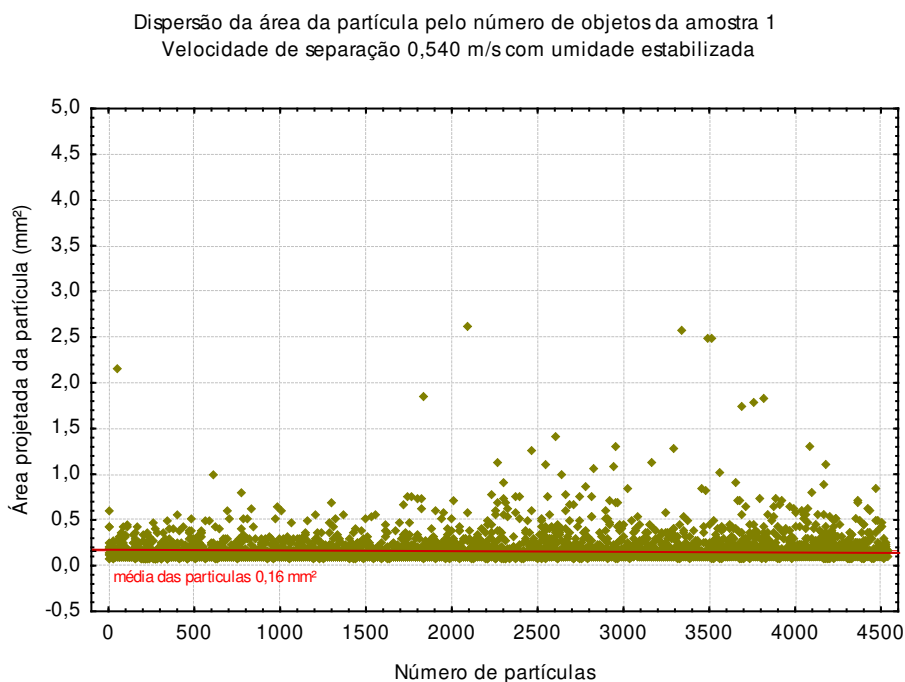


Figura 48. Dispersão da amostra 1 com umidade em equilíbrio e com velocidade de separação de 0,504 m/s

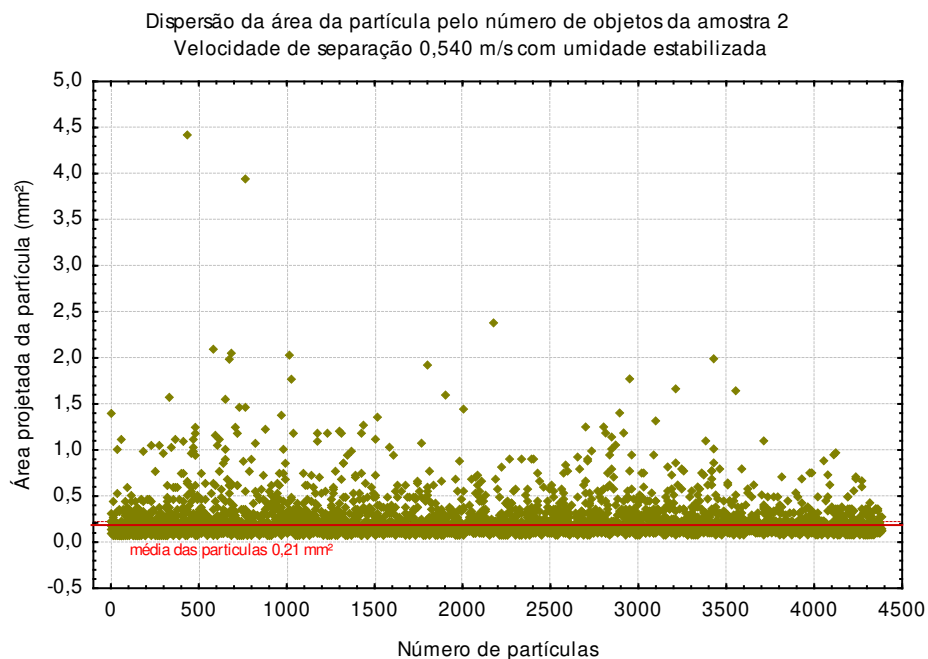


Figura 49. Dispersão da amostra 2 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 0,504 m/s

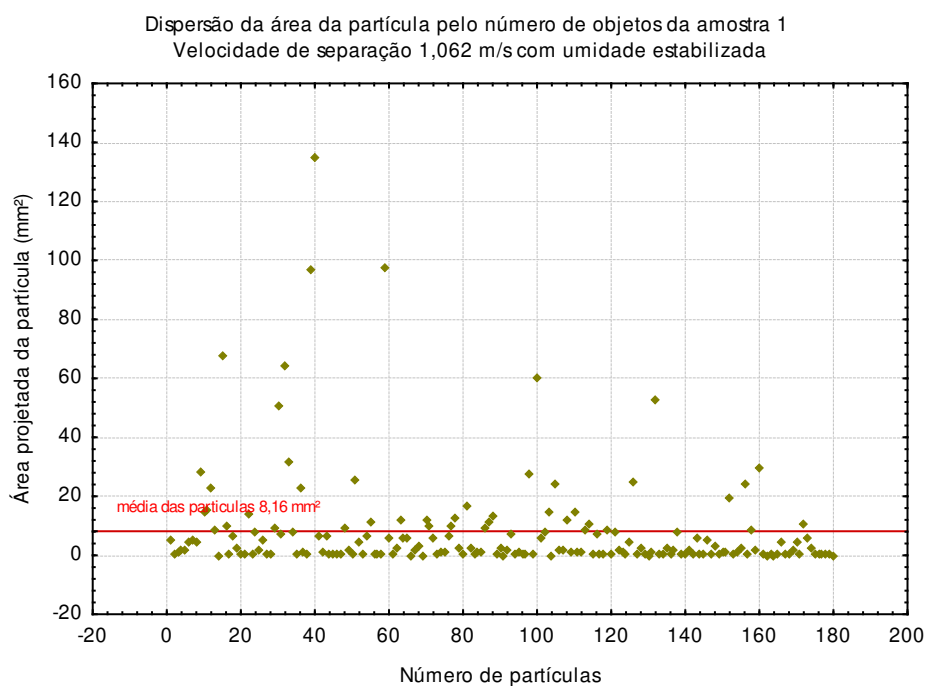


Figura 50. Dispersão da amostra 1 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 1,062 m/s

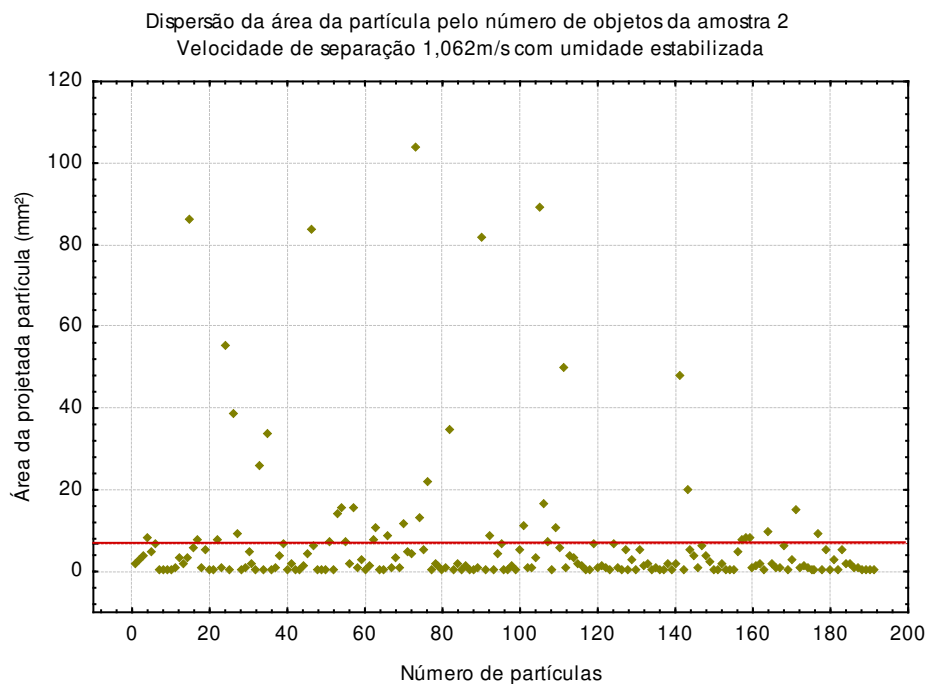


Figura 51. Dispersão da amostra 2 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 1,062 m/s

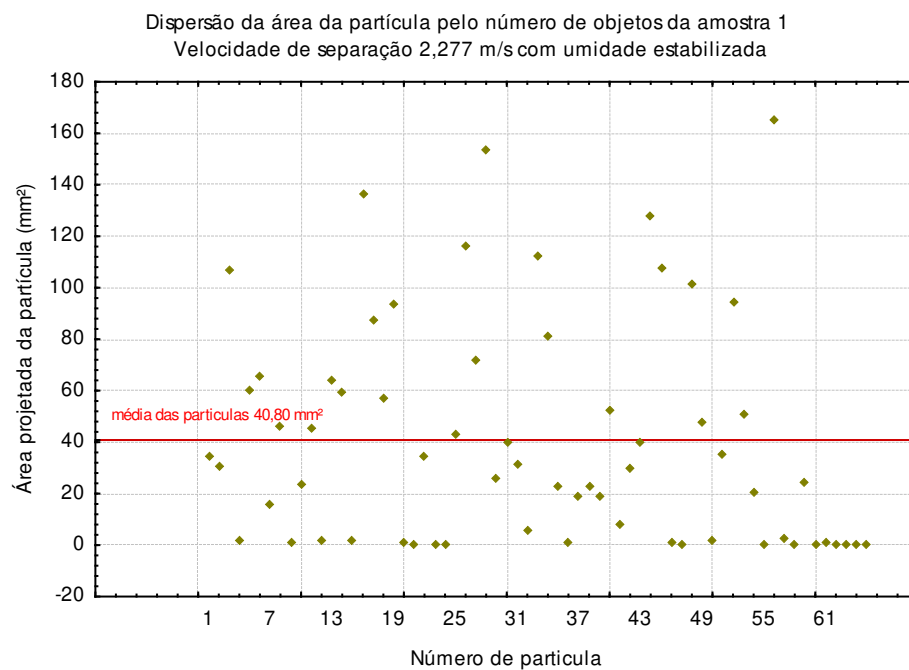


Figura 52. Dispersão da amostra 1 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 2,277 m/s

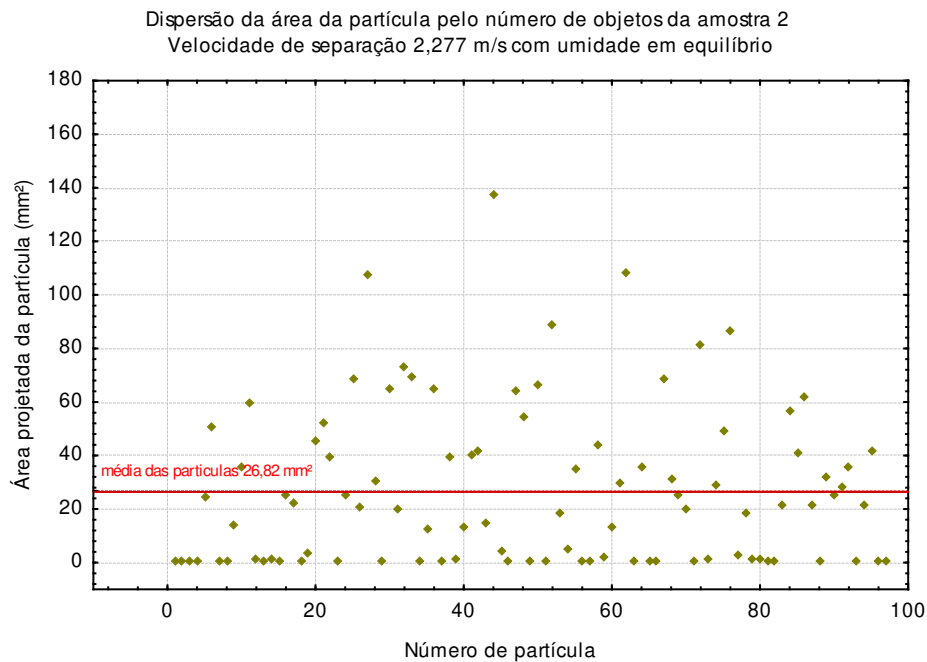


Figura 53. Dispersão da amostra 2 com umidade em equilíbrio e velocidade de separação de 2,277 m/s

Nota-se que o número de partículas estudadas é menor à medida que a velocidade de separação aumenta. Isto porque, para a mensuração da densidade aparente e do volume, necessitava-se de uma massa mínima; assim sendo, quanto menor forem as dimensões da partícula maior deveria ser a quantidade delas.

Outras dimensões medidas pelo software IT foram os maiores comprimentos de cada partícula, perpendiculares entre si; o maior destes denominado comprimento maior e o outro comprimento menor, conforme representado na Figura 54. Tais dimensões são descritas em Baxes (1994) e referenciadas pelo software.

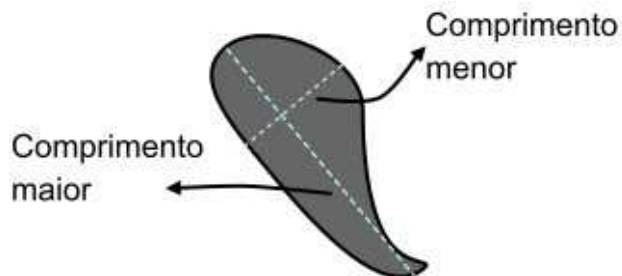


Figura 54. Comprimento maior e menor da partícula

A dimensão diâmetro da partícula D_p , necessária para o cálculo do número de Reynolds da partícula (Re_p), será dado pela dimensão de comprimento menor fornecida pelo software IT, isto é justificado porque foi considerado que as partículas estudadas são cilindros determinadas pelo maior e o menor comprimento conforme mostrado na Figura 55.

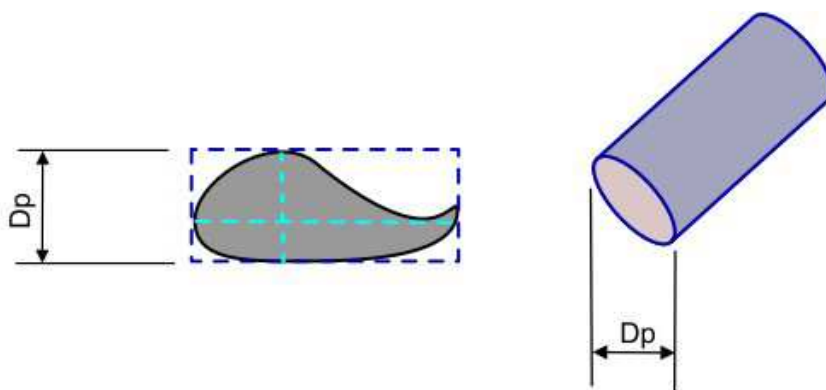


Figura 55. Mostra a medida usada como o diâmetro da partícula (D_p)

Embora esta consideração não retrate com perfeição a forma do bagaço de cana ou mesmo o diâmetro médio da partícula, em razão de sua grande variação dimensional, é uma maneira de aproximar o máximo possível a forma real da partícula, com as dimensões obtidas pelo método usado para a sua mensuração

Os resultados da área projetada, do maior e do menor comprimento estão na Tabela 19, com seus pontos máximos e mínimos, com o desvio padrão médio e com o erro médio de todas as dimensões mensuradas pelo software IT.

Tabela 19. Médias, das áreas do maior e do menor comprimento

Amostra 1 estabilizada					Amostra 2 estabilizada				
Veloc. de separação (m/s)	Quant. de partículas estudadas	Área projetada da partícula (mm²)	Maior comp. (mm)	Menor comp. (mm)	Quant. de partículas estudadas	Área projetada da partícula (mm²)	Maior comp. (mm)	Menor comp. (mm)	
0,5040	4000	0,16	0,47	0,27	4200	0,21	0,61	0,28	média
		0,15	0,29	0,13		0,21	0,37	0,19	desvio padrão médio
		2,61	4,11	2,06		4,42	4,38	2,18	máximo
		0,07	0,26	0,00		0,07	0,26	0,00	mínimo
		0,08	0,20	0,06		0,12	0,25	0,11	erro médio
0,710	1200	1,88	2,27	0,88	840	2,65	2,86	0,91	média
		3,90	2,61	1,01		13,69	4,54	1,85	desvio padrão médio
		69,05	24,13	14,64		329,41	55,30	28,55	máximo
		0,08	0,25	0,12		0,06	0,28	0,00	mínimo
		1,74	1,66	0,52		3,32	2,51	0,84	erro médio
1,062	200	8,48	6,49	1,86	250	6,81	5,87	1,64	média
		17,79	7,59	3,32		15,86	6,50	3,08	desvio padrão médio
		135,10	46,78	17,87		103,65	34,46	21,10	máximo
		0,08	0,28	0,12		0,16	0,40	0,13	mínimo
		9,54	5,53	1,93		7,98	4,90	1,83	erro médio
1,578	178	7,82	6,56	1,65	254	9,72	7,36	1,91	média
		9,08	5,48	1,59		17,30	6,89	2,70	desvio padrão médio
		51,29	28,13	11,83		186,34	41,51	17,24	máximo
		0,10	0,36	0,13		0,16	0,40	0,18	mínimo
		6,33	4,29	1,04		8,86	5,08	1,62	erro médio

(continua)

Amostra 1 estabilizada					Amostra 2 estabilizada				
Veloc. de separação (m/s)	Quant. de partículas estudadas	Área projetada da partícula (mm ²)	Maior comp. (mm)	Menor comp. (mm)	Quant. de partículas estudadas	Área projetada da partícula (mm ²)	Maior comp. (mm)	Menor comp. (mm)	
1,930	96	20,14	10,53	2,78	131	22,78	12,79	3,17	média
		32,28	10,13	3,60		27,40	11,53	3,86	desvio padrão médio
		202,71	46,03	20,93		132,35	50,94	18,71	máximo
		0,18	0,46	0,13		0,16	0,46	0,18	mínimo
		20,08	8,01	2,40		20,89	9,64	2,79	erro médio
2,277	60	40,80	15,75	4,91	89	26,82	13,17	3,18	média
		43,09	13,40	5,46		29,44	12,58	3,22	desvio padrão médio
		165,56	51,75	21,57		137,25	62,08	13,61	máximo
		0,16	0,40	0,28		0,15	0,39	0,25	mínimo
		34,71	10,95	4,33		23,53	10,07	2,52	erro médio
> 2,277	38	81,37	21,23	4,88	60	37,59	13,18	3,29	média
		109,63	19,24	5,35		60,36	15,35	4,39	desvio padrão médio
		588,29	93,95	21,85		332,35	62,03	23,87	máximo
		0,22	0,63	0,28		0,16	0,46	0,13	mínimo
		76,57	14,97	3,73		41,94	12,33	3,12	erro médio

A média das áreas das duas amostras 1 e 2 com umidade em equilíbrio mostra que existe uma variação entre estas medidas quando as velocidades de separação são maiores, como pode ser visto na Figura 56.

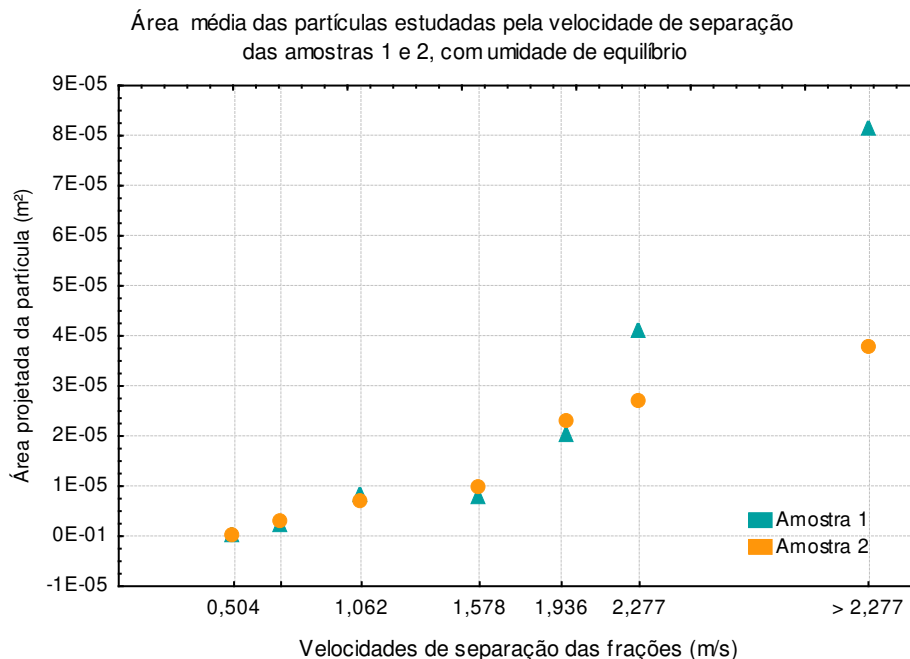


Figura 56. Mostra a diferença entre as áreas projetadas das amostras 1 e 2

4.3. Densidade aparente e volume

A densidade aparente que é discutida neste trabalho é dada pela razão entre a massa pelo volume da partícula, dada em kg/m^3 . Volume com poros e vazios que as partículas possuem. Microscopicamente é visível que cada partícula possui poros, sendo estes intrínsecos à morfologia do bagaço de cana-de-açúcar, e que em um escoamento influenciam as forças que agem sobre a partícula.

Neste trabalho foi considerado o volume envelopado da partícula, que é o volume como se houvesse uma película no entorno de cada partícula, como mostrado na Figura 21.

O volume deslocado por uma quantidade conhecida de partículas em um picnômetro, com n-heptano como fluido de trabalho, foi medido levando em consideração as observações feitas acima. Sabendo-se o número de partículas e o seu volume, a média do volume das partículas pode ser calculada.

Pode-se obter a média da densidade aparente das partículas, uma vez que a massa de todas as partículas e sua quantidade são conhecidas.

A Figura 57 mostra uma comparação entre a média dos volumes das partículas das amostras 1 e 2, com umidade em equilíbrio. A Figura 58, a média da densidade aparente das partículas destas mesmas amostras.

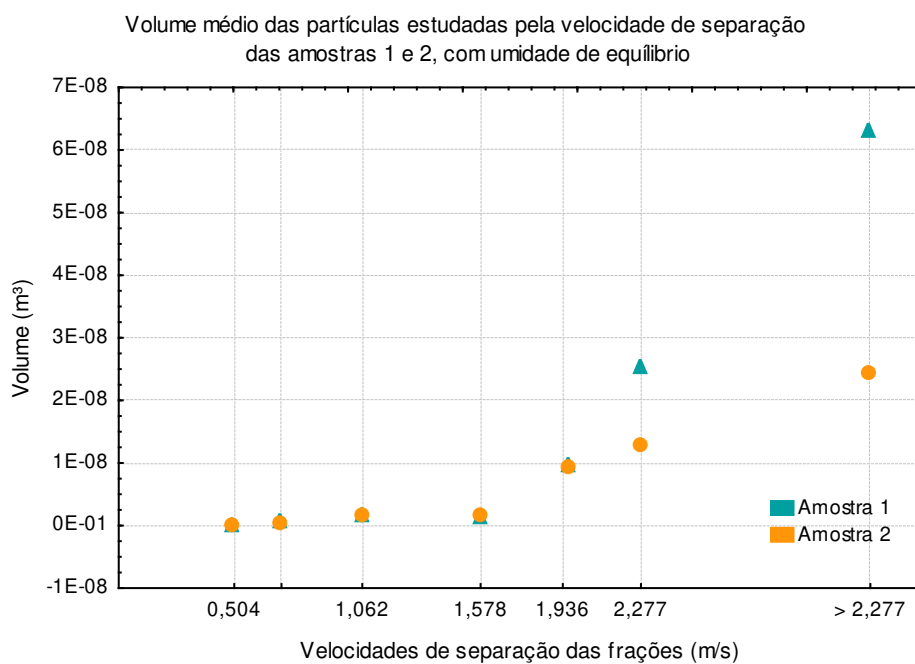


Figura 57. Volume médio das partículas em função da velocidade de separação.

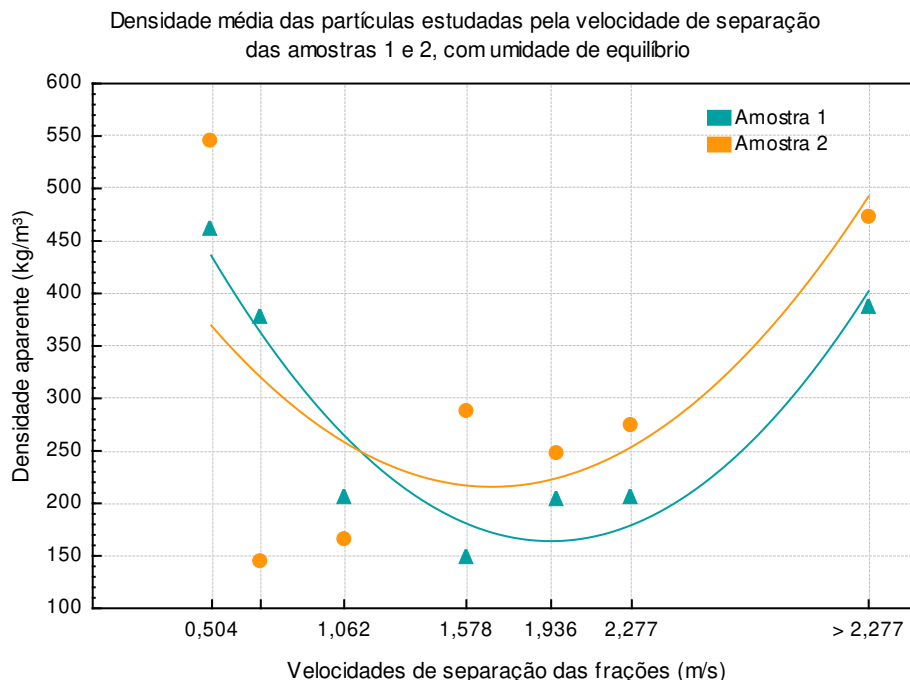


Figura 58. Densidade aparente média das partículas pela velocidade de separação, com média polinomial, das amostras 1 e 2 .

Na Figura 57, que mostra os volumes das partículas, nota-se que as médias destes volumes ficam um pouco diferentes quando comparadas as amostras 1 e 2, somente nas duas últimas medidas, que correspondem à velocidade de elutriação de 2,277 m/s e às partículas que foram somente sedimentadas (velocidade de elutriação > 2,277 m/s). Isso indica que existe uma dispersão volumétrica grande entre as partículas maiores.

A Figura 58 mostra que a densidade aparente das partículas maiores e menores é semelhante e que as partículas intermediárias têm densidade aparente menor. Resultado diferente do esperado, pois supunha-se que as densidades aparentes fossem seguir um comportamento inverso ao do volume, como apresentado no trabalho de Alarcon *et al.* (2006), que mostra um aumento gradual da densidade aparente à medida em que as partículas vão se tornando menores.

Como essas medidas não seguiram o padrão esperado, foram feitas três outras medidas de densidade. A Tabela 20 e a Figura 59 mostram as médias das medições de densidade, confirmando o comportamento apresentado na primeira medição.

Tabela 20. Densidades médias das amostra 1 e 2 com umidade de equilíbrio.

Velocidades de separação (m/s)	Amostra 1 (kg/m ³)	Amostra 2 (kg/m ³)
0,501	424,5	426,2
0,710	364,3	257,3
1,062	166,9	164,3
1,578	155,9	169,9
1,963	203,6	248,0
2,277	205,5	273,7
> 2,277	386,8	471,5

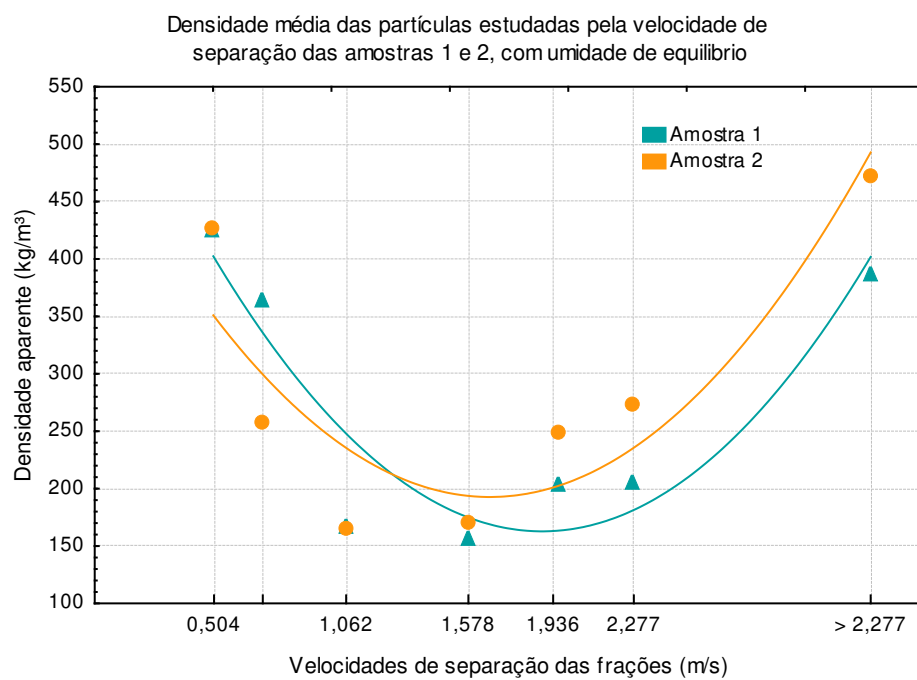


Figura 59. Média das densidades aparentes das amostras 1 e 2, pela velocidade de separação.

4.4. Fluidodinâmica da partícula

Uma das propostas deste trabalho foi encontrar um equacionamento que pudesse refletir o comportamento das partículas, quando dispostas em um escoamento e calcular o coeficiente de arrasto C_D , como parâmetro de referência.

A revisão bibliográfica forneceu vários equacionamentos que possibilitam calcular o coeficiente de arrasto das partículas em função do adimensional número de Reynolds da partícula, Re_p (equação 23).

Considerando uma partícula única, disposta em um escoamento vertical turbulento com paredes a distância infinita, as forças que atuam nessa partícula serão a força peso no sentido contrário ao escoamento, a força de arrasto F_D e a força de empuxo F_E , sendo que a igualdade destas três forças determina o equilíbrio desta partícula no escoamento. Caso a força de arrasto e a força de empuxo sejam menores que a força peso, a tendência dessa partícula é cair, sedimentar e, se estas forças excederem a força peso, esta partícula será arrastada, elutriada pelo escoamento (Figura 60).

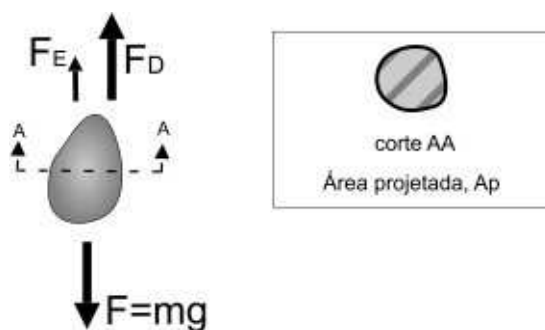


Figura 60. Disposição das forças atuantes em uma partícula, durante o escoamento.

Então:

$$F = mg \quad (42)$$

Dividindo essa equação pelo volume da partícula tem-se:

$$\frac{F}{V_p} = \frac{m}{V_p} g \rightarrow \frac{F}{V_p} = \rho_p g \rightarrow F = V_p \rho_p g \quad (43)$$

Da equação (20), a força de arrasto é definida por:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f w_f^2 A_p CD \quad (44)$$

Considerando o balanço de forças e o princípio de Arquimedes, pode-se dizer que:

$$-F = F_D \rightarrow (\rho_p g V_p - \rho_f g V_p) = \frac{1}{2} \rho_f w_f^2 A_p CD \quad (45)$$

Isolando o CD como fator a ser encontrado, tem-se:

$$CD = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gV_p}{\rho_f w_f^2 A_p} \quad (46)$$

Assim, o CD pode ser calculado em função da diferença das densidades do fluido e da partícula, da área projetada da partícula e de seu volume, em um escoamento sob a força da gravidade. O balanço de forças das partículas no escoamento determinará se as partículas sedimentarão ou se serão elutriadas.

Com o cálculo do CD estabelecido com parâmetros passíveis de mensuração, foi possível compará-lo com equacionamentos gerais desenvolvidos por vários autores.

Os equacionamentos disponíveis na literatura especializada para partículas não esféricas sempre trazem consigo o fator de correção ϕ , que é o quanto a partícula está distante de uma esfera; fator este que varia de 1 para uma esfera perfeita e menor do que 1 para uma partícula diferente da esfera.

Nebra e Macedo (1988) propõem que o formato típico da fibra a da cana-de-açúcar é aproximado a um de tronco cilíndrico, e a medula aproxima-se a um disco, conforme já discutido anteriormente.

Com a utilização do software Image Tools (IT) foi possível mensurar o maior e o menor comprimento da partícula, conforme mostrado na Figura 54.

Considerando-se o exposto acima, foi possível calcular a esfericidade ϕ das partículas, para se estabelecer uma comparação entre o cálculo feito neste trabalho, que não utiliza fator de correção, e os propostos pela literatura especializada. Assim, para o cálculo da esfericidade média da partícula usou-se as médias do maior e do menor comprimento dado pelo software (ver Tabela 19), e considerou-se todas as partícula como um tronco cilíndrico.

Tabela 21. Médias dos parâmetros que foram usados no cálculo do coeficiente de arrasto.

	Velocidades de separação (m/s)	Área projetada (m ²)	(ϕ) PHI	Densidade aparente da partícula (kg/m ³)	Volume da partícula (m ³)	Diâmetro D _f (m)
Amostra 1	0,504	1,60E-07	0,98	460,80	8,71E-11	4,30E-04
	0,710	1,86E-06	0,89	375,95	4,55E-10	1,26E-03
	1,062	8,20E-06	0,80	205,78	1,45E-09	2,33E-03
	1,578	7,60E-06	0,80	148,60	1,32E-09	2,68E-03
	1,936	2,01E-05	0,79	203,64	9,56E-09	3,94E-03
	2,277	4,08E-05	0,82	205,45	7,53E-08	5,89E-03
	>2,277	8,14E-05	0,79	386,84	6,29E-08	7,97E-03
Amostra 2	0,504	2,10E-07	0,91	545,27	9,01E-11	4,90E-04
	0,710	2,60E-06	0,82	143,19	3,67E-10	1,23E-03
	1,062	6,65E-06	0,76	164,26	1,42E-09	2,11E-03
	1,578	9,72E-06	0,79	287,01	1,56E-09	2,84E-03
	1,936	2,28E-05	0,78	248,00	9,27E-09	4,29E-03
	2,277	2,68E-05	0,81	273,65	1,27E-08	4,69E-03
	>2,277	3,76E-05	0,71	471,45	2,42E-08	4,92E-03

Nota-se que o valor da esfericidade média mostrado na Tabela 21, variam de 0,98 a 0,71 considerando que as partículas são troncos cilíndricos, estes valores são próximos ao mostrado por Yang (2004), para esta mesma geometria.

No cálculo do coeficiente de arrasto, além do equacionamento usado neste trabalho, equação (46), foram utilizados os equacionamentos de; Clif *et al.* (1978), equação (24); Haider e

Levenspiel (1989), equação (26); Ganser (1993), equação (33); Chien (1994), equação (37); e Sosa-Arnao (2007), equação (39).

Para o cálculo do coeficiente de arrasto foi desenvolvido um aplicativo utilizando o software EES Engineering Equation Solver, versão acadêmica, documentado no Anexo I.

Os cálculos elaborados com o aplicativo desenvolvido permitiram a construção da Tabela 22, que mostra os coeficientes de arrasto médios dos autores elencados acima e o proposto neste trabalho (CD_{GOO}), e a construção dos gráficos apresentados nas Figuras 61 e 62, que mostram uma comparação entre os valores médios do coeficiente de arrasto CD em função do número de Reynolds da partícula.

Tabela 22. Coeficientes médios de arrasto das partículas das amostra 1 e 2, sua velocidade de separação (elutriação) e os números de Reynolds do escoamento e da partícula.

Velocidade de separação (m/s)	$CD_{SosaArnao}$	CD_{Clif}	$CD_{H\&L}$	CD_{Ganser}	CD_{Chien}	CD_{GOO}	Re_{esc}	Re_p
0,504	1,05	20,66	12,40	4,60	3,97	15,98	3228	8,88
0,711	0,90	15,25	6,22	2,15	1,66	2,28	4549	40,72
1,062	0,81	12,92	3,64	1,64	1,58	0,53	6799	119,00
1,528	0,78	12,23	3,20	1,41	1,40	0,22	9783	174,15
1,930	0,72	11,02	2,51	1,28	1,37	0,43	12359	367,70
2,227	0,69	10,40	2,28	1,14	1,17	1,15	14258	576,75
2,227	0,68	10,28	2,36	1,43	1,62	0,90	15282	616,10

* Re_{esc} : número de Reynolds do escoamento definido por $Re = \frac{w_s d_{esc} \rho_f}{\mu_f}$

onde d_{esc} é o diâmetro onde está inserido o escoamento.

** Re_p : número de Reynolds da partícula (equação 23).

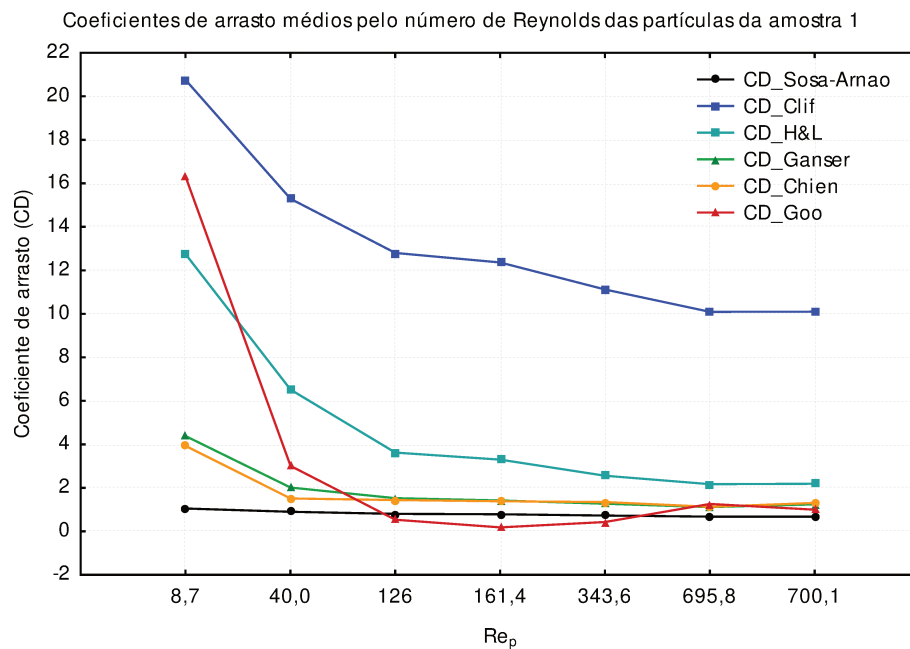


Figura 61. Comparativo entre os coeficientes de arrasto (CD) médios da amostra 1.

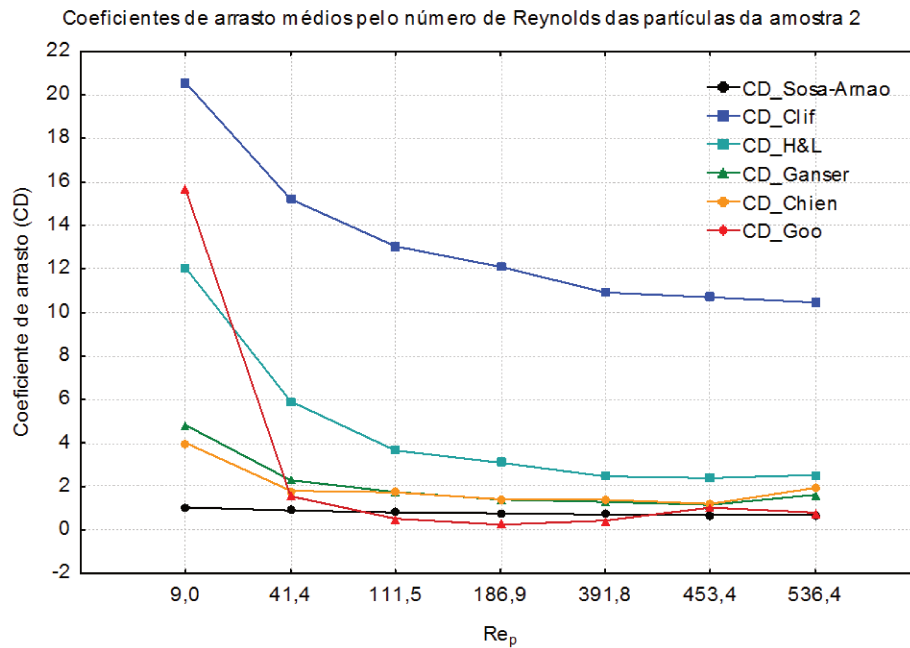


Figura 62. Comparativo entre os coeficientes de arrasto (CD) médios da amostra 2.

Notou-se que os coeficientes de arrasto propostos por Ganser (1993) e por Chien (1994) melhor se aproximam do resultado obtido pelo cálculo proposto nesse trabalho.

Chhabra (2007) faz um alerta para o equacionamento proposto por Chien (1994), afirmando ser um bom método de aproximação mas que nos valores dos números de Reynolds baixos, foge muito do comportamento real, o que também pode ser confirmado pelo coeficiente de arrasto deste trabalho (CD_{GOO}).

O cálculo proposto neste trabalho e a comparação com os valores de equacionamentos gerais para o coeficiente de arrasto demonstram que é possível mensurar e calcular o coeficiente de arrasto do bagaço de cana-de-açúcar sem a interferência do fator de correção ϕ , para as diferentes granulometrias encontradas no bagaço de cana.

4.5. Morfologia do bagaço de cana

Com o bagaço de cana-de-açúcar separado em sete frações distintas por elutriação e sedimentação, observou-se que suas granulometrias eram também diferentes, como já discutido anteriormente.

Observou-se também que essa forma de separação de particulados não dá a homogeneidade dimensional, ou seja, em uma mesma fração que foi elutriada existem partículas de diferentes tamanhos, mas com um coeficiente de arrasto próximo, pois estas partículas foram elutriadas e sedimentadas em escoamentos com velocidades determinadas, para se obter estas frações.

Essas observações foram feitas e podem ser confirmadas com a ajuda do equipamento "Eletron Probe Microanalyzer" Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), modelo JEOL JXA-840 A, que permitiu possível fotografar todas as frações das partículas da amostra 2 com umidade de equilíbrio com o ambiente.

Todas as fotos estão disponíveis no Anexo II e têm aumentos de 10, 25 e 100 vezes.

Estudando as fotos das partículas que foram elutriadas com velocidade no escoamento de 0,504 m/s, a menor velocidade de elutriação aplicada neste trabalho, com um aumento de 10 vezes ao tamanho normal, pode-se observar a existência de fibras e de medulas com tamanhos próximos, como pode ser visto na Figura 63.

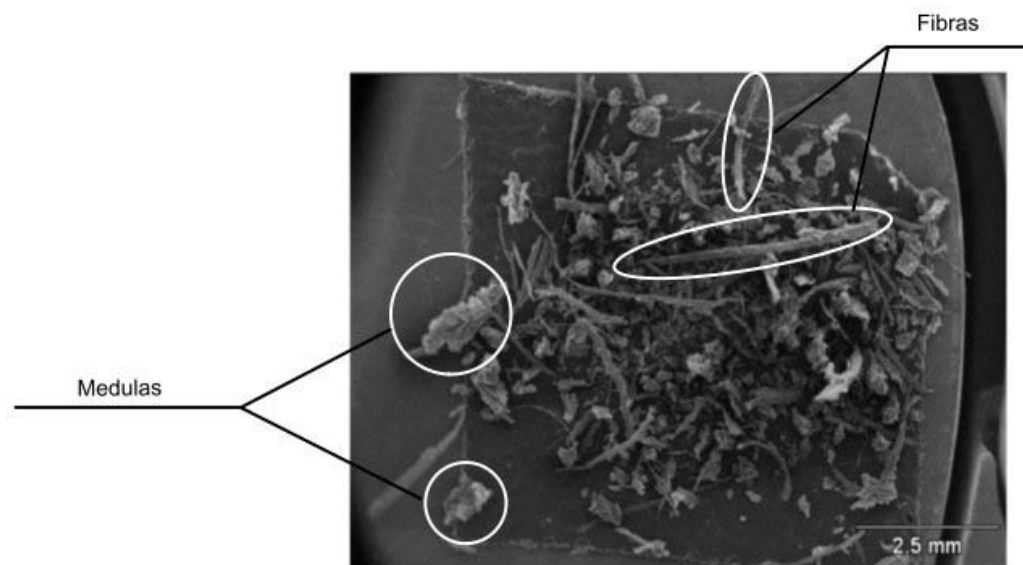


Figura 63. Amostra 2 em umidade de equilíbrio; velocidade de separação de 0,504 m/s, com aproximação de 10 vezes

A fotografia da amostra nos permite ver a presença das duas formas do bagaço de cana, medula e fibra, descritas por Nebra e Macedo (1988). A nitidez desta foto permite ver com clareza que as fibras são troncos cilíndricos com grande altura em relação a base, e as medulas têm forma próxima a um elipsóide, com o comprimento maior próximo ao maior comprimento ortogonal (vide Figura 65).

Isso mostra correta a suposição de que as partículas do bagaço de cana podem ser considerados troncos cilíndricos, mesmo nas partículas pequenas.

Na Figura 64 tem-se a foto das partículas da amostra 2 com umidade em equilíbrio elutriadas à velocidade de separação de 0,701 m/s. As partículas desta amostra possuem uma quantidade de medula menor e de maior tamanho e uma maior quantidade de fibra com relação à fração anterior. Esse aspecto foi notado mesmo a olho nu sem a necessidade do aumento.

Uma aproximação maior nas partículas do bagaço de cana (Figura 65) permite perceber o quanto são rugosas e ainda notar os poros e vazios que estas partículas possuem, o que influencia diretamente na fluidodinâmica da partícula.

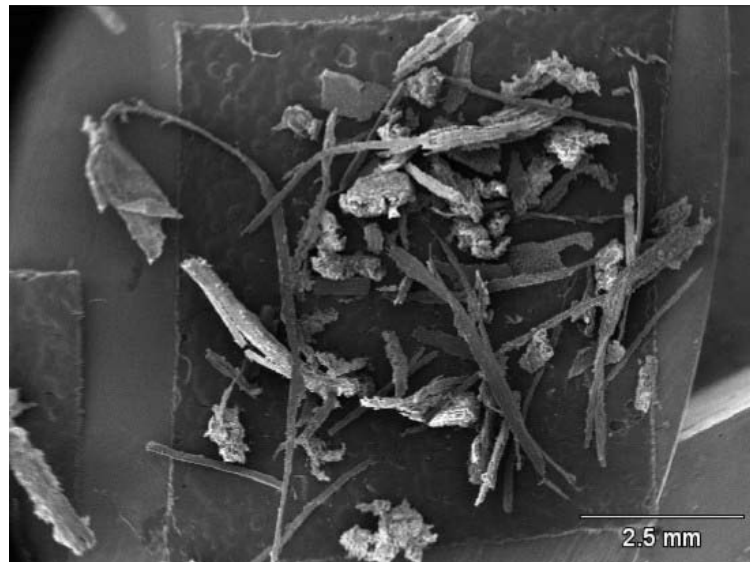


Figura 64. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 0,701 m/s, com aproximação de 10 vezes

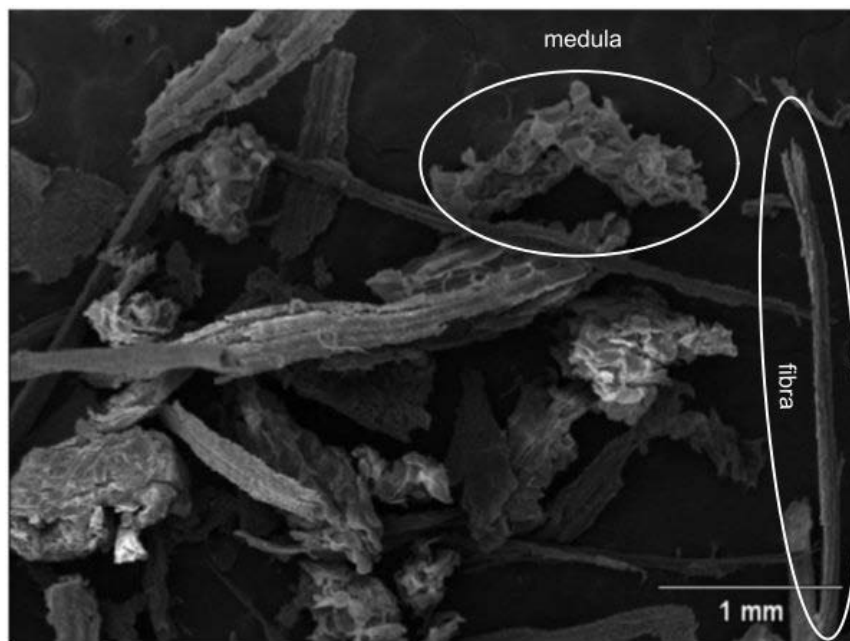


Figura 65. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 0,701 m/s, com aproximação de 25 vezes

A Figura 66 mostra partículas que foram elutriadas com velocidades de 1,578 m/s. Acima desta velocidade de separação de partículas por elutriação é raro encontrar medula. A imagem indica ainda a área delimitada que será aumentada em 25 vezes na Figura 67.

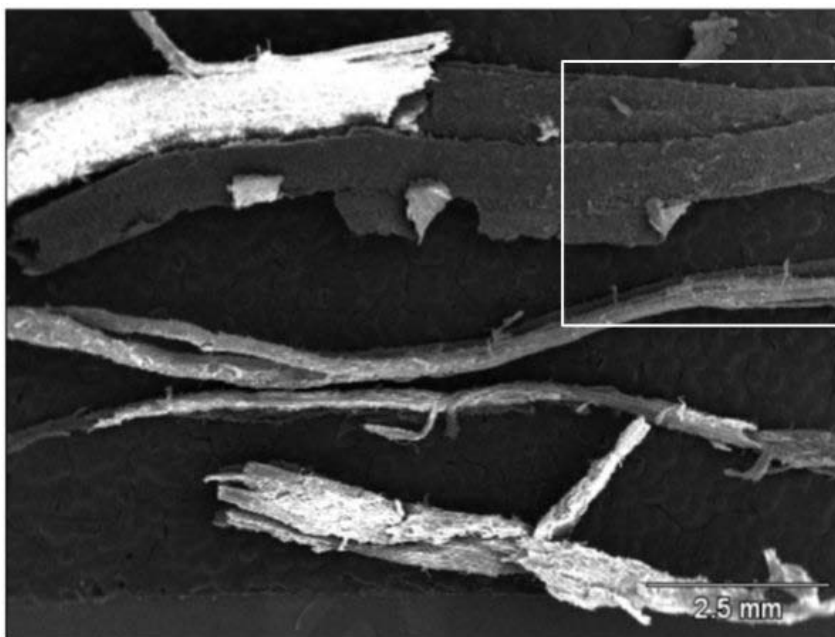


Figura 66. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 1,578 m/s, com aproximação de 10 vezes

Com o aumento de 25 vezes pode-se observar, como indicado na imagem, partículas soltando-se das fibras (descamações). Isso foi notado no armazenamento e manuseio das partículas. Depois de separadas, surgiam junto das amostras maiores, pequenas partículas soltas. Inicialmente achou-se que poderiam ser partículas não elutriadas, mas a observação destas fotos, em que pode-se notar estas descamações, explica o surgimento das partículas menores.

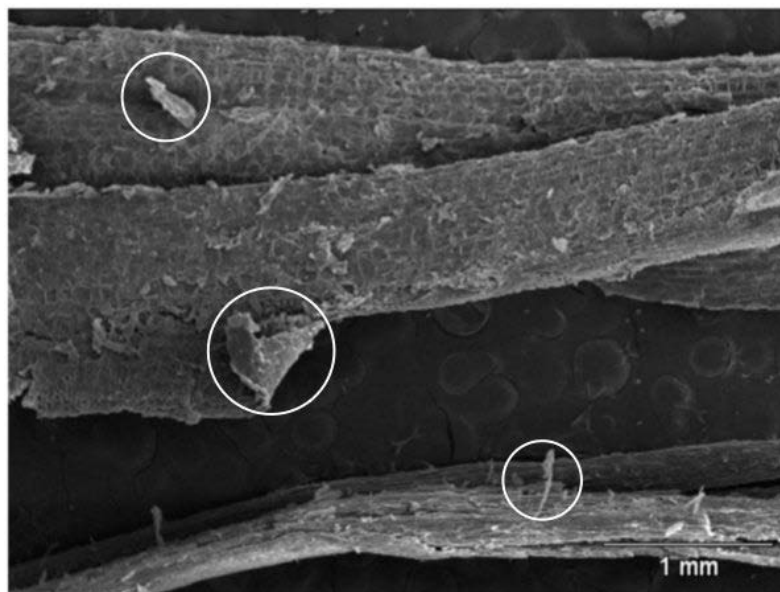


Figura 67. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 1,578 m/s, com aproximação de 25 vezes

Todas as frações da amostra tiveram um aumento de 200 vezes sobre algumas partículas para se observar a fibra ou a medula das partículas do bagaço de cana-de-açúcar, sua forma, seus poros e vazios, como mostrado nas Figuras 68 e 69.

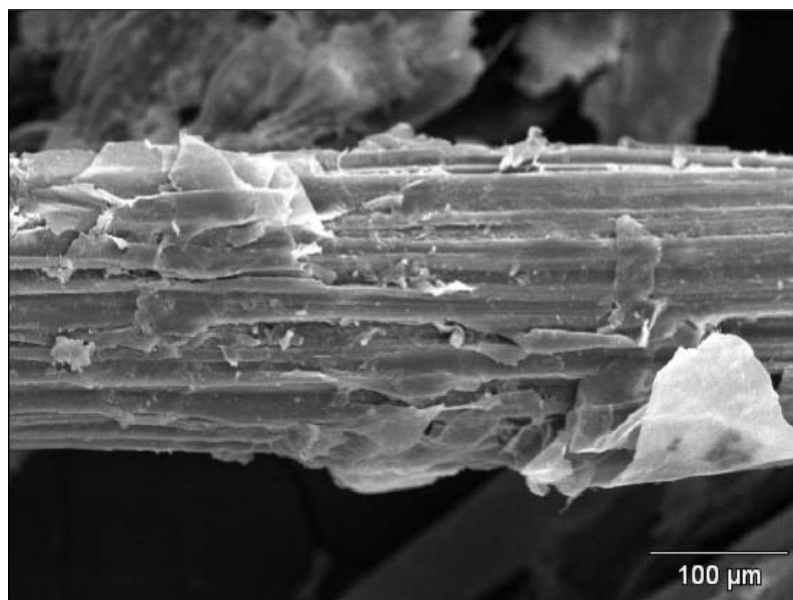


Figura 68. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de 1,062 m/s, com aproximação de 200 vezes

Nota-se na Figura 69, na imagem da fração que foi apenas sedimentada, e que contém as maiores partículas obtidas nesse experimento, uma quantidade muito grande de partículas soltando-se do corpo da fibra.

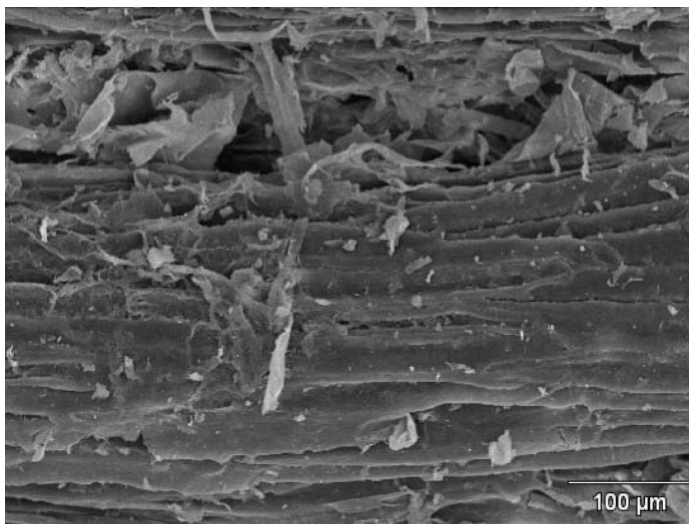


Figura 69. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação $> 2,277\text{m/s}$, com aproximação de 200 vezes

Interessante notar que essas descamações ocorrem apenas nas fibras. Quando se ampliou 200 vezes a imagem de uma medula (Figura 70), essas descamações não foram notadas.

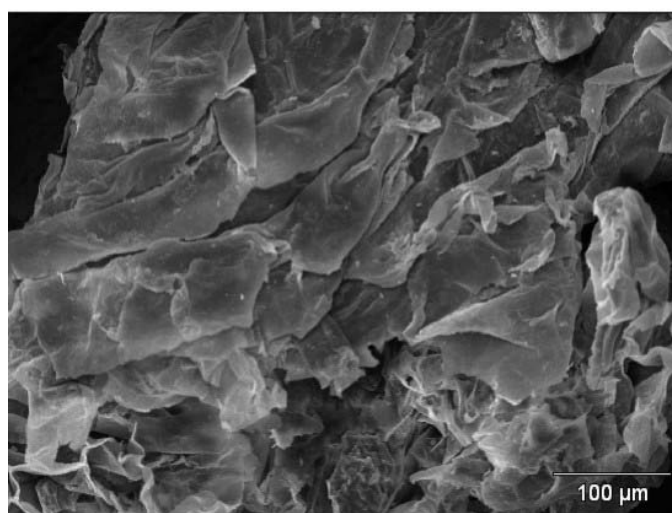


Figura 70. Amostra 2 em umidade de equilíbrio, velocidade de separação de $0,710\text{m/s}$, com aproximação de 200 vezes (detalhe de uma medula).

4.6. Análise termogravimétrica

A termogravimetria se mostra uma ferramenta útil para a análise elementar da biomassa e, como o processo de separação do bagaço de cana deste trabalho não foi feito de forma usual, achou-se necessária a realização desta análise para detecção de possíveis variações, em termos de volatilização de seus elementos.

Após a separação do bagaço de cana-de-açúcar através do equipamento de elutriação e sedimentação, em sete partes com granulometrias diferentes, foram feitas as análises termogravimétricas das partes pertencentes à amostra 2 com umidade de equilíbrio. As análises foram feitas com velocidade de aquecimento de 10°C por minuto até atingir a temperatura de 1000°C, utilizando como gás de arraste em atmosfera inerte o nitrogênio N₂ e, em atmosfera oxidante, o ar sintético, tendo em sua composição somente N₂ e O₂.

A termogravimetria foi feita primeiramente em atmosfera inerte, e não se notou nada de diferente com relação ao encontrado na literatura especializada. A Figura 71 permite comparar os resultados de todas as frações.

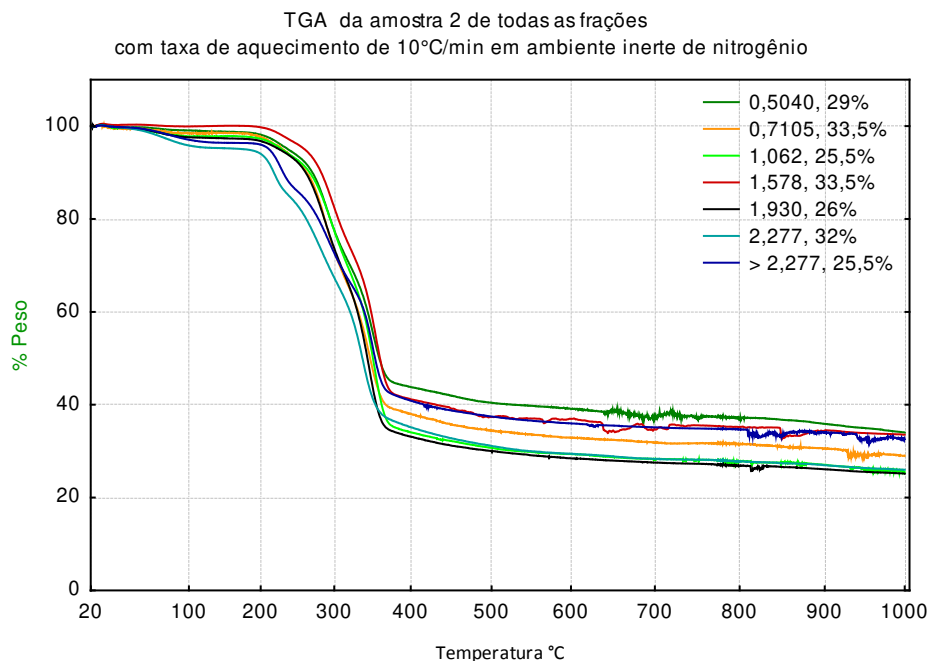


Figura 71. TGA de todas as frações da amostra 2.

O que podemos notar neste gráfico é que aproximadamente 60% dos voláteis se encontram entre 200°C e 350°C e no restante se encontra o carbono fixo terminando a 1000°C com um percentual entre 25,5 a 33,5% da massa inicial da amostra das frações.

A DTG que é a derivada da curva da TGA permite identificar as temperaturas onde ocorrem mudanças e suas temperaturas de maior volatilização.

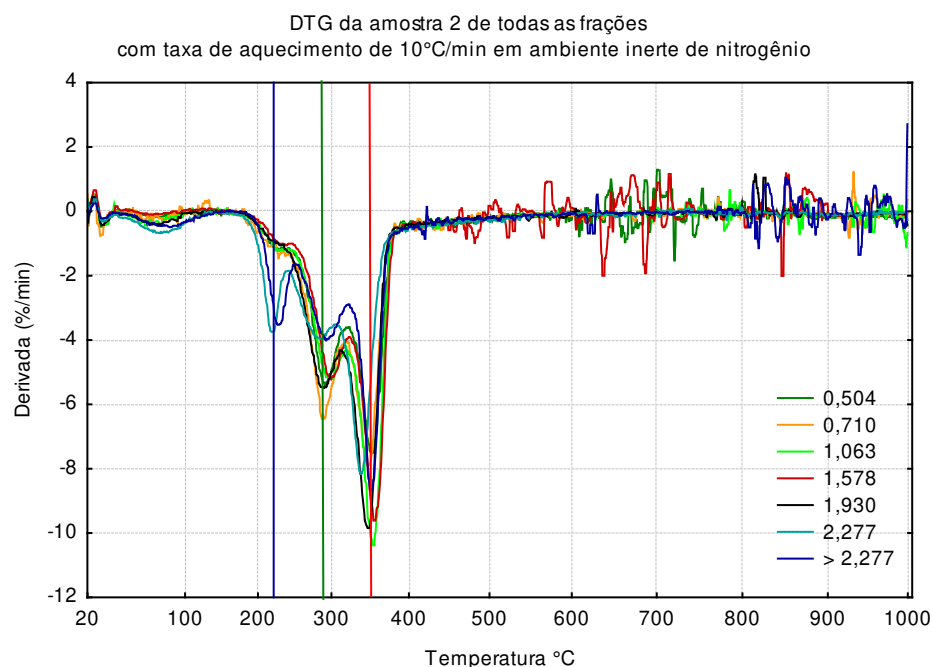


Figura 72. DTG de todas as frações da amostra 2 em ambiente inerte

Verificando a Figura 72, como gráfico da DTG do bagaço da cana-de-açúcar, vê-se nitidamente 3 pontos de inflexão entre 200°C e 350°C correspondentes às temperaturas de maior volatilização de diferentes elementos.

Nota-se, com a sobreposição das curvas de DTG, que independente da fração da amostra, as temperaturas são sempre convergentes.

Podemos desconsiderar as oscilações ocorridas acima de 400°C por serem ruídos.

A aquisição destas mesmas informações em atmosfera oxidante mostrou-se mais interessante pois, apesar do comportamento das temperaturas de volatilização se darem de maneira correspondente ao que se discute na literatura especializada, após a total volatilização do carbono fixo, as curvas se estabilizam em percentuais constantes mas decrescentes entre si.

A Figura 73 permite identificar o início da volatilização dos elementos ligno-celulósicos a 200°C e a volatilização do carbono fixo reagido com o oxigênio iniciando em torno de 320°C e terminando em torno de 450°C.

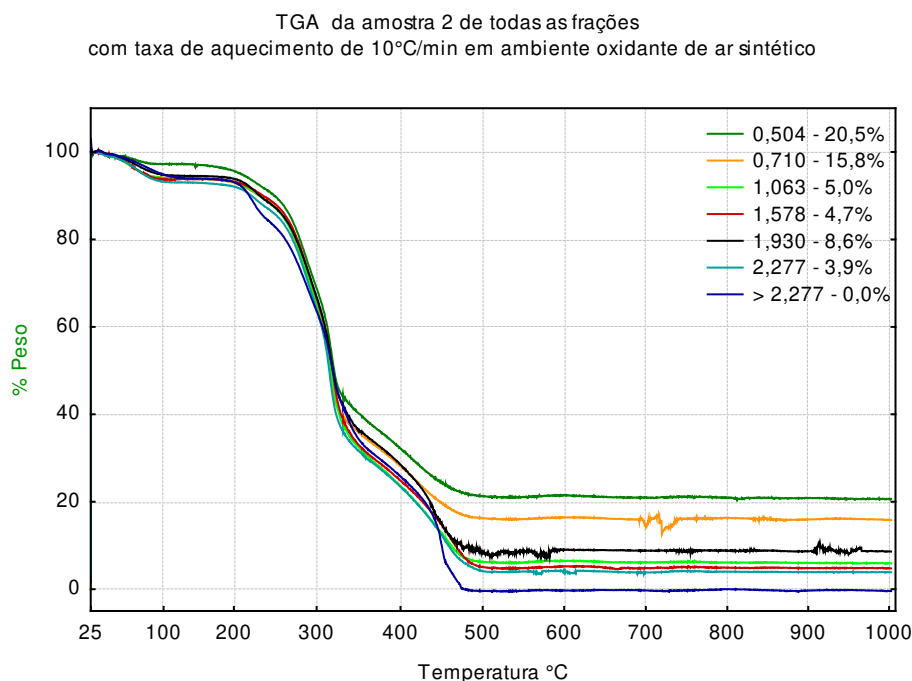


Figura 73. TGA de todas as frações da amostra 2 em ambiente oxidante

Nas frações de menor granulometria, ou seja, as que foram elutriadas com menor velocidade, se tem uma quantidade maior de inertes, cinzas, como pode ser visto claramente no gráfico da Figura 73.

A fim de se confirmar estes resultados foi utilizado também o método tradicional para determinação do teor de cinzas, que utiliza uma maior quantidade de amostra em cadinho e mufla aquecida em uma rampa de aquecimento a 5°C por minuto e até 500°C, permanecendo nesta temperatura por 12 horas. Os resultados deram origem à Tabela 23 e ao gráfico da Figura 74, que confirmaram os resultados da TGA feita anteriormente.

Tabela 23. *Quantidade de massa de bagaço de cana e quantidade obtida de cinzas em função da velocidade de separação no elutriador sedimentador*

Velocidade de separação (m/s)	Massa da fração (g)	Massa da cinzas (g)	Fração de cinza	%
0,504	1,642	0,349	0,212	21,2
0,711	1,685	0,282	0,167	16,7
1,062	1,012	0,055	0,054	5,4
1,578	1,249	0,055	0,044	4,4
1,930	1,610	0,063	0,039	3,9
2,227	1,245	0,038	0,030	3,0
> 2,227	2,790	0,078	0,028	2,8

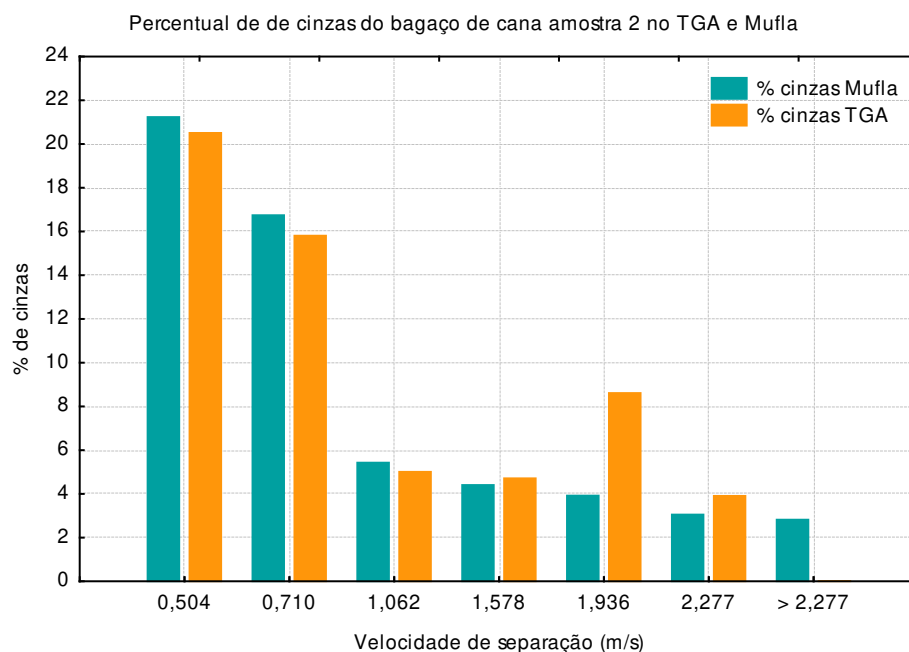


Figura 74. *Percentual de cinzas da TGA e da mufla pela velocidade de separação das frações da amostra 2 com umidade de equilíbrio*

O gráfico da Figura 74 foi construído com o resultado relativo à quantidade de cinzas conseguida na TGA e à quantidade relativa conseguida através da mufla aquecida e, como se pode observar, a tendência da quantidade de cinzas mostra-se igual nos dois métodos utilizados.

As Figuras 75 e 76 permitem observar as quantidades de cinzas acumuladas nos cadinhos, quando utilizada a mufla e mostram, respectivamente, as frações de maior e menor partícula. Pode-se observar que a amostra de menor partícula acumulou mais cinzas.



Figura 75. Fração da amostra 2 com velocidade de separação $> 2,277 \text{ m/s}$



Figura 76. Fração da amostra 2 com velocidade de separação $0,504 \text{ m/s}$

A DTG das frações de bagaço de cana, feita em ambiente oxidante com ar sintético, mostra a secagem antes de atingir 100°C e a volatilização de produtos lignocelulósicos entre 200°C e 350°C , tal qual ocorreu na DTG que utilizou atmosfera inerte e acrescenta ainda uma outra faixa de temperatura entre 400°C e 500°C , que é a oxidação do carbono fixo (Figura 77).

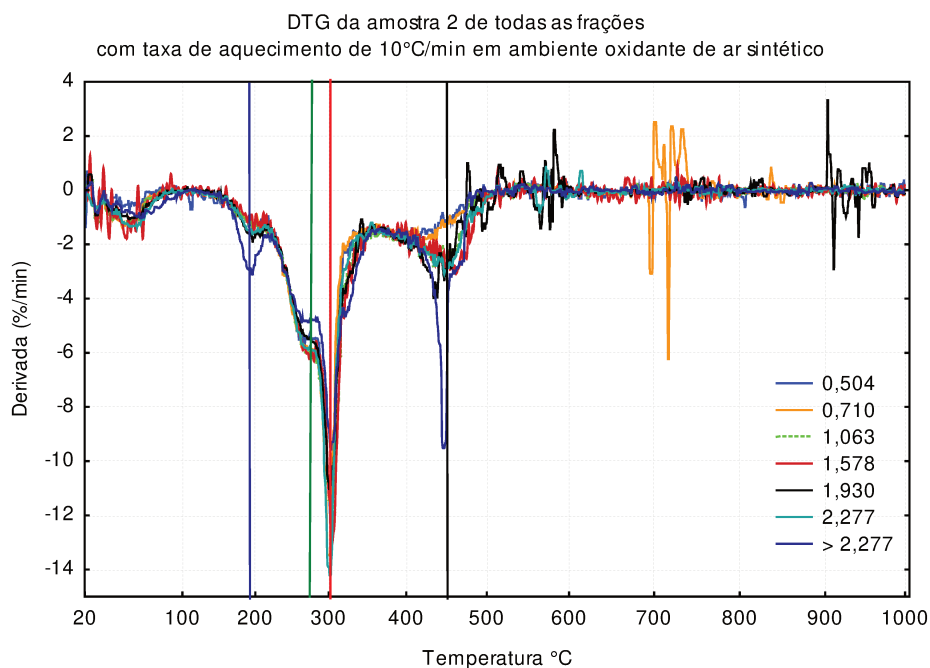


Figura 77. DTG de todas as frações da amostra 2 em ambiente oxidante

4.7. Análise elementar das cinzas

A análise quantitativa das cinzas foi feita através da calcinação das sete frações da amostra 2 do bagaço de cana, em uma mufla a 500 °C por um período de 12 horas, garantindo a ausência de voláteis.

Estas análises foram feitas através do equipamento Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise (MEV), utilizando três pontos distintos da mesma amostra de cinzas de cada fração, sendo o que a média dessas três análises é apresentada na Tabela 24. Os resultados de cada ponto analisado são apresentados no Anexo IV.

Tabela 24. *Percentuais dos elementos oxidados da amostra 2*

		Velocidade de separação (m/s)						
		0,504	0,71	1,0630	1,578	1,93	2,277	>2,277
Percentuais dos elementos oxidados da amostra 2	Na ₂ O	0,83	0,17	0,41	0,59	0,50	0,45	0,26
	MgO	1,65	1,57	2,27	2,53	1,96	2,52	3,06
	Al ₂ O ₃	24,08	21,78	21,62	17,81	20,92	16,77	17,04
	SiO ₂	49,34	49,08	47,71	45,28	45,94	39,49	50,50
	P ₂ O ₅	1,26	1,07	2,30	2,56	2,15	3,11	3,13
	SO ₃	0,77	1,38	2,44	3,42	2,25	3,90	3,42
	Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,42	0,00
	K ₂ O	3,90	4,80	5,86	7,98	7,10	10,59	7,96
	CaO	2,19	2,61	4,08	5,14	3,69	4,70	3,07
	Ti ₂ O ₃	2,13	2,11	1,66	2,11	1,68	2,72	1,68
	MnO ₂	0,34	0,49	0,35	0,52	0,33	0,52	0,39
	FeO	13,53	14,93	11,27	12,04	13,27	14,87	9,38
	BaO	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,23	0,12

Para uma visualização dos dados apresentados na Tabela 24, construiu-se o gráfico da Figura 78 comparando os percentuais dos óxidos de cada elemento encontrado nas amostras.

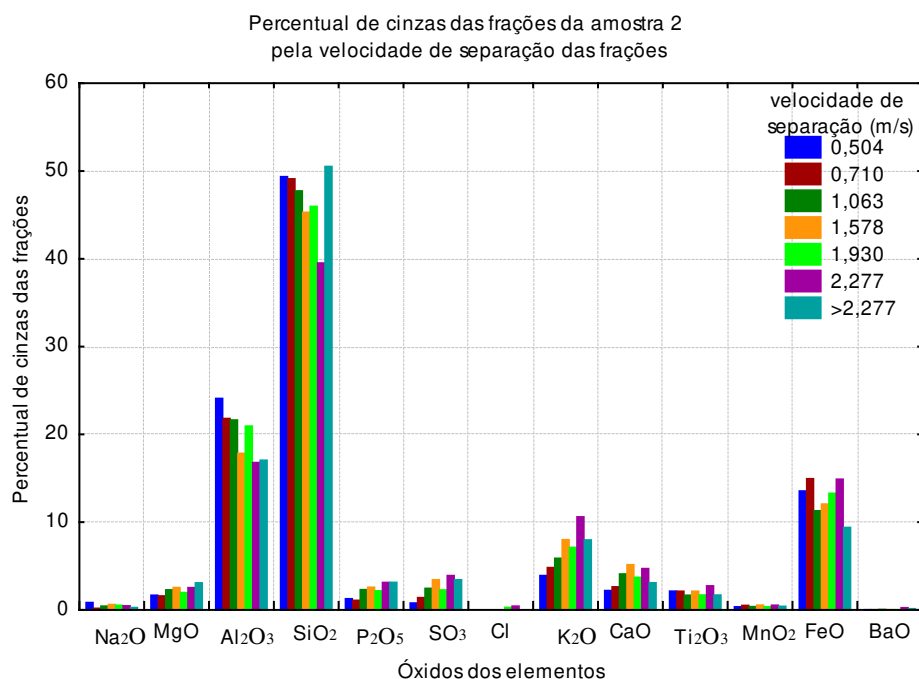


Figura 78. Percentual de cinzas pelos óxidos dos elementos, para cada velocidade de separação

Nota-se que não houve uma variação significativa dos percentuais de cada elemento encontrado com relação às frações das partículas.

Os resultados obtidos nesta análise se aproximam dos apresentados por Jenkins *et al.* (1998) e Turn *et al.* (1997), quando comparados aos apresentados pela literatura especializada, como mostra a Tabela 6. Como já foi dito anteriormente, essa variação pode ocorrer em função da variedade da cana-de-açúcar, do tipo de solo, do índice de insolação e de outros fatores.

A aplicação do TGA em ambiente oxidante nas frações separadas por elutriação e sedimentação, mostrou que a quantidade de cinzas de uma amostra de bagaço de cana se acumula preponderantemente nas partículas de menor granulometria e com coeficiente de arrasto CD maior. Esse percentual corresponde a quase 70% das partículas elutriadas com velocidade até 0,7 m/s, que corresponde a 25% do bagaço, enquanto os outros 75% do contém apenas 30% das cinzas, conforme mostrado na Tabela 25, com dados obtidos através do método tradicional para se determinar o teor de cinza.

Tabela 25. *Massa da amostra, seu percentual e o percentual de cinzas de cada fração.*

Velocidade de separação (m/s)	Massa das frações da amostra 2, em equilíbrio (g)	% da massa amostra 2, em equilíbrio	Massa das cinzas (g)	% Ponderado das cinzas
0,504	9,24	15,36	0,349	37,9
0,701	5,79	9,63	0,282	30,7
1,062	10,91	18,14	0,055	6,0
1,578	13,01	21,63	0,055	6,0
1,93	6,09	10,12	0,063	6,8
2,227	3,37	5,60	0,038	4,1
> 2,227	11,74	19,52	0,078	8,5
total	60,15	100,00	0,920	100,0

4.8. Análise elementar dos voláteis

A análise elementar de um combustível caracteriza sua composição química em termos de seus principais elementos químicos, representados por C, H, O, N e S.

Estas análises foram feitas, conforme o procedimento descrito anteriormente, para cada fração da amostra 2 com umidade estabilizada e se obteve os percentuais médios de cada fração dos componentes estudados, sendo que o oxigênio é calculado pela diferença percentual total dos elementos.

A Tabela 26 foi construída a partir da média de duas medições. O que se nota é uma pequena diminuição do enxofre à medida que a granulometria aumenta, ou ainda quando o coeficiente de arrasto é maior, enquanto as cinzas têm uma diminuição significativa como foi detectado anteriormente.

Nota-se também que existe, nas frações separadas com menor velocidade, uma menor quantidade de carbono, que não foi detectada na análise termogravimétrica.

Os demais componentes estão dentro da conformidade com outros autores citados neste trabalho.

Tabela 26. Percentuais dos elementos que compõem o bagaço de cana nas diferentes velocidades de separação.

Velocidade de separação (m/s)	Elementos analisados					
	%C	%H	%N	%S	CZ	%O
0,504	38,26	5,655	0,51	0,09	21,2	34,285
0,71	38,53	5,755	0,355	0,075	16,7	38,585
1,062	39,375	5,56	0,385	0,1	5,4	49,18
1,578	43,455	5,93	0,415	0,07	4,4	45,73
1,936	44,035	5,645	0,3	0,06	3,9	46,06
2,277	45,015	6,185	0,285	0,045	2,9	45,57
>2,277	44,455	6,18	0,275	0,055	2,8	46,235

Para uma visualização das diferenças percentuais de cada elemento e sua relativização foi construído o gráfico da Figura 79.

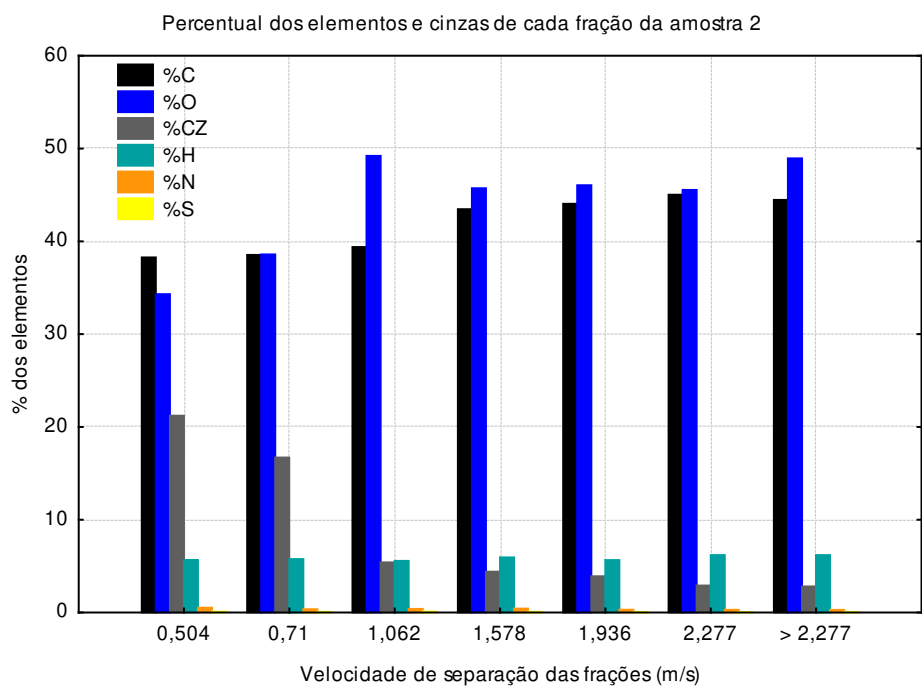


Figura 79. Percentual dos elementos pela velocidade de separação das frações de bagaço de cana da amostra 2 com umidade de equilíbrio.

A Tabela 27 mostra a análise elementar isenta de cinzas. E para melhor visualização destas informações foi construído o gráfico da Figura 80.

Tabela 27. *Percentuais dos elementos que compõem o bagaço de cana, isento de cinzas, nas diferentes velocidades de separação.*

Velocidade de separação (m/s)	Elementos analisados				
	%C	%H	%N	%S	%O
0,504	38,26	5,655	0,51	0,09	55,485
0,71	38,53	5,755	0,355	0,075	55,285
1,062	39,375	5,56	0,385	0,1	54,58
1,578	43,455	5,93	0,415	0,07	50,13
1,936	44,035	5,645	0,3	0,06	49,96
2,277	45,015	6,185	0,285	0,045	48,47
> 2,277	44,455	6,18	0,275	0,055	49,035

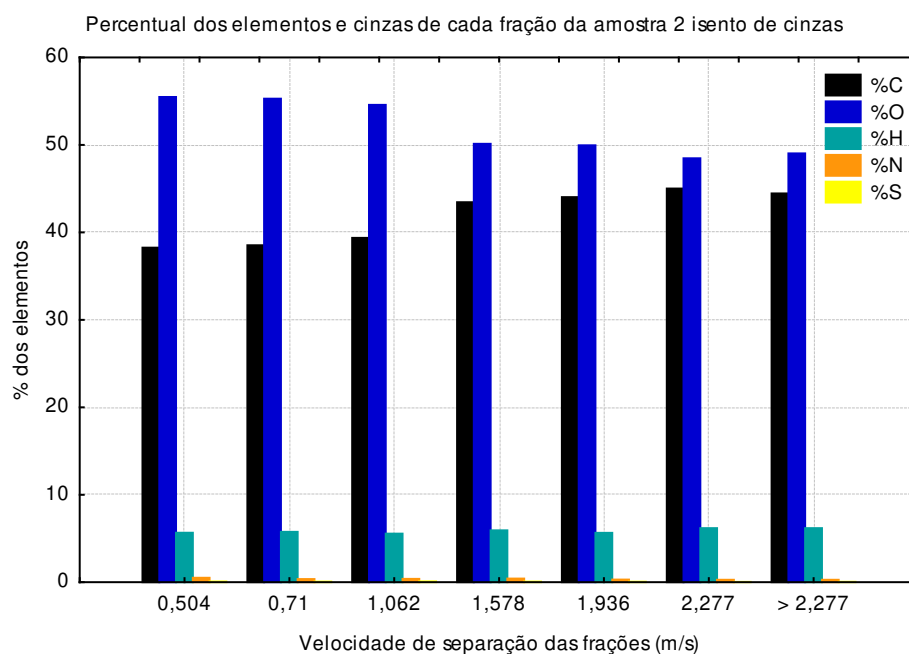


Figura 80. *Percentual dos elementos isentos de cinzas pela velocidade de separação das frações de bagaço de cana da amostra 2 com umidade de equilíbrio.*

5. Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

5.1. Conclusões

Neste trabalho, com o intuito de compreender as características do bagaço de cana-de-açúcar, estudou-se a separação das partículas do bagaço através da elutriação e sedimentação, utilizando o conceito de fluidodinâmica da partícula, e suas consequências na caracterização deste insumo como combustível para a produção energética.

Podemos elencar como conclusões obtidas neste trabalho, embasadas nos resultados descritos no capítulo 4:

1. A utilização dos fenômenos de elutriação e sedimentação mostrou-se eficaz para a separação granulométrica e morfológica do bagaço de cana, obtendo-se frações separadas com homogeneidade de dimensão e formato em cada fração obtida. Este método mostrou-se mais adequado que o tradicional método de separação por peneiras. O equipamento desenvolvido em escala de laboratório mostrou-se adequado e flexível, permitindo-se obter boa separação em diversas velocidades de elutriação e sedimentação, e com potencial de aplicação a diversos outros materiais com granulometria e formatos não homogêneos.
2. Para o dimensionamento e contagem das partículas, a utilização do método de medição através de fotografia, aplicando um software para tratamento fotográfico, além de fácil implementação mostrou-se de baixo custo e adequado, substituindo a caracterização dimensional por peneiramento, obtendo-se parâmetros indispensáveis para o conhecimento da fluidodinâmica das partículas de bagaço, tais como a área projetada da partícula, o comprimento maior e o comprimento menor.

3. Foi obtido um conjunto de dados representativo da distribuição das características fluidodinâmicas do bagaço de cana, composto pelo coeficiente de arrasto, pela densidade e pela área projetada e que dispensam o uso do fator de correção ϕ (esfericidade) para a determinação correta do balanço de forças dinâmicas no escoamento bifásico bagaço e ar (ou gases).
4. A correlação de Chien (1994), e que utiliza o fator de correção ϕ (esfericidade) foi a que melhor se aproximou dos resultados experimentais obtidos.
5. Através das ampliações fotográficas das partículas pode-se notar a formação de pequenas partículas junto às maiores, mesmo depois do processo de separação. Estas descamações aparecem apenas nas fibras, não tendo sido observadas na medula, mesmo quando sua imagem foi ampliada em 200 vezes.
6. A análise detalhada de cada fração de bagaço obtida por elutriação mostrou pouca variabilidade na análise elementar e na análise termogravimétrica da biomassa isenta de cinzas. Por outro lado, apresentou significativa variação da densidade aparente da partícula em função da velocidade de separação, sendo da ordem de 420 kg/m^3 nas parcelas de maior ($>2,2 \text{ m/s}$) e menor velocidade de separação ($<0,55 \text{ m/s}$) e da ordem de 250 kg/m^3 na parcela separada com velocidade intermediária ($1,56 \text{ m/s}$).
7. Nas frações separadas por elutriação e sedimentação, observou-se que a quantidade de cinzas de uma amostra de bagaço de cana se acumula preponderantemente nas partículas de menor granulometria e com coeficiente de arrasto C_D maior. Por volta de 70% das cinzas do bagaço de cana estão contidas nas partículas com velocidade de elutriação menor que $0,7 \text{ m/s}$, sendo que esta parcela corresponde a cerca de 25% da massa de bagaço de cana. Os outros 75% restantes do bagaço de cana, que correspondem à velocidades de elutriação maiores que $0,7 \text{ m/s}$, contém apenas 30% do total de cinzas encontradas no conjunto total das partículas de bagaço de cana.

8. A análise da biomassa seca e livre de cinzas apresentou ligeira variabilidade dos teores de N e S. A concentração destes é maior nas partículas de menor velocidade de elutriação e reduz-se à metade nas partículas maiores, apresentando mesmo comportamento qualitativo que o teor de cinzas, indicando que o maior teor de cinzas presente nas parcelas de menor granulometria do bagaço de cana não se deve exclusivamente ao arraste de solo durante a colheita da cana.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos estudos realizados neste trabalho sugerimos os seguintes trabalhos futuros:

1. Repetir este estudo para outras biomassas buscando a caracterização de cada uma delas, objetivando seu uso como energia.
2. Aperfeiçoar o método de medição das partículas através de imagem, utilizando outros softwares mais modernos.
3. Estudo comparativo da separação fluidodinâmica e de processos tradicionais de separação, como por exemplo, o peneiramento.
4. Fazer uso da elutriação e sedimentação em partículas regulares para determinação do coeficiente de arrasto e proceder a comparação deste coeficiente para partículas esféricas e não esféricas.

Bibliografia

- AIDUN, A. R. **Free settling of fibres in fluids**, Ph.D Thesis, Faculty of Chemical Engineering, Syracuse University, New York, 1956.
- ALARCON, G. A. R. *et al.* Caracterización del bagazo de la caña de azúcar. In: 6º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Unicamp. **Anais do....** Campinas: Agrener, 2006.
- ALVES, S. S. e FIGUEIREDO, J. L.. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials by multistage isothermal thermogravimetry. **Journal of Analitical and Applied Pyrolysis**, p. 123-134. 1988.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 871-82: Standard method for moisture analysis of particulate wood fuels**. United States, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E873-82: Standard test method for bulk density of densified particulate biomass fuels**. United States, 2006.
- BARBOSA, R. D.. **Secagem de bagaço de cana em sistema pneumático**. 1992. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Alimentos, Unicamp, Campinas, 1992.
- BAXES, G. A.. **Digital Image Processing: Principles and Applications**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 480 p.
- BERNAR, P.. **Polpação acetosolv de bagaço de cana e madeira e eucalipto**. 1992. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química, Unicamp, Campinas, 1992.
- BECKER, H. A. **Effects of shape and Reynolds Number on drag in the motion of freelyoriented body in an infinite fluid**, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Abril, 1959.
- BOOG, E. *et al.* Energetic potential of sugarcane residue. In: WORKSHOP INTERNACIONAL BRASIL-JAPÃO, 3., 2005, Campinas. **Anais do....** Campinas: Unicamp, 2005.
- CAMARGO, C. A. *et al.* **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 1992. 796 p.

- CARDERO, T. *et al.* Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. **Fuel**, v. 80, p.1567-1571, oct. 2001.
- CASTRO, P. R. C e KLUGE, R. A.. **Ecofisiologia de culturas extrativas**: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138 p.
- CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P.. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. **Fuel**. v.81, p.1051-1063, may. 2002.
- CHHABRA, R. P.. **Bubbles, drops and particles in non-newtonian fluids**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007. 721 p.
- CHIEN, S.-F.. Settling velocity of irregularly shaped particles. **SPE Drilling & Completion**, n.9, p.281-289, dec. 1994.
- CLIFT, R. J. *et al.* **Bubbles, drops and particles**. New York: Academic Press, 1978. 380 p.
- CORTEZ, L. A. B. *et al.* **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.
- De FILIPPIS, P. *et al.* Gasification Process of Cuban Bagasse in Two-Stage Reactor. **Biomass and Bioenergy**. v. 27, p.247-252, sep. 2004.
- DEMIRBAS, A.. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel**. v.76, p.431-434, apr. 1997.
- DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Machado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade (Ed.). **Cana de Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 882 p.
- ERGUN, S.. Determination of particle density of crushed porous solids. *Analytical Chemistry*, v. **23**, p.151-156, jan. 1951.
- ERGUN, S.. Determination of geometric surface area of crushed porous solids. *Analytical Chemistry*, v. **24**, p., 388-393, feb. 1952.
- FERNANDES, A. C. **Cálculo na agroindústria de cana-de-açúcar**. 2. ed. Piracicaba: STAB (Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil), 2003. 240 p.
- FERNANDES, A. J.. **Manual da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocetes, 1984. 196 p.
- FOUST, A. *et al.* **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.
- GABRA, M. *et al.* Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue - Part 1: Gasification of bagasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 21, p. 351-369, nov. 2001.

GABRA, M. *et al.* Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue - Part 2: Gasification of cane trash. **Biomass and Bioenergy**, v. 21 p. 371-380, nov. 2001.

GANSER, G. H.. A rational approach to drag prediction of spherical and non-spherical particles. **Powder Technology**, v. 77, p. 143-152, nov. 1993.

GARCÌA-PÈREZ, M. *et al.* Co-Pyrolysis of sugarcane bagasse whit petroleum residue - Part I: Thermogravimetric analysis. **Fuel**, v. 80, 1245-1258, jul. 2001.

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O.. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. **Powder Technology**, vol. 58, pp. 63-70, may. 1989.

HUGOT, E.. **Handbook of cane sugar engineering**. 3. ed. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc., 1986.

IPT. **Apostilas do curso de Combustão Industrial**. São Paulo, 2007.

JENKINS, B. M. *et al.* Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**. v.54 p.17-46, mar.1998.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O.. **Fluidization engineering**. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p.

MANYÀ, J.J.; ARAUZO, J.. An alternative kinetic approach to describe the isothermal pyrolysis of micro-particles of sugar cane bagasse. **Chemical Engineering Journal**, v. 139, p.549-561, jun. 2008.

MEIRELLES, A. J. A.. **Secagem de bagaço de cana em leito fluidizado**. 1984. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Alimentos, Unicamp, Campinas, 1984.

MILES, T. R. *et. al.* Boiler deposits from firing biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, n. 2-3, p.125-138, 1996.

MOHSENIN, N. N.. **Physical properties of plant and animal materials**: structure, physical characteristics and mechanical properties. 2. ed. New York: Gordon and Breach, Science Publishers Inc., 1986.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 681 p.

MORGAN, R. *et al.* Wet bulk storage of bagasse. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGY, 15., 1974, Durban. **Proceedings....** Durban: Hayne & Gibson, 1974. p.1793-1820.

- MURRY, C. R.. The pressure required to feed cane mill. Part 1: Theoretical considerations. **Sugar Journal**, v.62, p.346-349, 1960.
- NASSAR, M. M.; ASHOR, E. A.; WAHID, S. S.. Thermal characteristics of bagasse. **Journal of Applied Polymer Science**, v.61, p.885-890, oct. 1996.
- NEBRA, S. A. **Secagem pneumática de bagaço de cana**. 1985. 121 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Unicamp, 1985.
- NEBRA, S. A.; MACEDO, I. C.. Bagasse particle shape and size and their free-settling velocity. *International Sugar Journal*. v.90, n.1077, p.168-170, 1988.
- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K.. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v.84, p.487-494, mar. 2005.
- PAYNE, J. H.. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel, 1989. 245 p.
- PERMCHART, W.; KOUPRIANOV, V. I.. Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels. **Bioresource Technology**, v. 92, p.83-91, mar. 2004.
- PURCHASE, B. S.. Products from sugar cane. **International Sugar Journal**. v.97, n.1154, p.70-72, p.77-81, 1995.
- RASUL, M. G.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M.. Physical properties of bagasse. **Fuel**, v.78, p.905-910, jun. 1999.
- RASUL, M.G.; RUDOLPH, V.. Fluidized bed combustion of Australian bagasse. **Fuel**, v.79, p.123-130, jan. 2000.
- REED, T.. **Handbook of biomass gasifier engine systems**. 2.ed. Colorado: The Biomass Energy Foundation, 1988.
- REIN, P.. **Cane sugar engineering**. Berlim: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. 768 p.
- RESENDE, F. L. P. **Comparação entre as técnicas de análise termogravimétrica e leito fluidizado para pirólise de biomassa**. 2003. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Unicamp, 2003.
- Revista Alcoolbras**. Piracicaba: Esalq/USP, n. 111, 2007. Disponível em: <http://www.editoravalete.com.br/site_alcoolbras/edicoes/ed_111/mc_1.html>. Acesso em: 01 ago. 2008.

SECRETARIA DE PRODUÇÃO E AGROENERGIA. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (Ed.). **Balanco da cana-de-açúcar e agro energia**. Brasília: Mapa /SPAEE, 2007. 139 p.

SOSA-ARNAO, J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço: estudo do sistema de recuperação de energia**. 2007. 224 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Unicamp, 2007.

STOKES, G. G.. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. In: CAMBRIDGE PHILOSOPHICAL SOCIETY. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**. v.9, Part II, p.8-106. Cambridge: University Press, 1851.

TILLMAN, D. A.. **The combustion of solid fuels and wastes**. California: Academic Press, 1991. 378 p.

TRAN-CONG, S. *et al.* Drag coefficients of irregularly shaped particles. **Powder Technology**, n.139, p.21-32, jan. 2004.

TRINA, O. *et al.* **Atlas of sugar cane bagasse**. Cuba: Group of Latin American and Caribbean Sugar Exporting Countries (GEPLACEA), 1990. 146 p.

TURN, S. Q.; KINOSHITA C. M.; ISHIMURA, D. M.. Removal of inorganic constituents of biomass feedstocks by mechanical dewatering and leaching. **Biomass and Bioenergy**, v.12, p.241-252, 1997.

TURTON, R.; LEVENSPIEL, O.. A short note on the drag correlation for spheres. **Powder Technology**, n.47, p.83-86, mar. 1986.

UNICA. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/multimedia>>. Acesso em: 01 ago. 2008.

UNI-SYSTEMS. Disponível em: <<http://www.unisystems.com>>. Acesso em: 01 ago. 2008.

USHIMA, A. H.. Combustão de sólidos. In: IPT. **Apostilas do Curso de Combustão Industrial**. São Paulo, 2007.

Van Der POEL, P. W.; SCHIWECK, H.; SCHWARTZ, T.. **Sugar technology - Beet and cane sugar manufacture**. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens, 1998. 1120 p.

WADELL, H.. Sphericity and roundness of rock particles. **The Journal of Geology**. v.41, n.3, p.310-331, apr./may 1933.

YANG, Wen-Ching (ed.). **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. New York: CRC Press, 2004. 874 p.

Anexo I

Aplicativo desenvolvido no EES

Aplicativo desenvolvido no software EES (Engineering Equations Solver) e utilizado neste trabalho para determinar o coeficiente de arrasto, C_D , das partículas do bagaço de cana-de-açúcar.

"Cálculo para determinar o diâmetro de esfera das partículas do bagaço de cana"

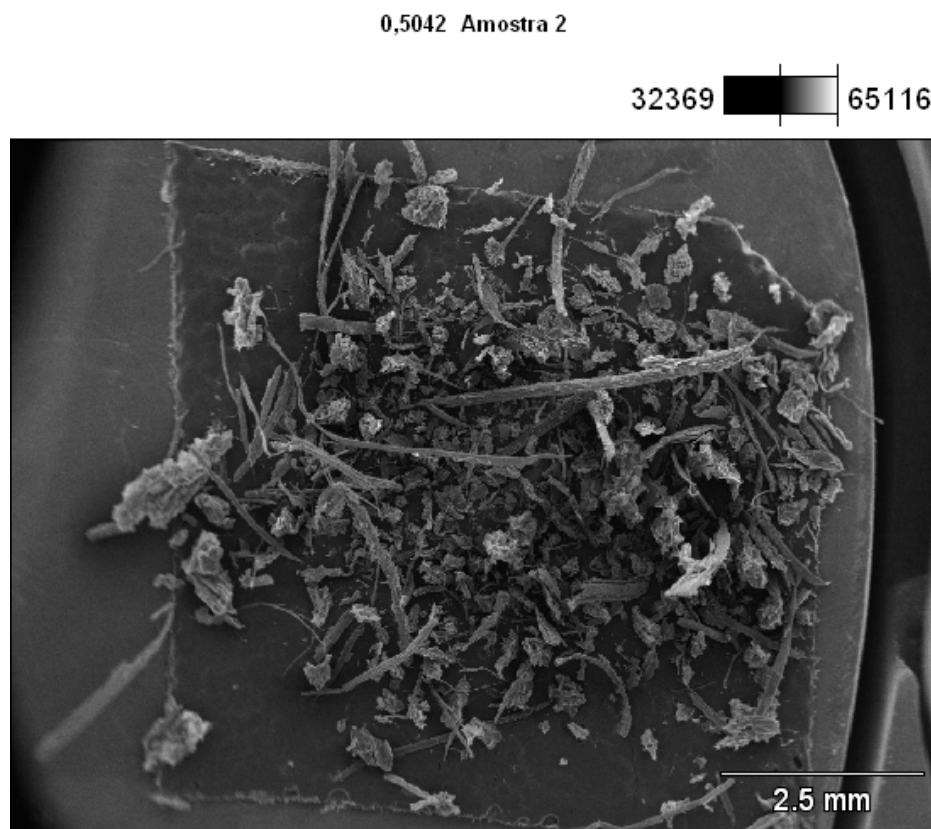
"Para se determinar o coeficiente de arrasto, C_D é necessário o conhecimento do número de Reynolds Re "

$Re_p = (w_s * D_f * \rho_f) / \mu_f$	"número de Reynolds causado pela partícula"
$Re_{es} = (\rho_f * w_s * d_{elu}) / \mu_f$	"número de Reynolds causado pelo escoamento"
$T_1 = 25$	"temperatura do fluido, no caso, o ar"
$P_1 = 101,3$	"pressão"
$g = 9,8$	"aceleração da gravidade"
$\mu_f = \text{Viscosity}(\text{Air}; T=T_1)$	"viscosidade do fluido"
$\rho_f = \text{Density}(\text{Air}; T=T_1; P=P_1)$	"densidade do ar na pressão e temperatura"
$d_{elu} = 0,1 \text{ [m]}$	"diâmetro do meu elutriador"
$A_{tub} = \pi/4 * d_{elu}^2$	"área do tubo do elutriador"
$\{V_{dot_elu} = 0,00558 \text{ [m}^3/\text{s}\}$	"vazão de fluido que passa no tubo do elutriador"
$w_s = V_{dot_elu} / A_{tub}$	"velocidade do fluido"
$\{A_p = 1,86E-6 \text{ [m}^2\}$	"área projetada da partícula"
$\{\phi = 0,94\}$	"esfericidade medida"
$\{D_f = 1,26E-3\}$	"diâmetro de círculo da partícula"
$C_{D_HeiderLevenspiel} = (24/Re_p) * ((1 + (8,1716 * \exp(-4,0655 * \phi))) * (Re_p^{(0,0964 + (0,5568 * \phi))}) + ((73,69 * (\exp(-5,0748 * \phi)) * Re_p))) / (Re_p + 5,378 * \exp(6,2122 * \phi))$	
$C_{D_Clif} = (24/Re_p) * (1 + Re_p^{0,867}) + (0,42 / (1 + 4,25E4 * Re_p^{(-1,16)}))$	
$C_{D_Chien} = (30/Re_p) + (67,000 * (\exp(-5,03 * \phi)))$	
$C_{D_Stokes} = (3/4 * D_f * (\rho_p - \rho_f) * g) / (\rho_f * w_s^2)$	
$1/k_1 = (0,33 + 0,67 * (\phi)^{-0,5})$	
$\log_{10}(K_2) = 1,815 * (-\log_{10}(\phi))^{0,574}$	
$C_{D_Ganser} = (24 / (k_1 * Re_p)) * (1 + 0,11188 * (k_2 * (k_1 * Re_p))^{0,675}) + (0,4305 * k_2) / (1 + ((3305 / (k_2 * (k_1 * Re_p))))$	
$C_{D_Goo} = (2 * (\rho_p - \rho_f) * g * V_p) / (\rho_f * w_s^2 * A_p)$	"CD experimental"
$\{\rho_p = 375,95 \text{ [kg/m}^3\}$	"densidade medida da partícula"
$\{V_p = 4,55E-10 \text{ [m}^3\}$	"volume da partícula em m ³ "
$A_r = (g * L^3 * \rho_f * (\rho_p - \rho_f)) / \mu_f^2$	"número de Arquimedes"
$L = 0,00768 \text{ [m]}$	"comprimento da partícula"

Anexo II

Fotografias relativas à morfologia do bagaço de cana

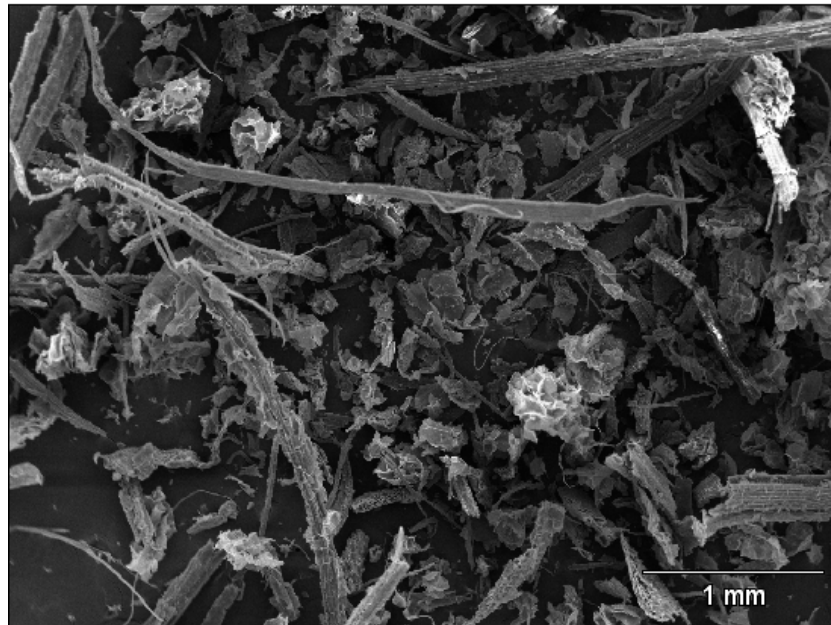
Imagens obtidas através do equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), modelo JEOL JXA-840 A.



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 10

0,5042 Amostra 2(1)

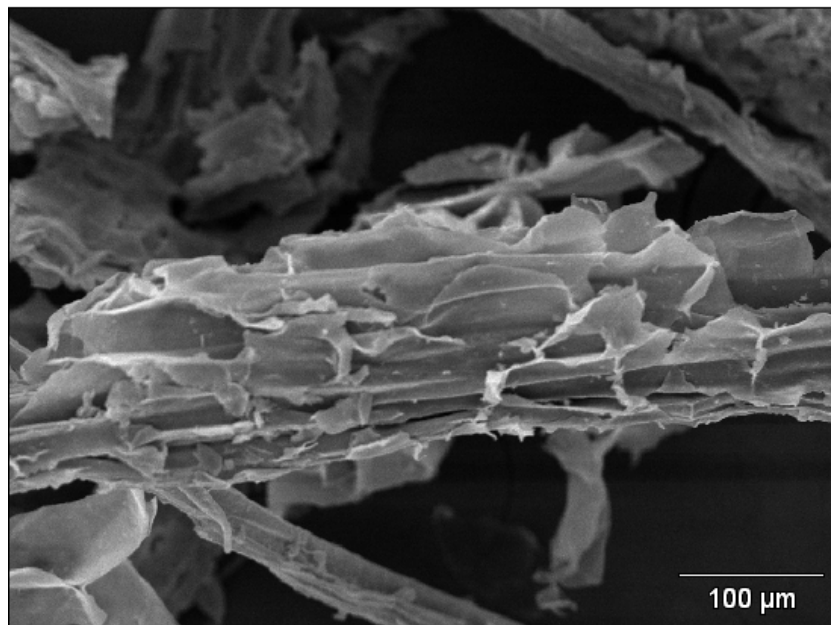
32668 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 25

0,5042 Amostra 2(2)

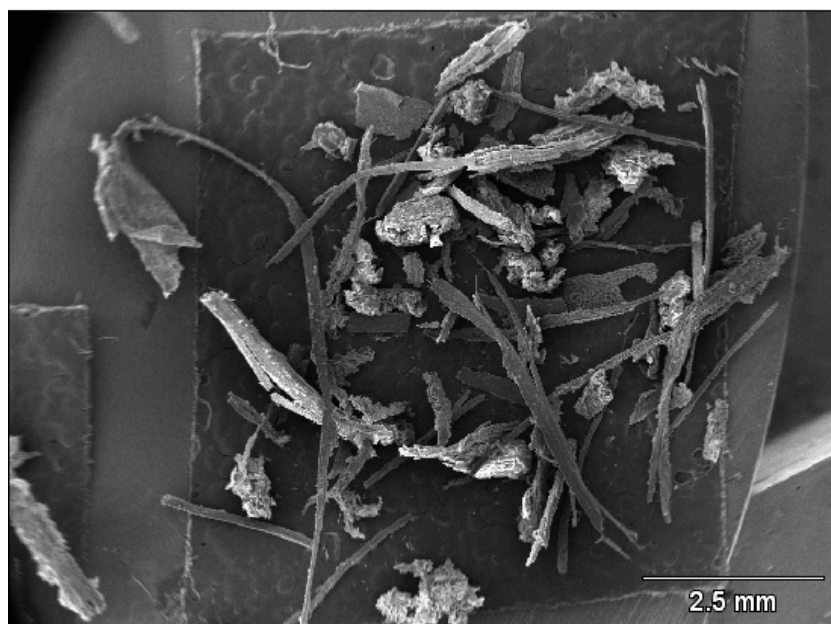
33075 65216



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 200

07105 Amostra 2

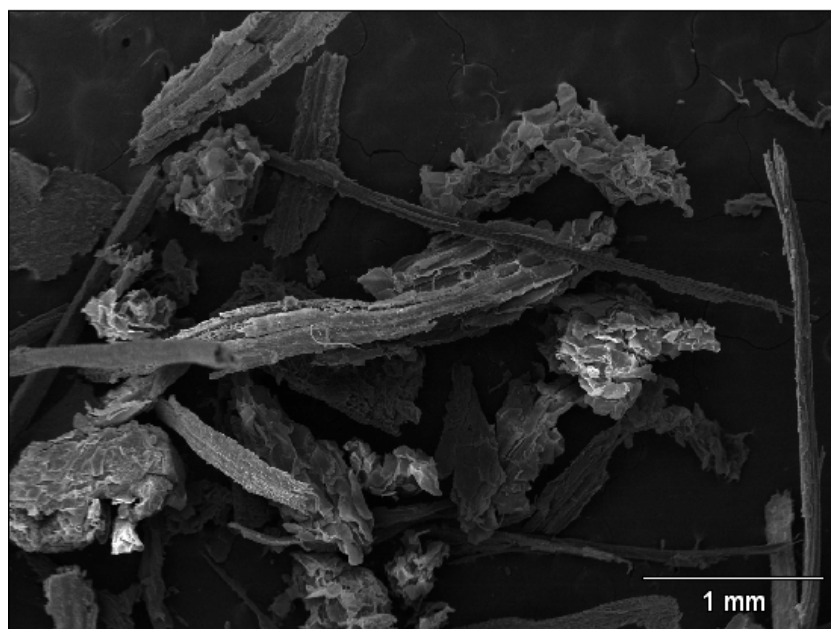
26569 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 10

07105 Amostra 2(1)

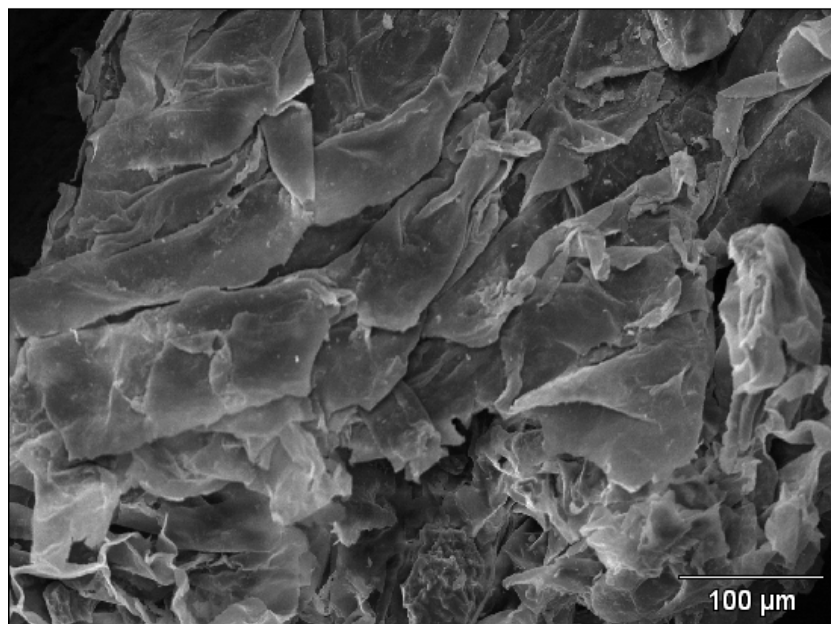
32300 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 25

07105 Amostra 2(2)

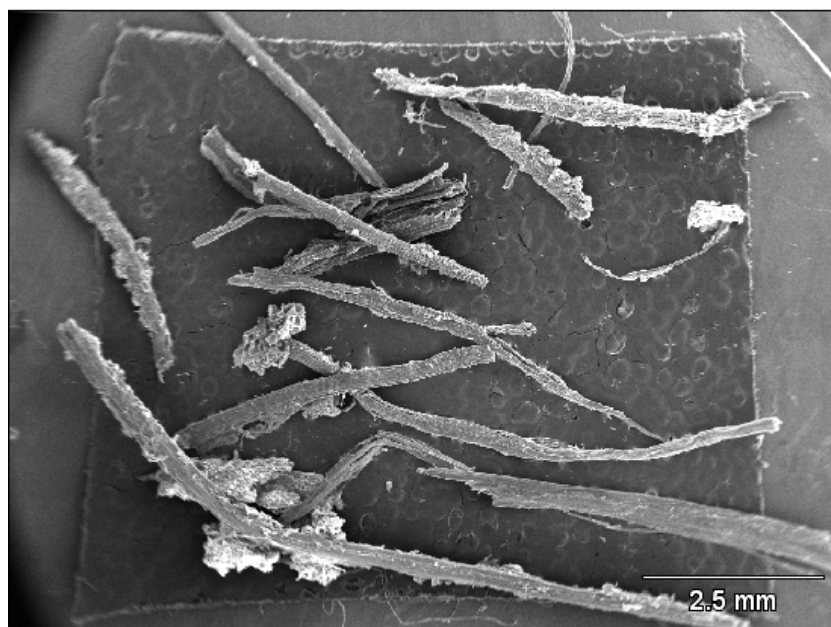
32590 60143



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 200

1,062 Amostra 2

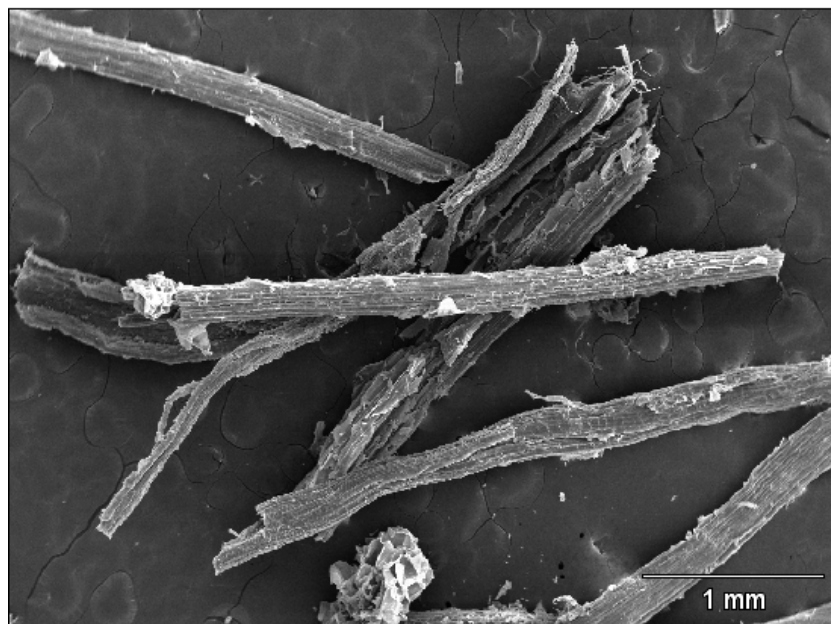
26572 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 10

1,062 Amostra 2(1)

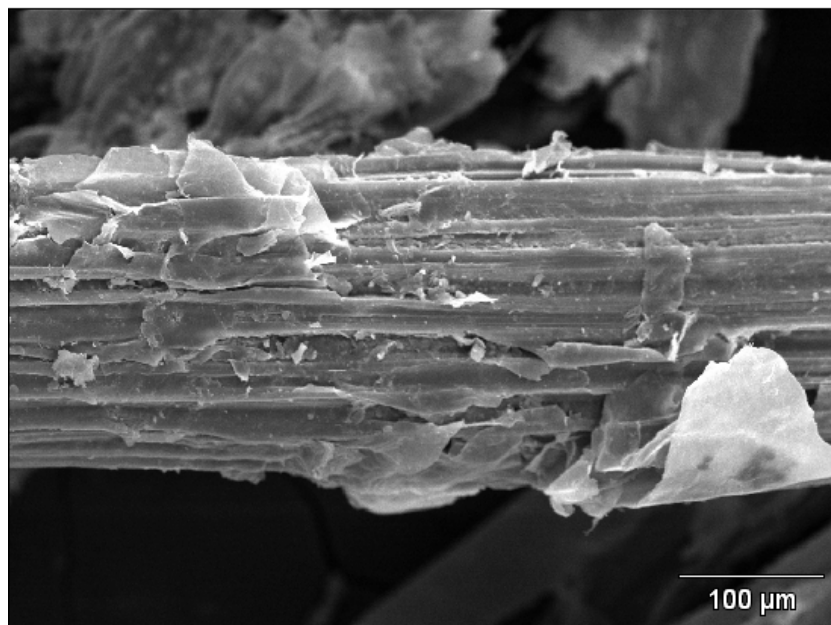
27012 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 25

1,062 Amostra 2(2)

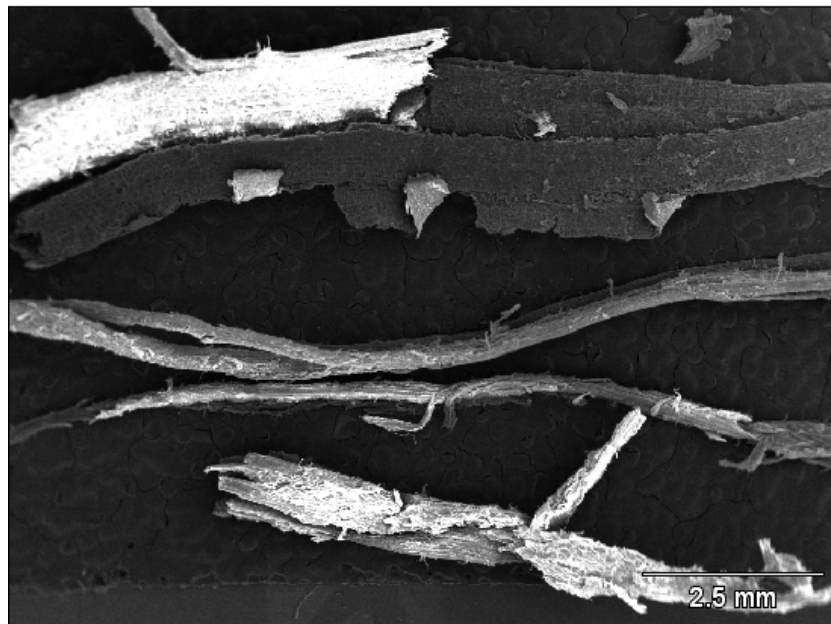
27443 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 200

1,578 Amostra 2

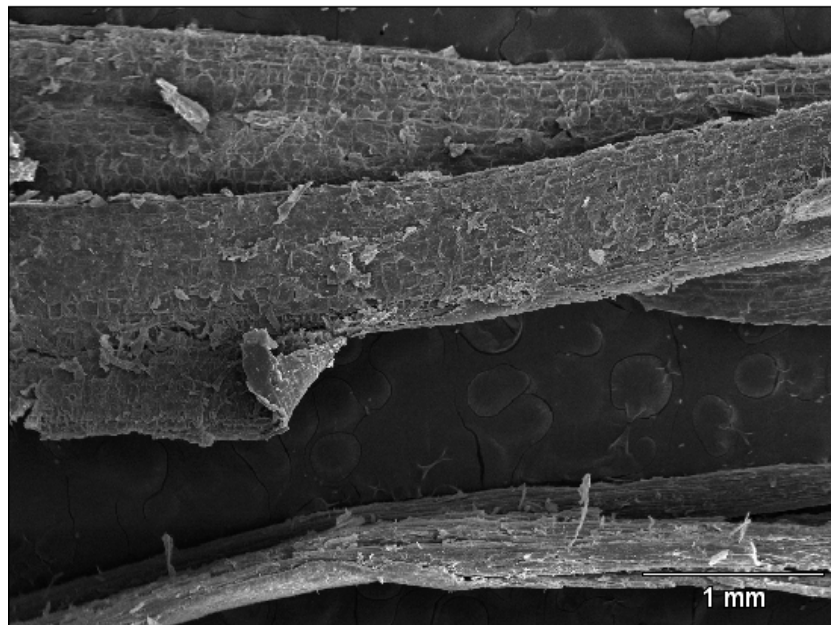
32963 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 10

1,578 Amostra 2(1)

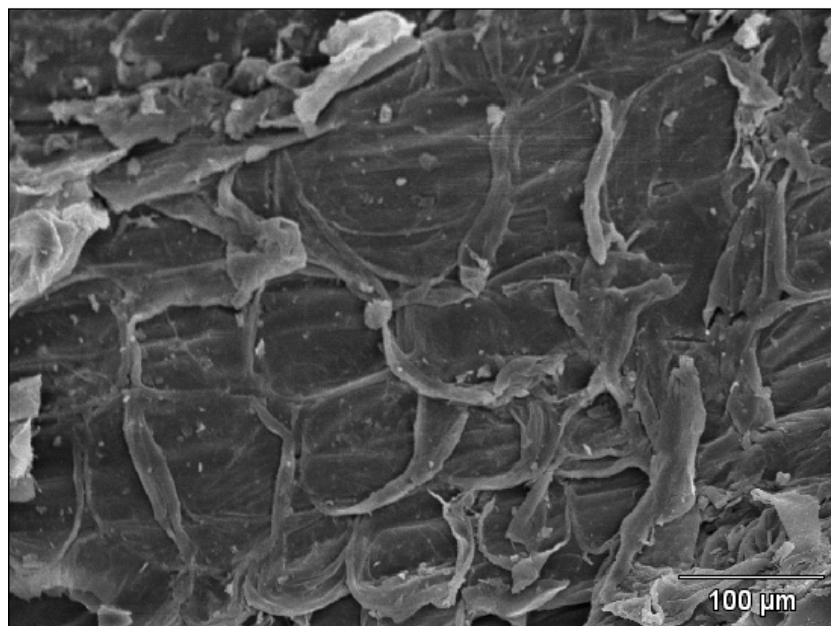
33730 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 25

1,578 Amostra 2(2)

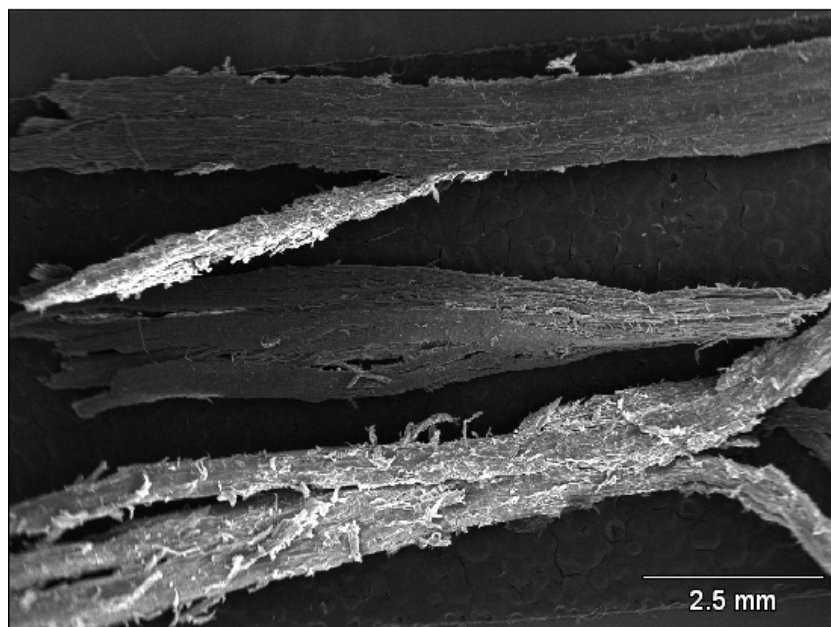
34412 54647



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 200

1,93 Amostra 2

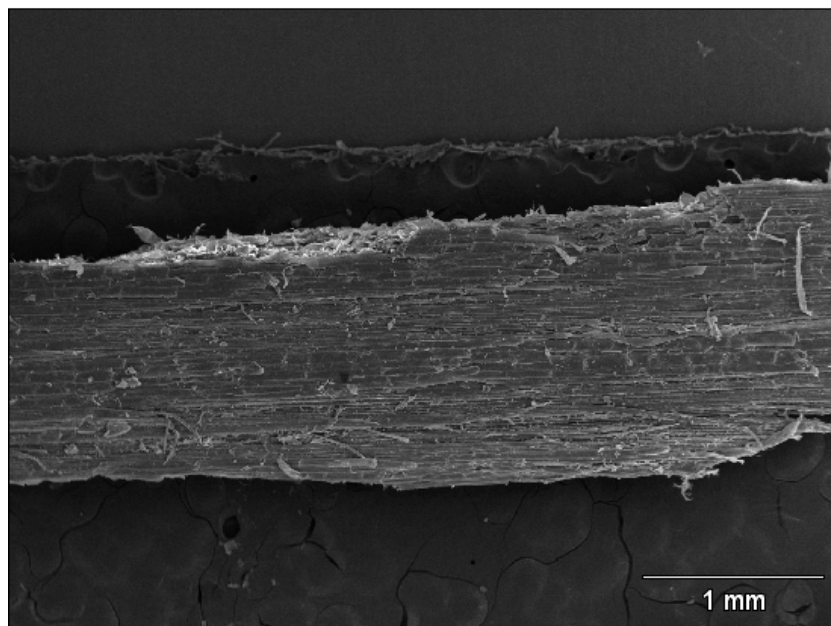
33541 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 10

1,93 Amostra 2(1)

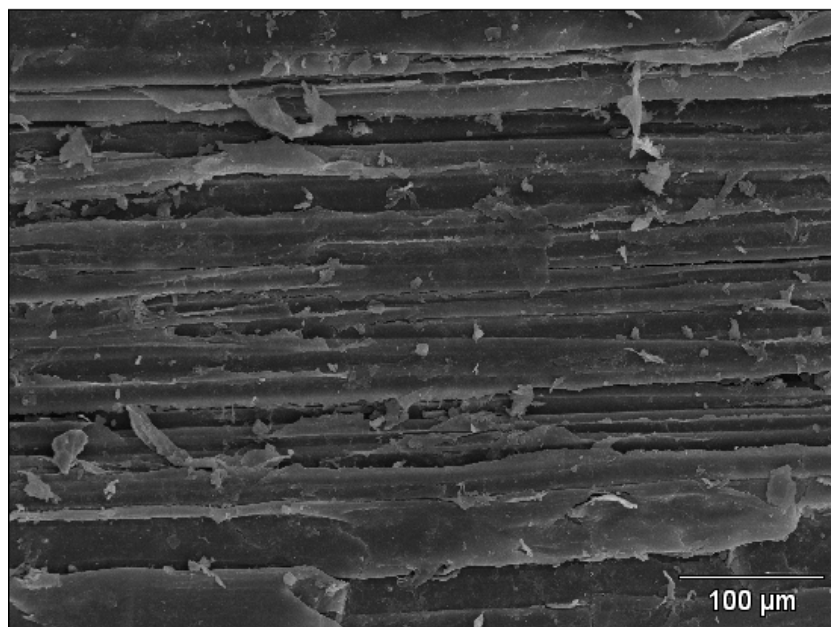
33675 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 25

1,93 Amostra 2(2)

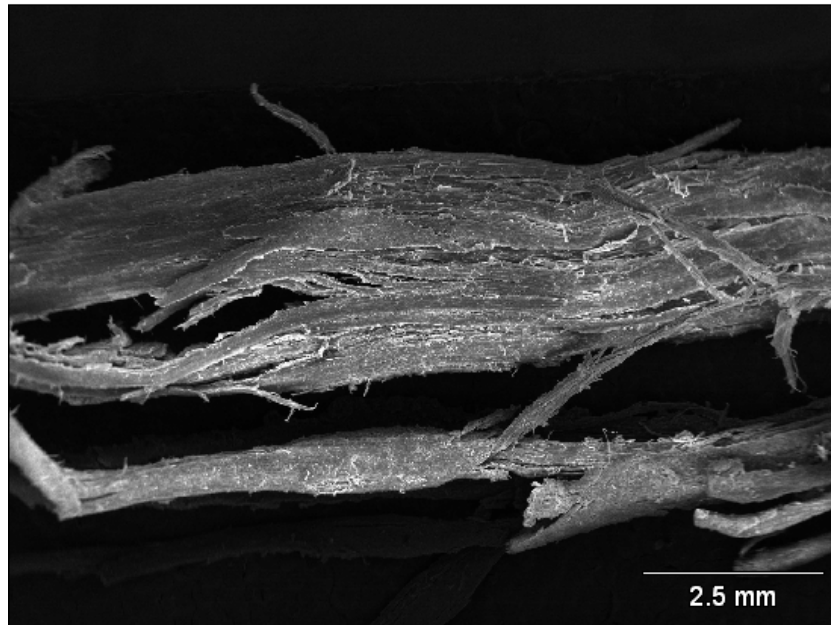
34019 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 200

=2,227 Amostra 2

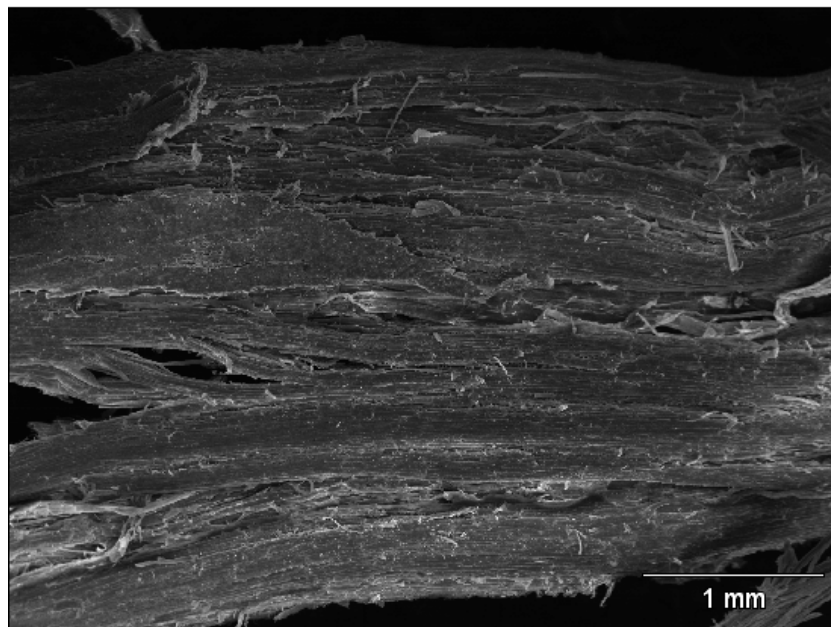
33551 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 10

=2,227 Amostra 2(1)

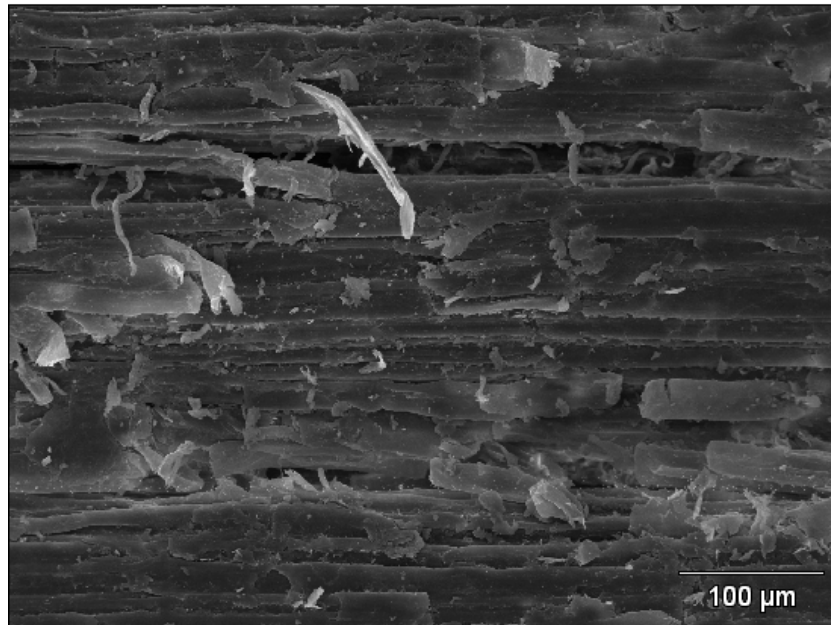
33403 64216



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 25

=2,227 Amostra 2(2)

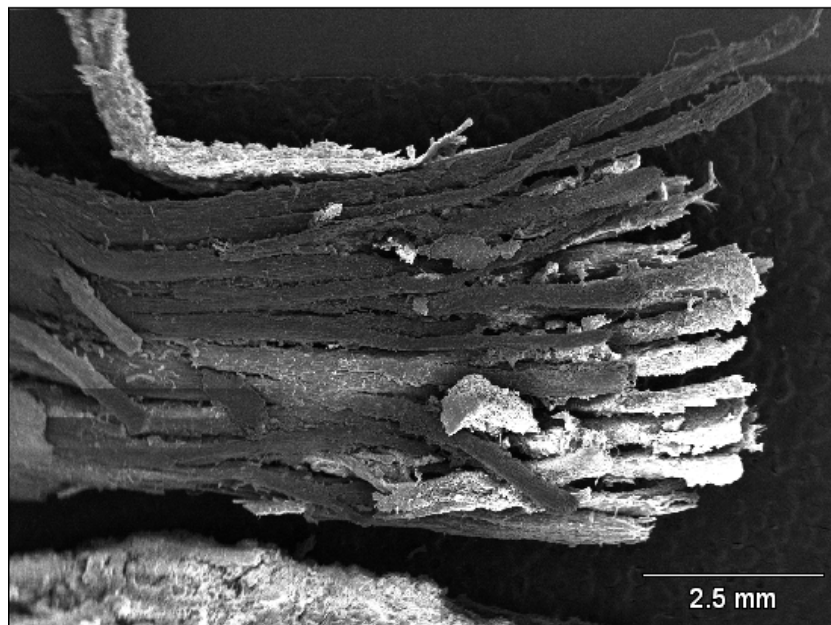
33601 58356



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 200

maior 2,227 Amostra 2

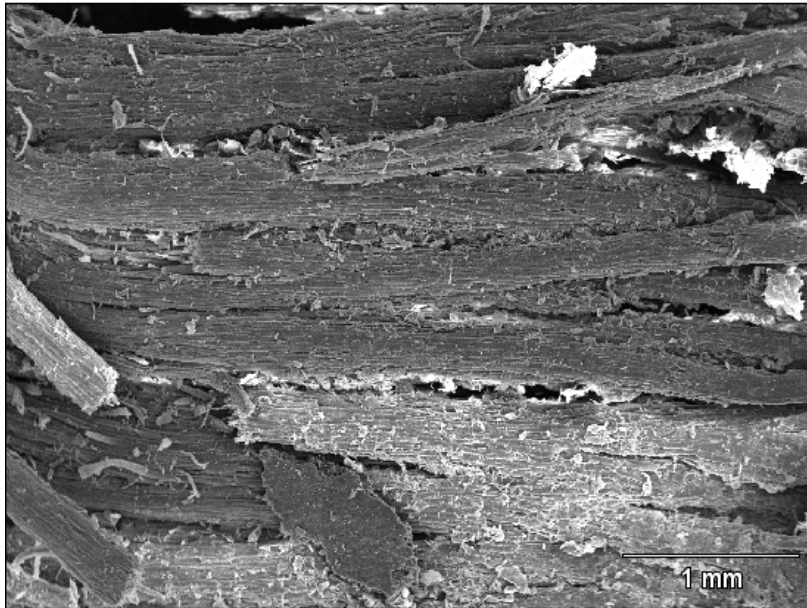
33713 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 10

maior 2,227 Amostra 2(1)

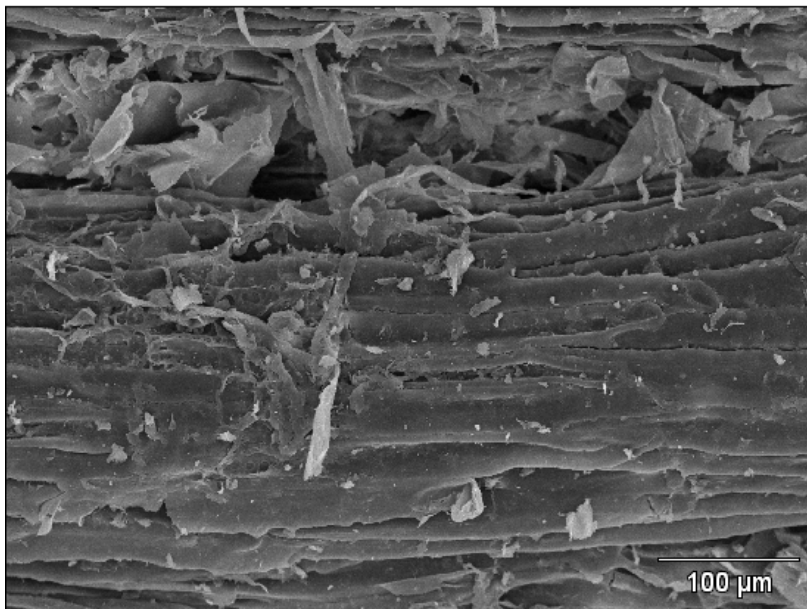
33894 65535



Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 25

maior 2,227 Amostra 2(2)

34234 53790

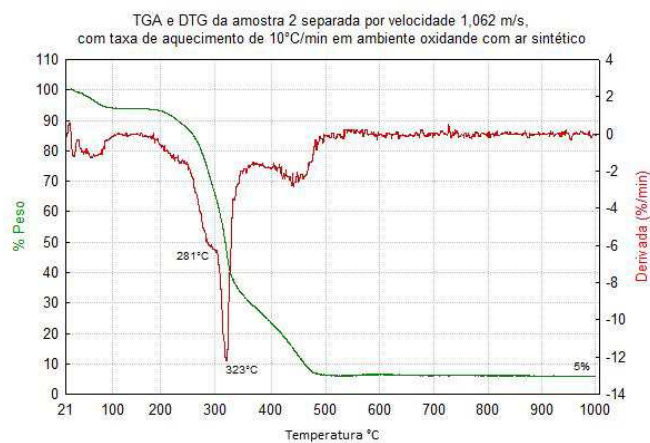
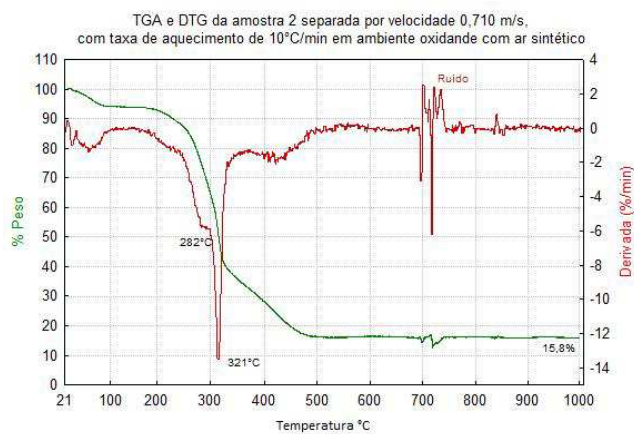
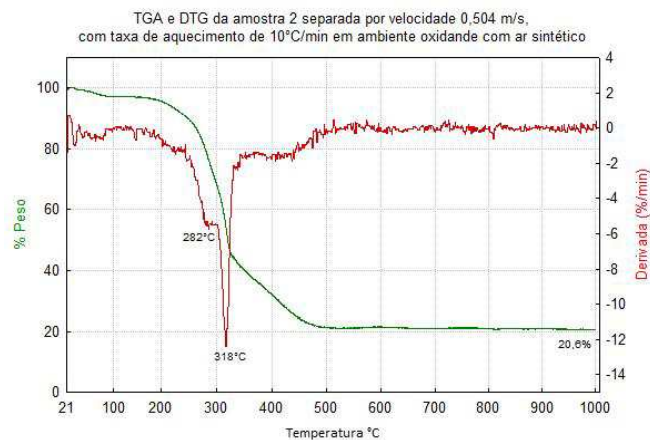


Accelerating Voltage: 25.0 kV Magnification: 200

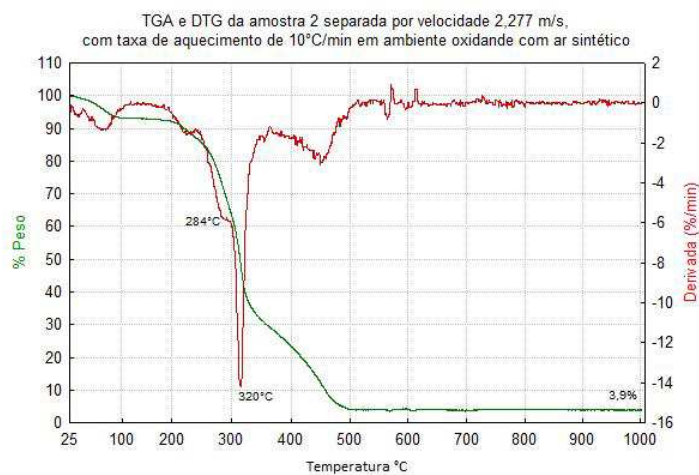
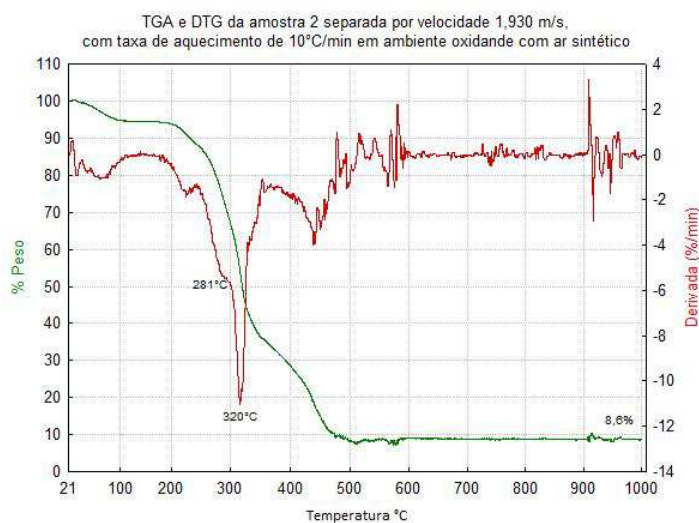
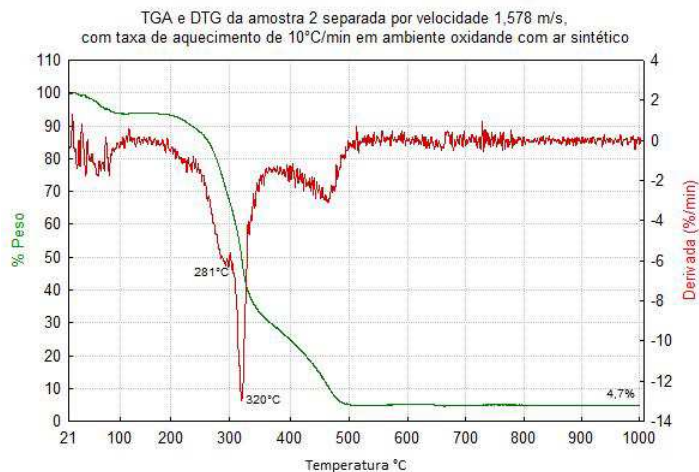
Anexo III

Gráficos da TGA e da DTG

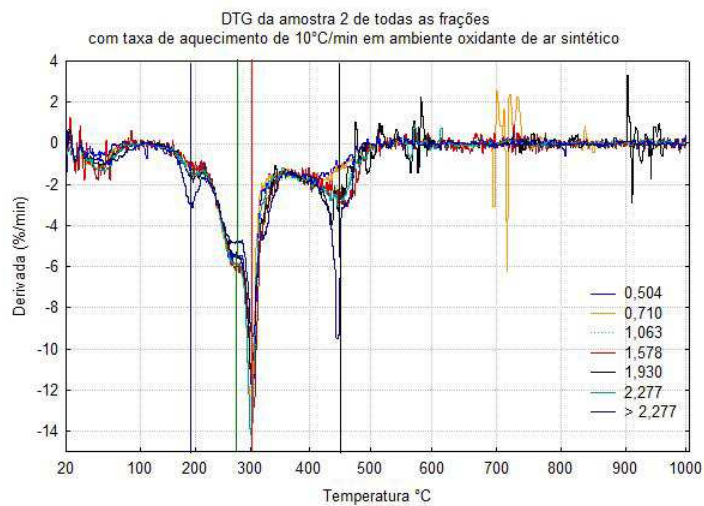
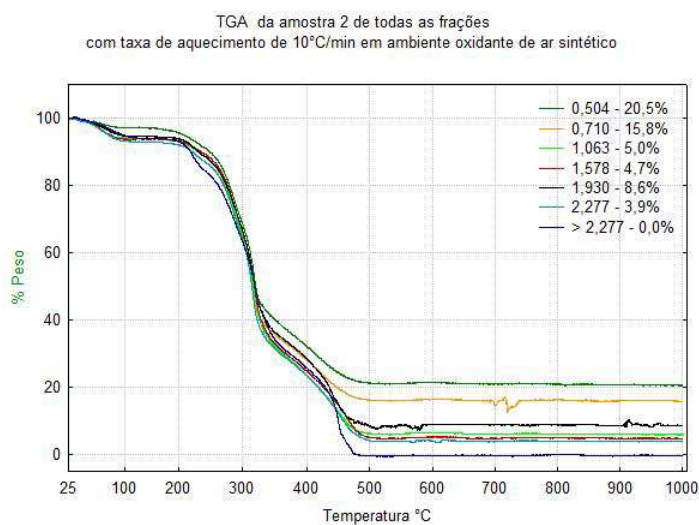
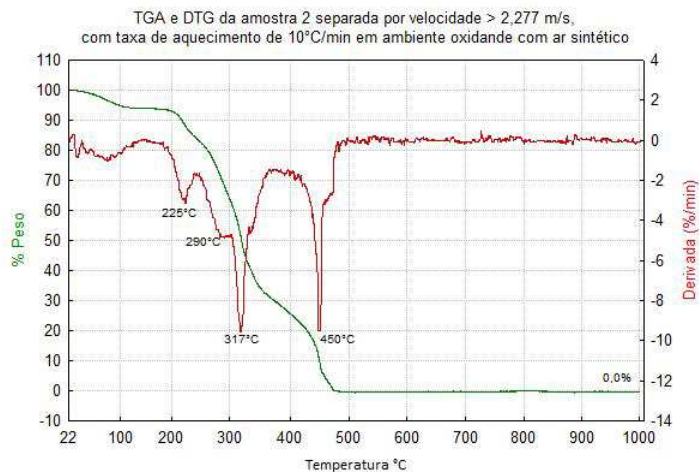
TGA e DTG em ambiente oxidante com ar sintético



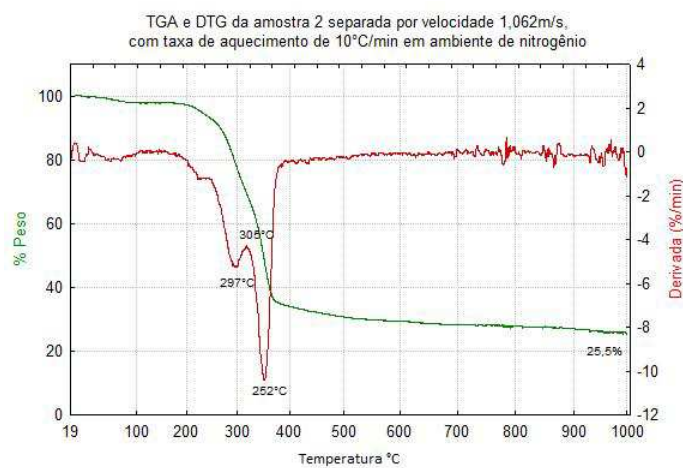
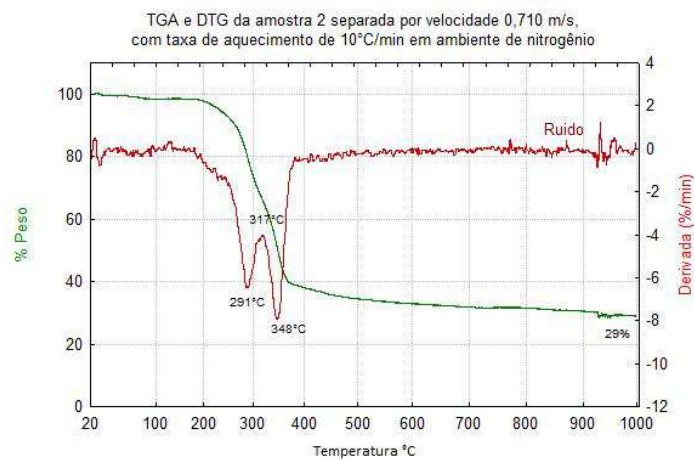
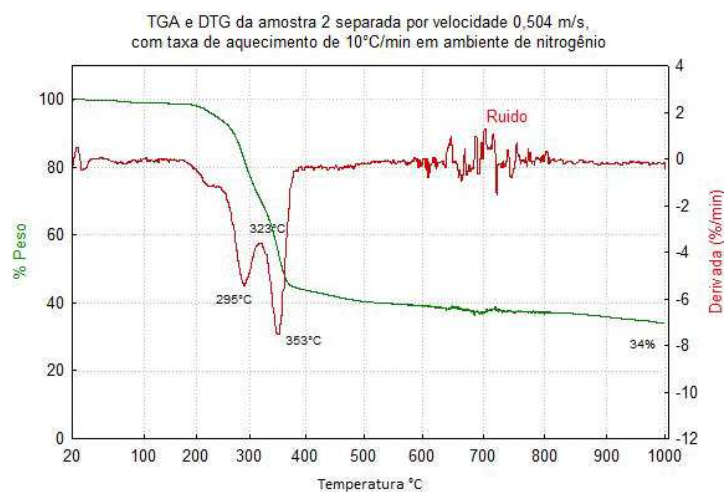
TGA e DTG em ambiente oxidante com ar sintético



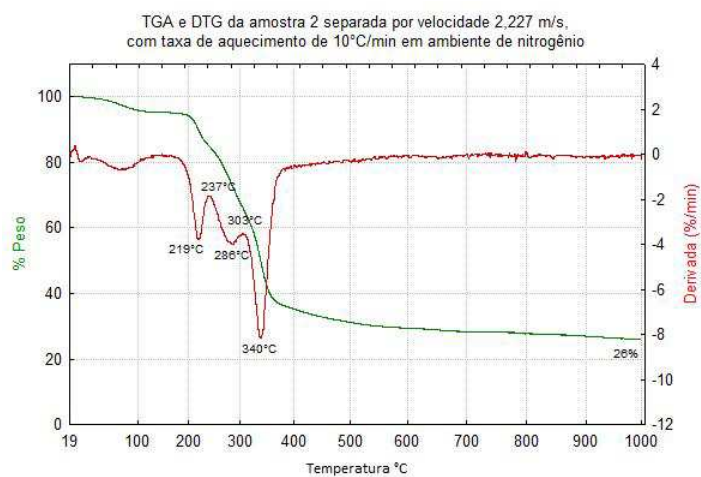
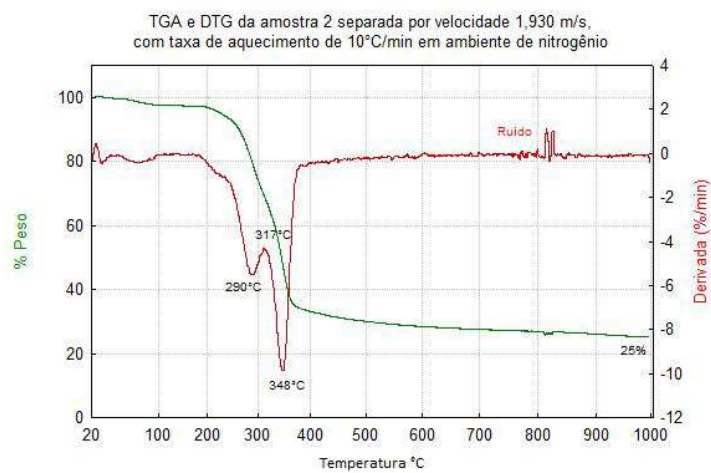
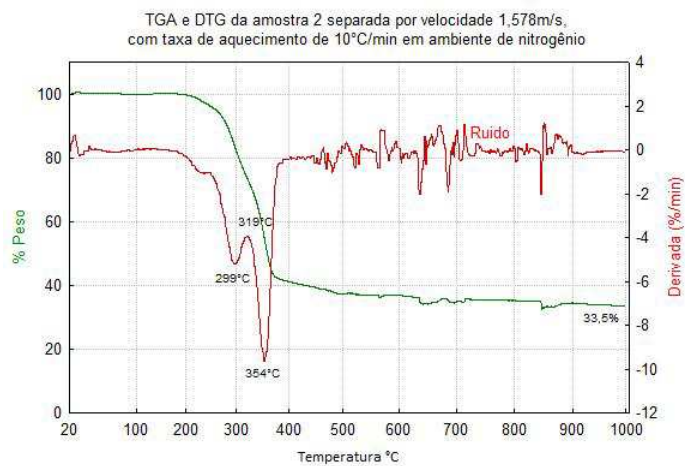
TGA e DTG em ambiente oxidante com ar sintético



TGA e DTG em ambiente inerte com nitrogênio

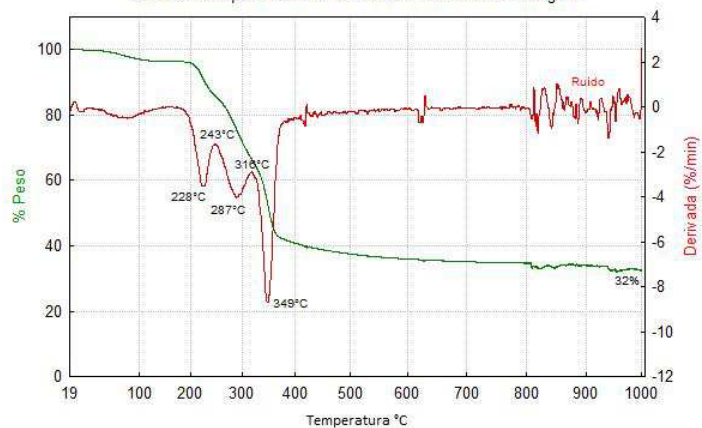


TGA e DTG em ambiente inerte com nitrogênio

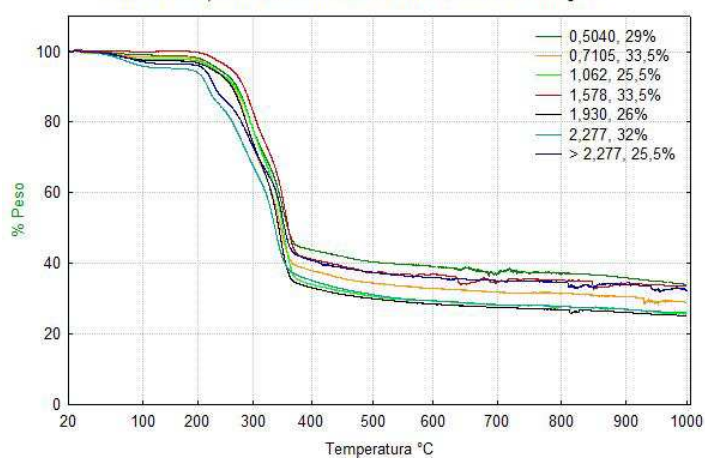


TGA e DTG em ambiente inerte com nitrogênio

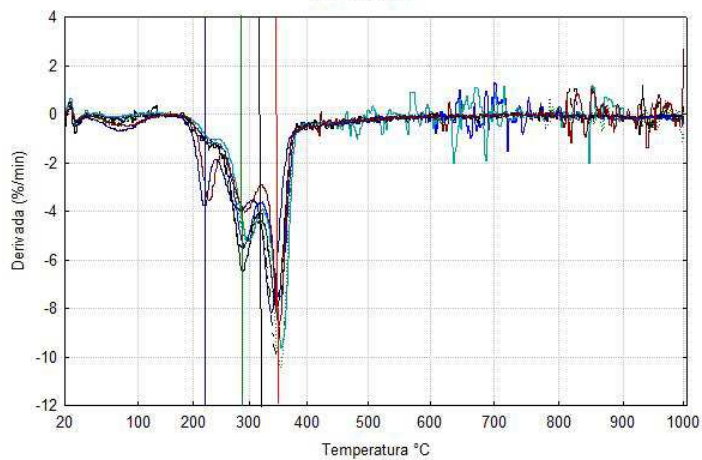
TGA e DTG da amostra 2 separada por velocidade maior que 2,227 m/s,
com taxa de aquecimento de 10°C/min em ambiente de nitrogênio



TGA da amostra 2 de todas as frações
com taxa de aquecimento de 10°C/min em ambiente inerte de nitrogênio

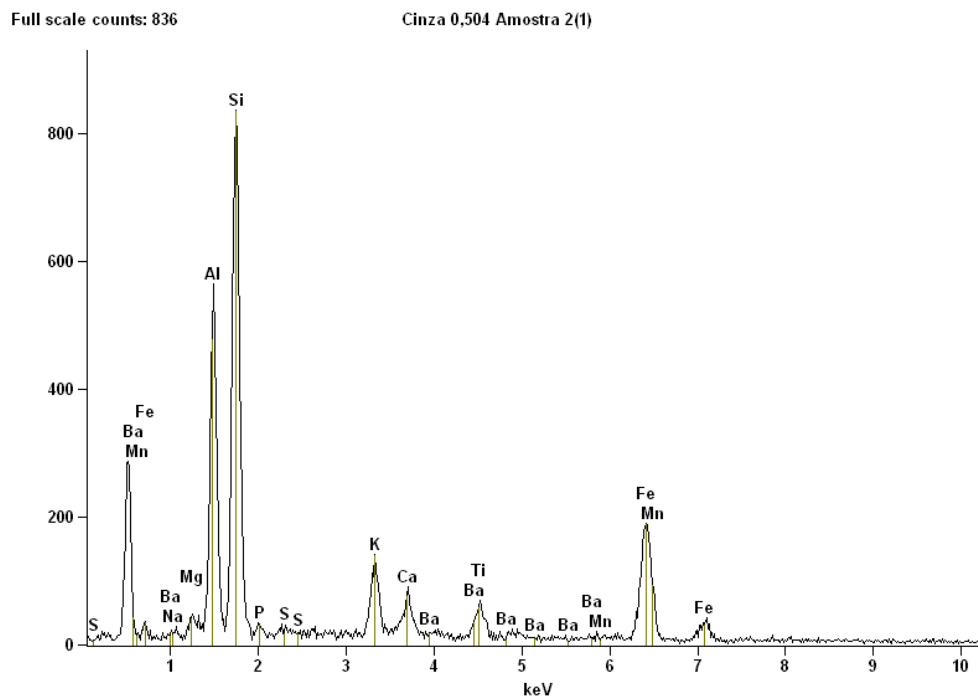


Todos os DTG



Anexo IV

Resultados da análise elementar das cinzas

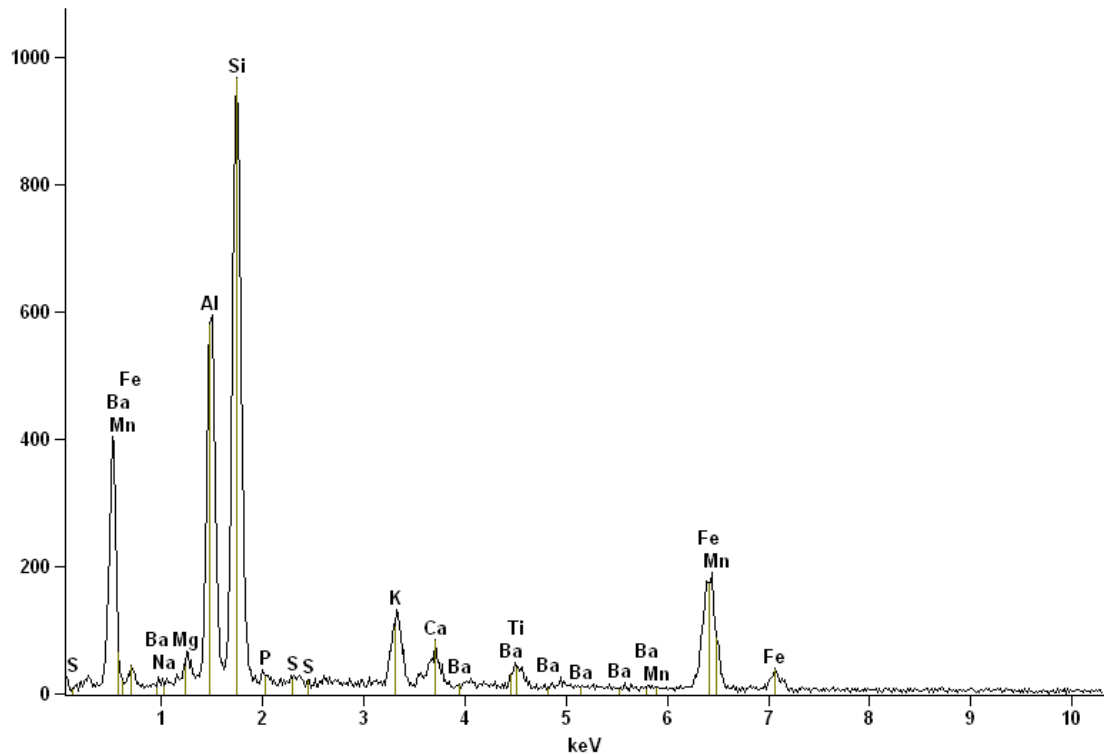


Cinza 0,504 Amostra 2(1)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.15S	61.55		---	---
Na K	88	0.78	0.76	Na ₂ O	1.05	1.05
Mg K	250	0.91	0.84	MgO	1.51	1.51
Al K	4421	12.41	10.26	Al ₂ O ₃	23.44	23.44
Si K	8171	22.05	17.51	SiO ₂	47.17	47.17
P K	189	0.67	0.48	P ₂ O ₅	1.54	1.54
S K	113	0.34	0.24	SO ₃	0.86	0.86
K K	1324	3.09	1.76	K ₂ O	3.72	3.72
Ca K	598	1.46	0.82	CaO	2.05	2.05
Ti K	696	2.10	0.98	Ti ₂ O ₃	3.15	3.15
Mn K	17	0.07	0.03	MnO ₂	0.10	0.10
Fe K	3042	11.97	4.78	FeO	15.40	15.40
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 968

Cinza 0,504 Amostra 2(2)

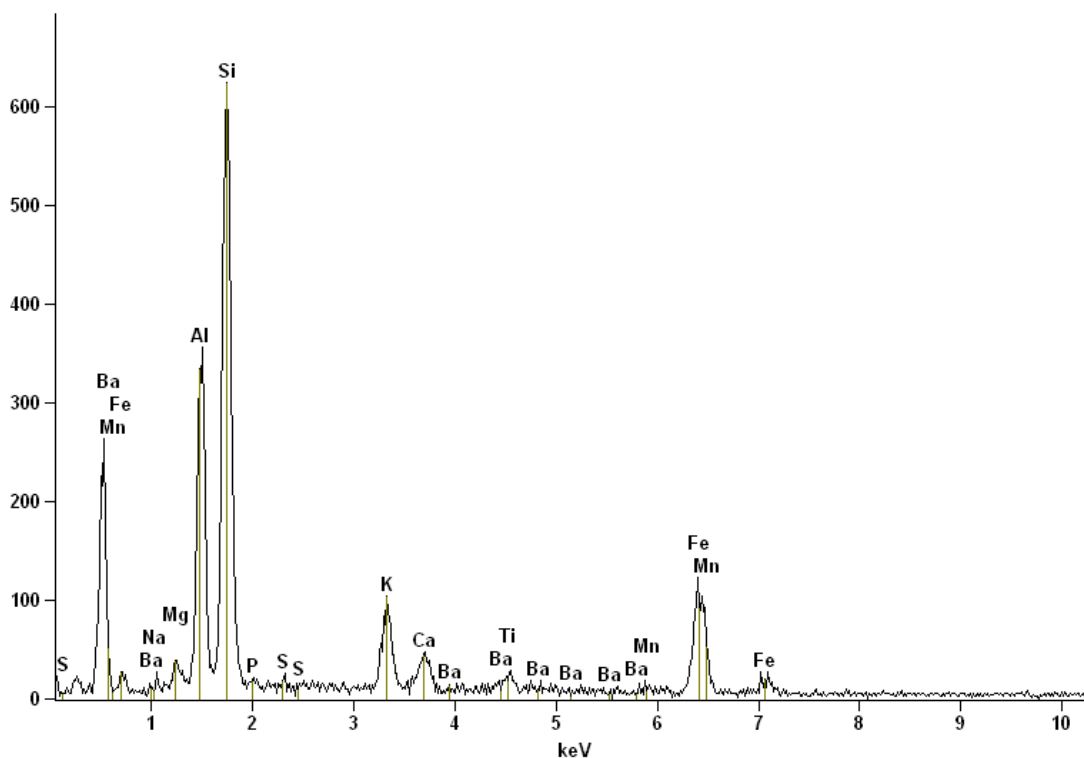


Cinza 0,504 Amostra 2(2)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	45.17S	61.99		---	---
Na K	39	0.29	0.28	Na ₂ O	0.40	0.40
Mg K	353	1.10	0.99	MgO	1.82	1.82
Al K	5577	13.42	10.92	Al ₂ O ₃	25.35	25.35
Si K	9709	23.15	18.10	SiO ₂	49.52	49.52
P K	194	0.62	0.44	P ₂ O ₅	1.43	1.43
S K	103	0.28	0.19	SO ₃	0.70	0.70
K K	1420	2.96	1.66	K ₂ O	3.57	3.57
Ca K	673	1.47	0.81	CaO	2.06	2.06
Ti K	484	1.30	0.60	Ti ₂ O ₃	1.96	1.96
Mn K	41	0.14	0.05	MnO ₂	0.22	0.22
Fe K	2886	10.10	3.97	FeO	12.99	12.99
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 624

Cinza 0,504 Amostra 2

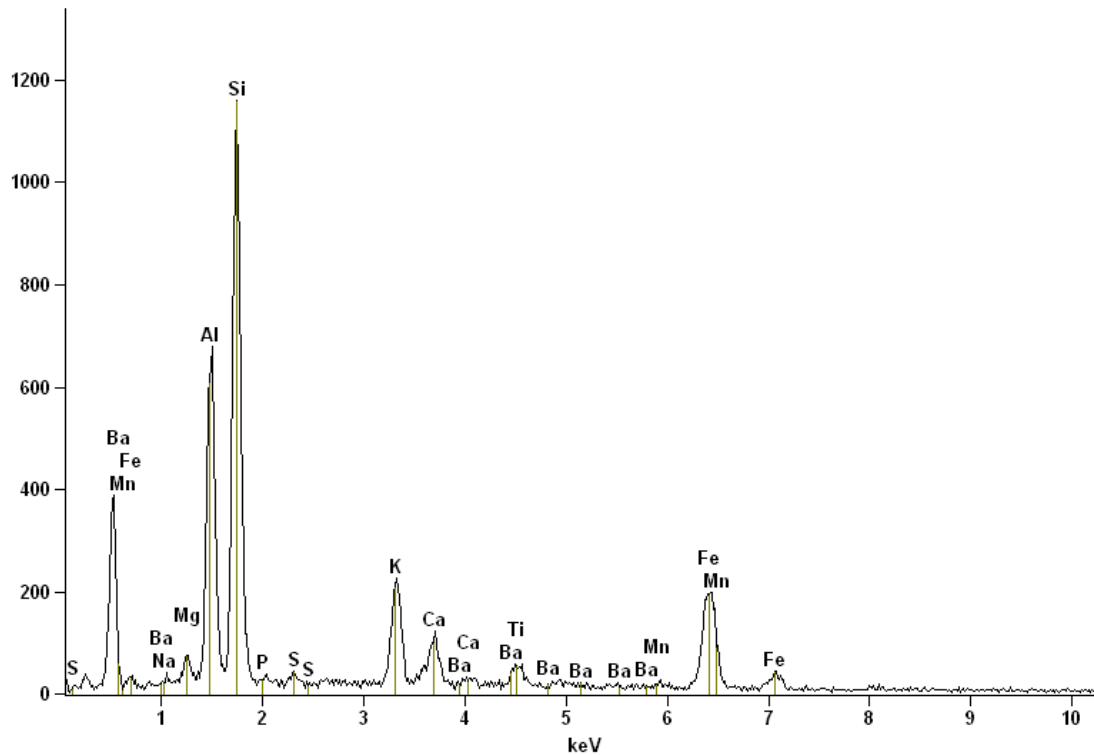


Cinza 0,504 Amostra 2

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	45.02S	61.77		---	---
Na K	62	0.77	0.73	Na2O	1.03	1.03
Mg K	192	0.98	0.89	MgO	1.63	1.63
Al K	3136	12.41	10.09	Al2O3	23.44	23.44
Si K	6229	23.99	18.75	SiO2	51.32	51.32
P K	66	0.35	0.25	P2O5	0.80	0.80
S K	66	0.30	0.20	SO3	0.74	0.74
K K	1068	3.66	2.06	K2O	4.41	4.41
Ca K	487	1.76	0.97	CaO	2.47	2.47
Ti K	189	0.84	0.39	Ti2O3	1.27	1.27
Mn K	79	0.44	0.17	MnO2	0.69	0.69
Fe K	1646	9.48	3.73	FeO	12.20	12.20
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1159

Cinza 0,7105 Amostra 2(1)

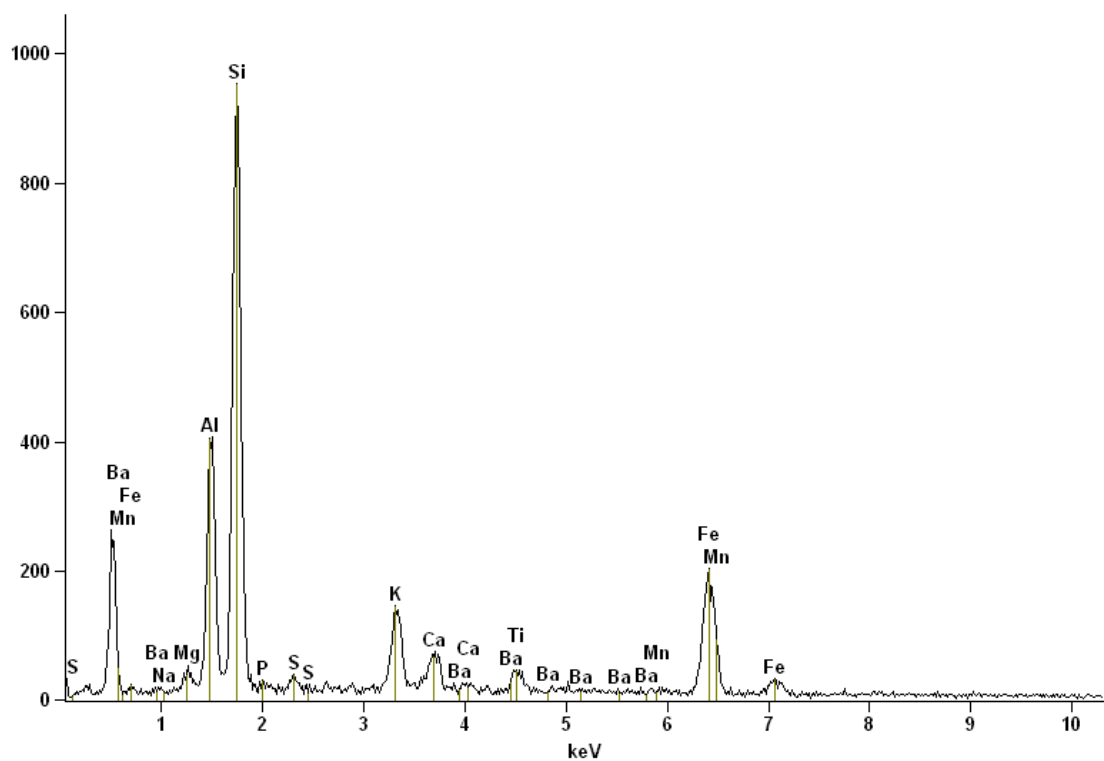


Cinza 0,710 Amostra 2(1)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.23S	61.44		---	---
Na K	27	0.18	0.17	Na ₂ O	0.24	0.24
Mg K	451	1.24	1.13	MgO	2.05	2.05
Al K	6061	12.91	10.64	Al ₂ O ₃	24.40	24.40
Si K	10570	22.01	17.41	SiO ₂	47.08	47.08
P K	123	0.34	0.24	P ₂ O ₅	0.78	0.78
S K	232	0.55	0.38	SO ₃	1.36	1.36
K K	2560	4.63	2.63	K ₂ O	5.58	5.58
Ca K	1069	2.06	1.14	CaO	2.89	2.89
Ti K	564	1.34	0.62	Ti ₂ O ₃	2.01	2.01
Mn K	101	0.30	0.12	MnO ₂	0.47	0.47
Fe K	3328	10.22	4.07	FeO	13.14	13.14
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 953

Cinza 0,7105 Amostra 2(2)

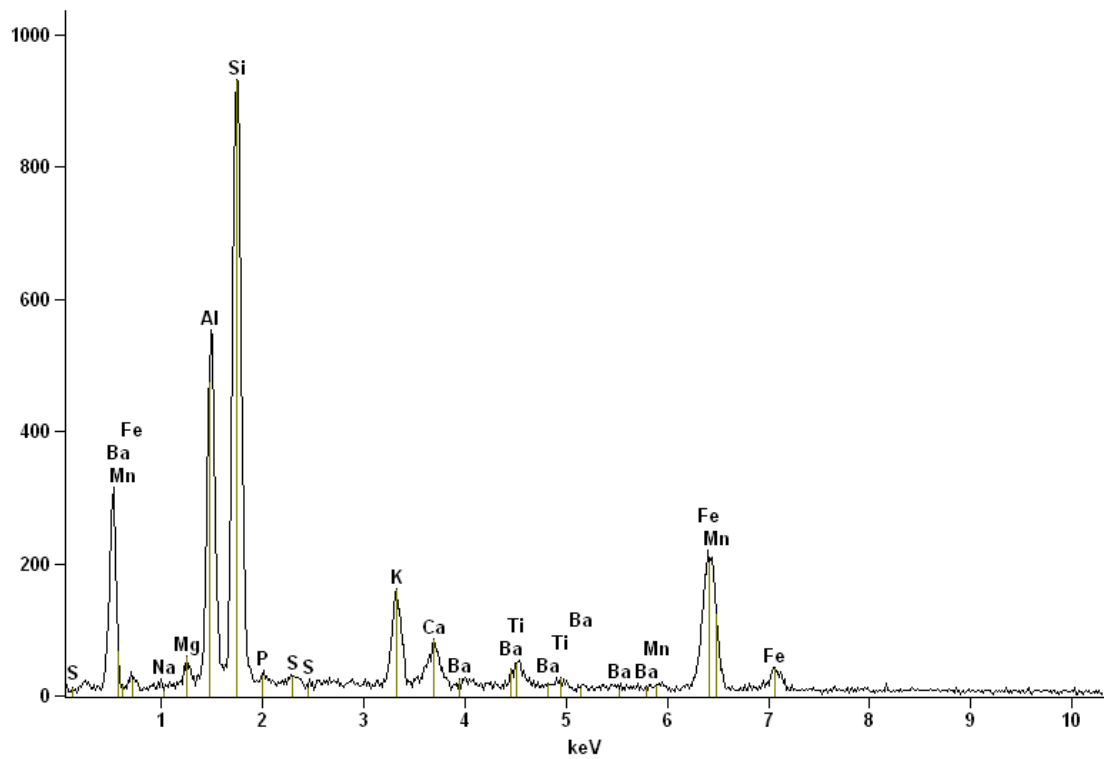


Cinza 0,710 Amostra 2(2)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.47S	62.06		---	---
Na K	1	0.01	0.01	Na ₂ O	0.01	0.01
Mg K	232	0.87	0.80	MgO	1.45	1.45
Al K	3575	10.27	8.50	Al ₂ O ₃	19.41	19.41
Si K	9037	24.10	19.16	SiO ₂	51.56	51.56
P K	120	0.44	0.32	P ₂ O ₅	1.01	1.01
S K	213	0.67	0.47	SO ₃	1.67	1.67
K K	1584	3.82	2.18	K ₂ O	4.61	4.61
Ca K	673	1.72	0.96	CaO	2.40	2.40
Ti K	454	1.42	0.66	Ti ₂ O ₃	2.14	2.14
Mn K	38	0.15	0.06	MnO ₂	0.23	0.23
Fe K	2961	12.05	4.82	FeO	15.51	15.51
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 932

Cinza 0,7105 Amostra 2

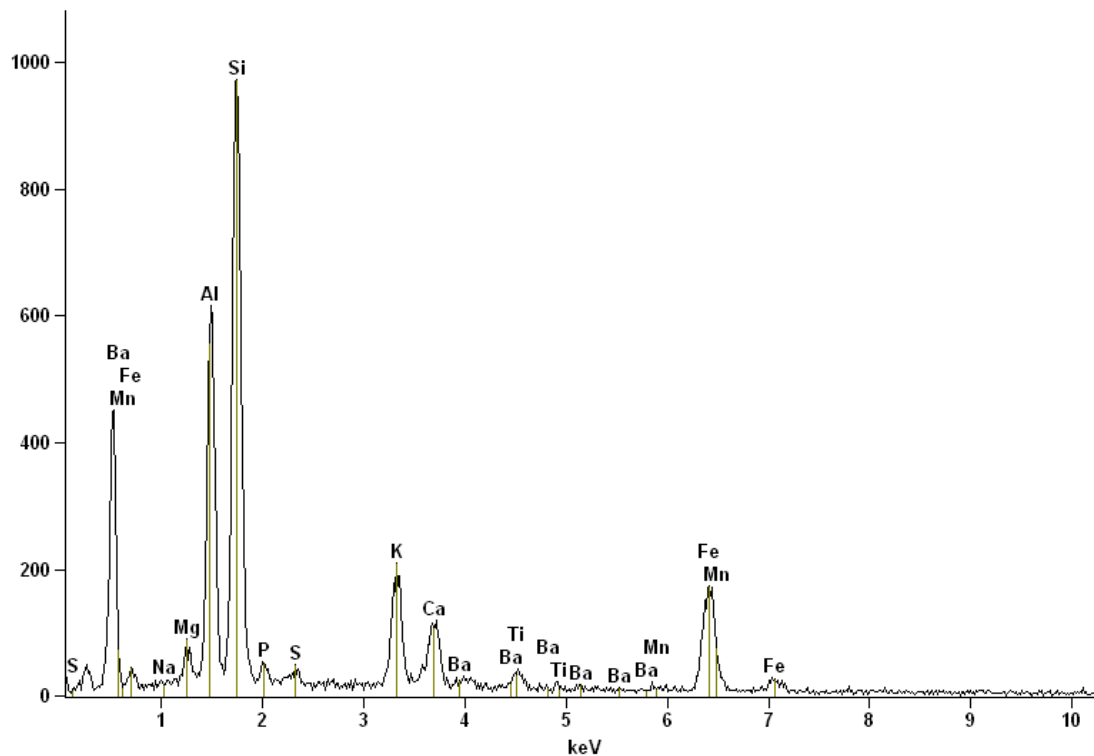


Cinza 0,710 Amostra 2

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.09S	61.81		---	---
Na K	23	0.19	0.19	Na ₂ O	0.26	0.26
Mg K	218	0.73	0.67	MgO	1.21	1.21
Al K	4487	11.40	9.48	Al ₂ O ₃	21.54	21.54
Si K	9475	22.72	18.15	SiO ₂	48.61	48.61
P K	193	0.62	0.45	P ₂ O ₅	1.42	1.42
S K	160	0.44	0.31	SO ₃	1.10	1.10
K K	1663	3.51	2.01	K ₂ O	4.22	4.22
Ca K	819	1.82	1.02	CaO	2.55	2.55
Ti K	530	1.45	0.68	Ti ₂ O ₃	2.17	2.17
Mn K	145	0.49	0.20	MnO ₂	0.78	0.78
Fe K	3523	12.54	5.04	FeO	16.13	16.13
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 972

Cinza = 1,062 Amostra 2(1)

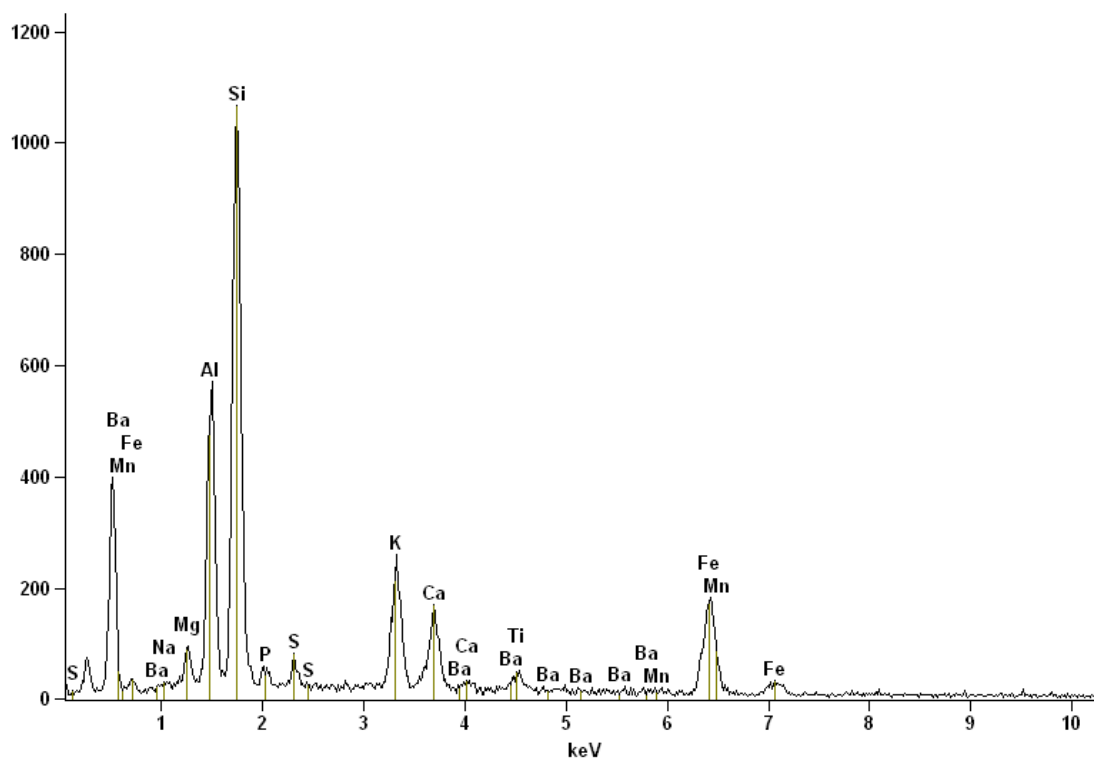


Cinza = 1,062 Amostra 2(1)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.93S	61.82		---	---
Na K	6	0.04	0.04	Na2O	0.06	0.06
Mg K	446	1.33	1.20	MgO	2.20	2.20
Al K	5361	12.48	10.18	Al2O3	23.58	23.58
Si K	9867	22.43	17.58	SiO2	47.99	47.99
P K	332	1.01	0.72	P2O5	2.32	2.32
S K	256	0.67	0.46	SO3	1.68	1.68
K K	2324	4.72	2.65	K2O	5.68	5.68
Ca K	1158	2.51	1.38	CaO	3.51	3.51
Ti K	346	0.92	0.42	Ti2O3	1.39	1.39
Mn K	71	0.23	0.09	MnO2	0.37	0.37
Fe K	2538	8.72	3.44	FeO	11.22	11.22
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1067

Cinza = 1,062 Amostra 2(2)

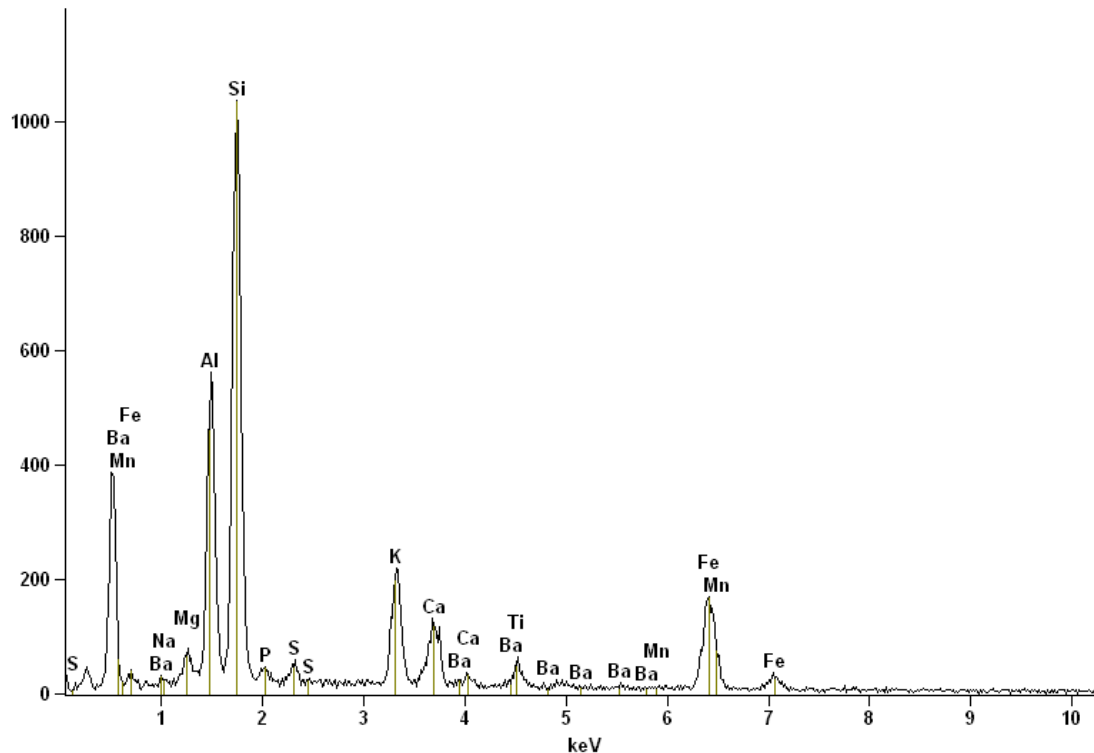


Cinza = 1,062 Amostra 2(2)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.51S	61.67		---	---
Na K	62	0.43	0.42	Na2O	0.58	0.58
Mg K	495	1.43	1.30	MgO	2.37	2.37
Al K	4768	10.72	8.81	Al2O3	20.26	20.26
Si K	10415	22.01	17.37	SiO2	47.09	47.09
P K	383	1.08	0.78	P2O5	2.49	2.49
S K	502	1.23	0.85	SO3	3.08	3.08
K K	2655	5.08	2.88	K2O	6.12	6.12
Ca K	1589	3.26	1.80	CaO	4.56	4.56
Ti K	422	1.07	0.50	Ti2O3	1.61	1.61
Mn K	69	0.21	0.09	MnO2	0.34	0.34
Fe K	2721	8.88	3.52	FeO	11.42	11.42
Ba L	19	0.07	0.01	BaO	0.08	0.08
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1037

Cinza = 1,062 Amostra 2

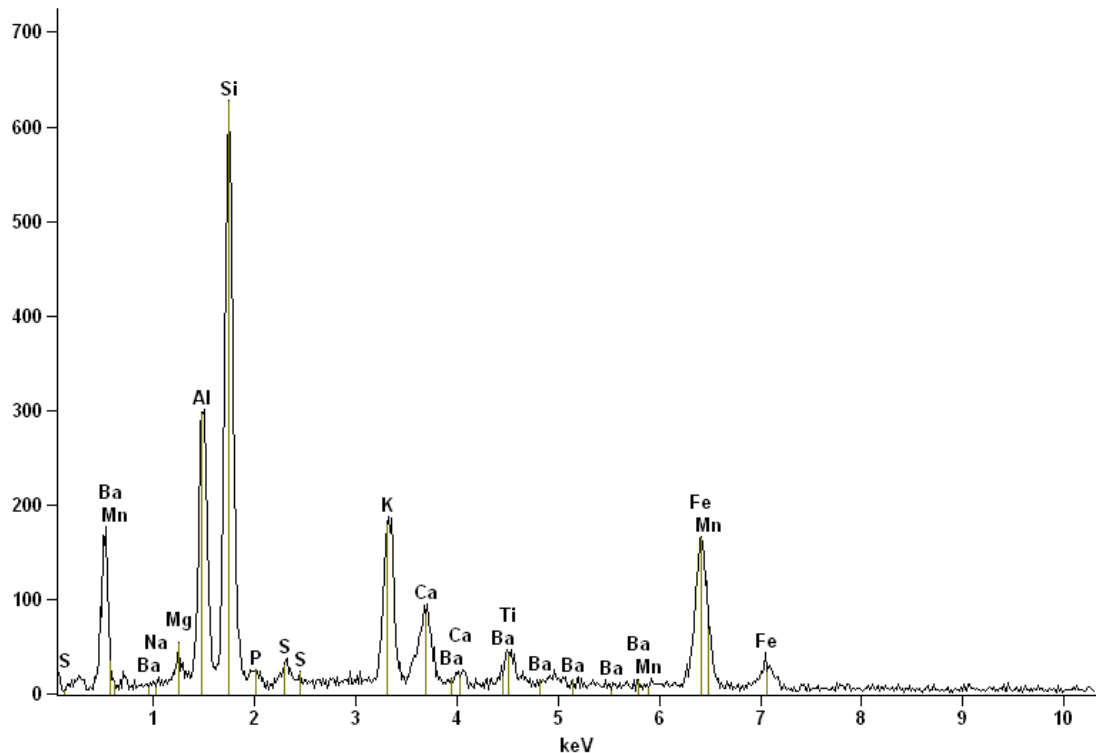


Cinza = 1,062 Amostra 2

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.69S	61.72		---	---
Na K	61	0.44	0.42	Na2O	0.59	0.59
Mg K	454	1.34	1.22	MgO	2.23	2.23
Al K	4820	11.13	9.11	Al2O3	21.02	21.02
Si K	10254	22.46	17.67	SiO2	48.04	48.04
P K	308	0.91	0.65	P2O5	2.08	2.08
S K	404	1.03	0.71	SO3	2.57	2.57
K K	2426	4.80	2.71	K2O	5.78	5.78
Ca K	1406	2.98	1.64	CaO	4.16	4.16
Ti K	503	1.32	0.61	Ti2O3	1.98	1.98
Mn K	69	0.22	0.09	MnO2	0.35	0.35
Fe K	2580	8.69	3.44	FeO	11.18	11.18
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 628

Cinza 1,5780 Amostra 2(1)

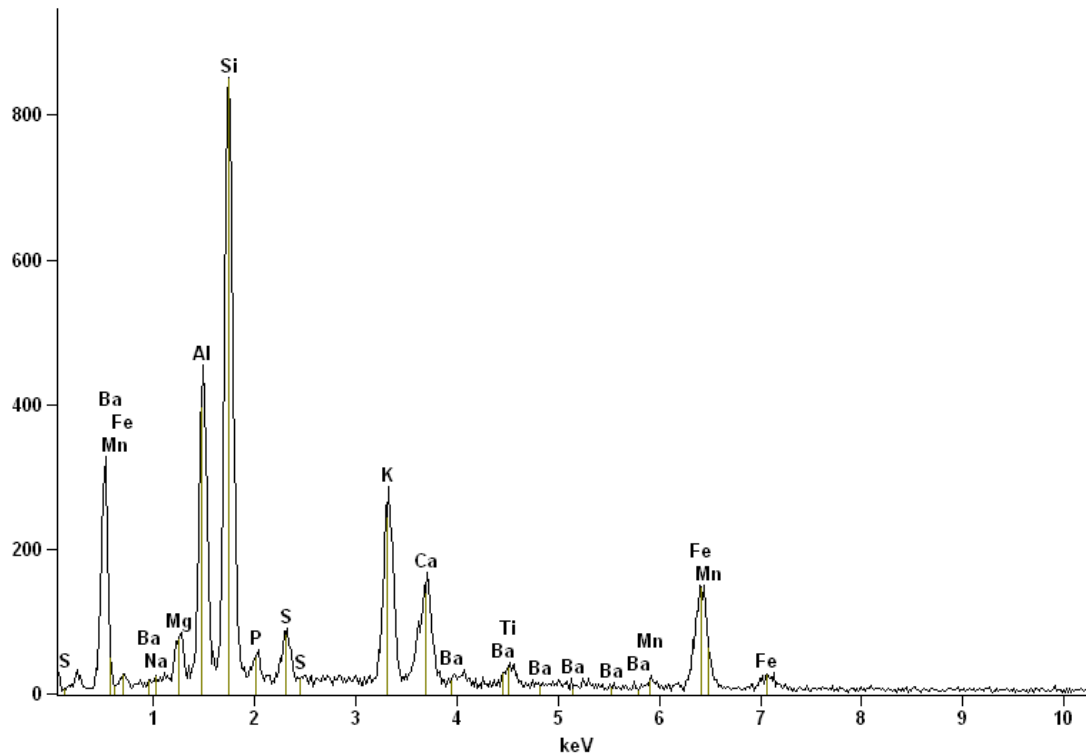


Cinza 1,578 Amostra 2(1)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	42.17S	60.55		---	---
Na K	41	0.49	0.49	Na ₂ O	0.67	0.67
Mg K	231	1.12	1.06	MgO	1.87	1.87
Al K	2639	9.84	8.38	Al ₂ O ₃	18.59	18.59
Si K	5834	19.75	16.15	SiO ₂	42.24	42.24
P K	209	0.91	0.67	P ₂ O ₅	2.08	2.08
S K	254	0.96	0.69	SO ₃	2.39	2.39
K K	2168	6.39	3.76	K ₂ O	7.70	7.70
Ca K	1083	3.47	1.99	CaO	4.85	4.85
Ti K	463	1.84	0.88	Ti ₂ O ₃	2.76	2.76
Mn K	35	0.17	0.07	MnO ₂	0.27	0.27
Fe K	2529	12.89	5.30	FeO	16.59	16.59
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 852

Cinza 1,5780 Amostra 2(2)

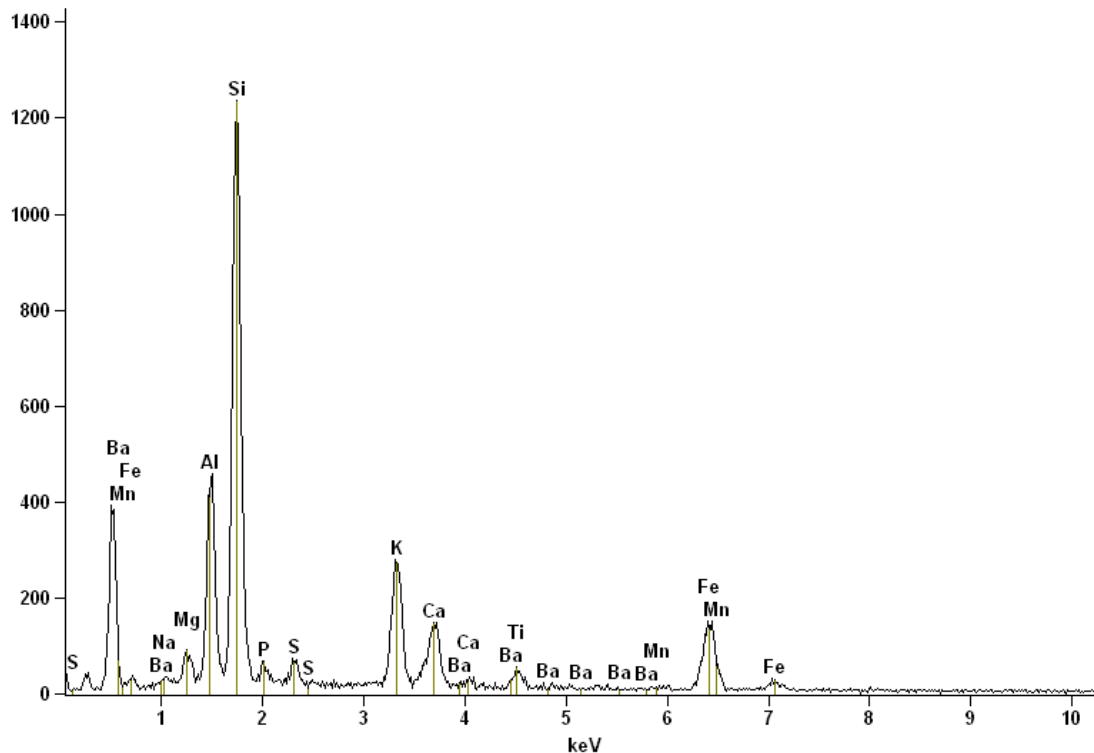


Cinza 1,578 Amostra 2(2)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	43.75S	61.26		---	---
Na K	12	0.09	0.09	Na2O	0.13	0.13
Mg K	566	1.87	1.72	MgO	3.10	3.10
Al K	3763	9.79	8.13	Al2O3	18.50	18.50
Si K	8350	20.00	15.95	SiO2	42.78	42.78
P K	397	1.24	0.90	P2O5	2.85	2.85
S K	728	1.99	1.39	SO3	4.98	4.98
K K	3380	7.37	4.22	K2O	8.87	8.87
Ca K	1807	4.32	2.42	CaO	6.05	6.05
Ti K	377	1.12	0.52	Ti2O3	1.68	1.68
Mn K	178	0.64	0.26	MnO2	1.02	1.02
Fe K	2072	7.81	3.13	FeO	10.05	10.05
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1236

Cinza 1,5780 Amostra 2

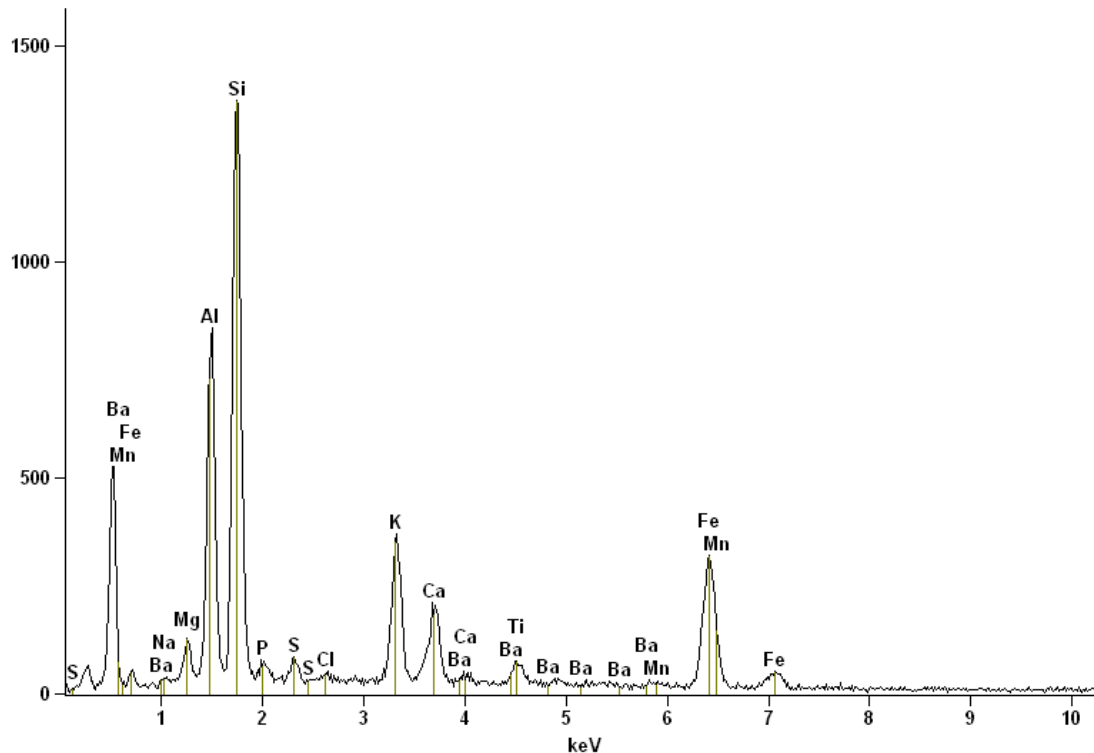


Cinza 1,578 Amostra 2

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.75S	61.68		---	---
Na K	108	0.73	0.70	Na2O	0.98	0.98
Mg K	567	1.58	1.44	MgO	2.62	2.62
Al K	3959	8.65	7.07	Al2O3	16.35	16.35
Si K	11979	23.76	18.66	SiO2	50.82	50.82
P K	435	1.21	0.86	P2O5	2.76	2.76
S K	483	1.16	0.80	SO3	2.90	2.90
K K	3255	6.12	3.45	K2O	7.37	7.37
Ca K	1584	3.22	1.77	CaO	4.51	4.51
Ti K	504	1.27	0.58	Ti2O3	1.90	1.90
Mn K	56	0.17	0.07	MnO2	0.28	0.28
Fe K	2296	7.38	2.91	FeO	9.49	9.49
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1374

Cinza 1,93 Amostra 2(1)

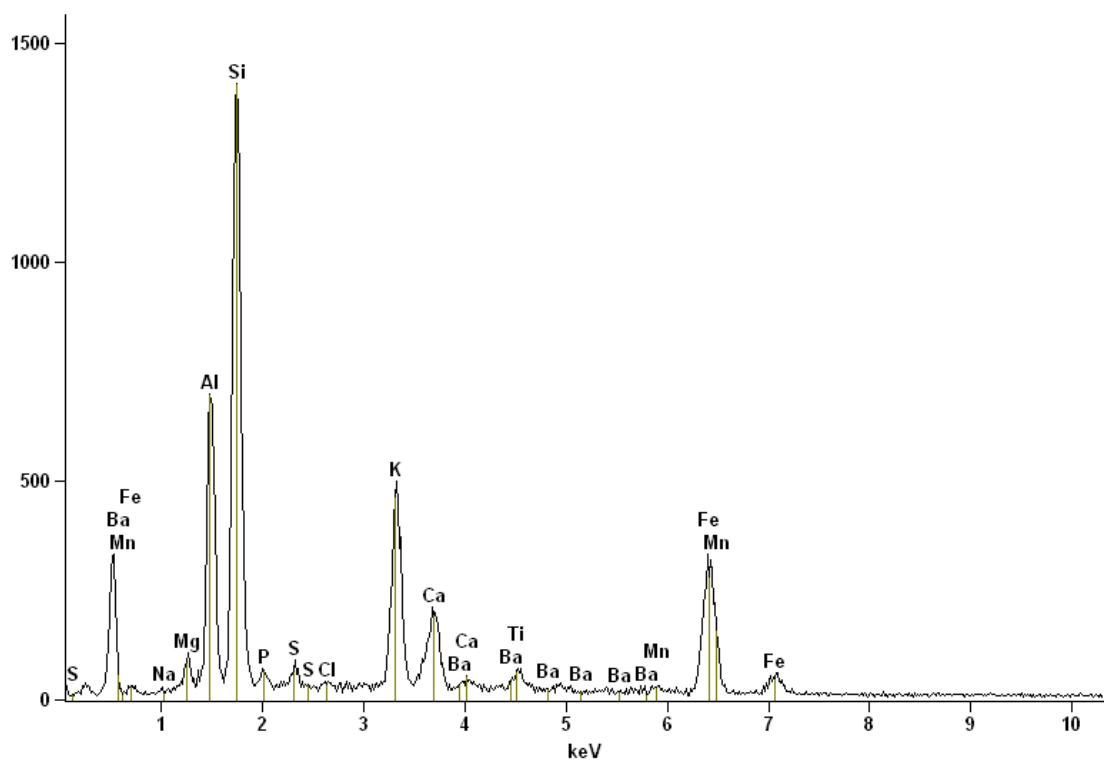


Cinza 1,930 Amostra 2(1)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	43.42S	61.03		---	---
Na K	99	0.49	0.48	Na ₂ O	0.66	0.66
Mg K	676	1.38	1.27	MgO	2.28	2.28
Al K	7343	11.59	9.66	Al ₂ O ₃	21.90	21.90
Si K	13591	20.30	16.25	SiO ₂	43.42	43.42
P K	493	0.95	0.69	P ₂ O ₅	2.18	2.18
S K	625	1.04	0.73	SO ₃	2.60	2.60
Cl K	181	0.28	0.17	Cl	0.28	0.28
K K	4021	5.24	3.01	K ₂ O	6.31	6.31
Ca K	1989	2.78	1.56	CaO	3.89	3.89
Ti K	703	1.21	0.57	Ti ₂ O ₃	1.82	1.82
Mn K	130	0.28	0.11	MnO ₂	0.44	0.44
Fe K	4973	11.05	4.45	FeO	14.21	14.21
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1406

Cinza 1,93 Amostra 2(2)

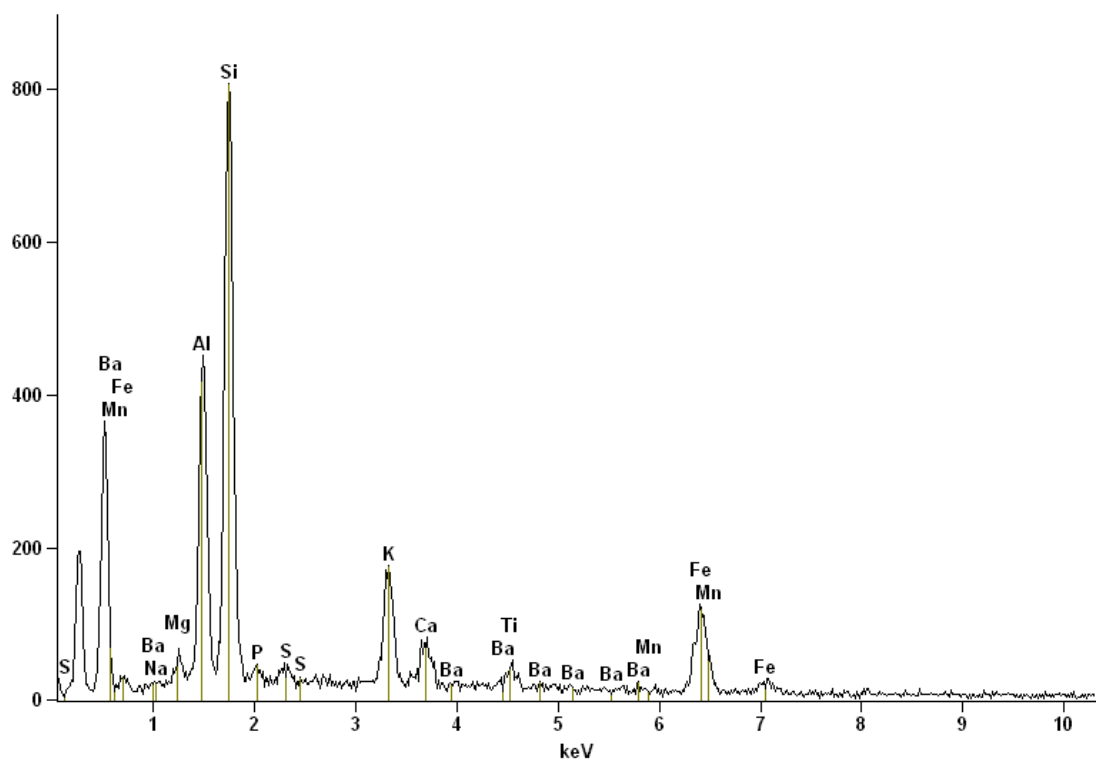


Cinza 1,930 Amostra 2(2)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	42.53S	60.62		---	---
Na K	26	0.14	0.14	Na ₂ O	0.19	0.19
Mg K	494	1.07	1.01	MgO	1.78	1.78
Al K	5966	9.95	8.41	Al ₂ O ₃	18.79	18.79
Si K	13668	20.90	16.97	SiO ₂	44.72	44.72
P K	438	0.88	0.65	P ₂ O ₅	2.02	2.02
S K	457	0.80	0.57	SO ₃	1.99	1.99
Cl K	165	0.26	0.17	Cl	0.26	0.26
K K	5424	7.40	4.32	K ₂ O	8.91	8.91
Ca K	2154	3.22	1.83	CaO	4.50	4.50
Ti K	560	1.03	0.49	Ti ₂ O ₃	1.55	1.55
Mn K	122	0.27	0.11	MnO ₂	0.43	0.43
Fe K	4917	11.55	4.72	FeO	14.86	14.86
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 807

Cinza 1,93 Amostra 2

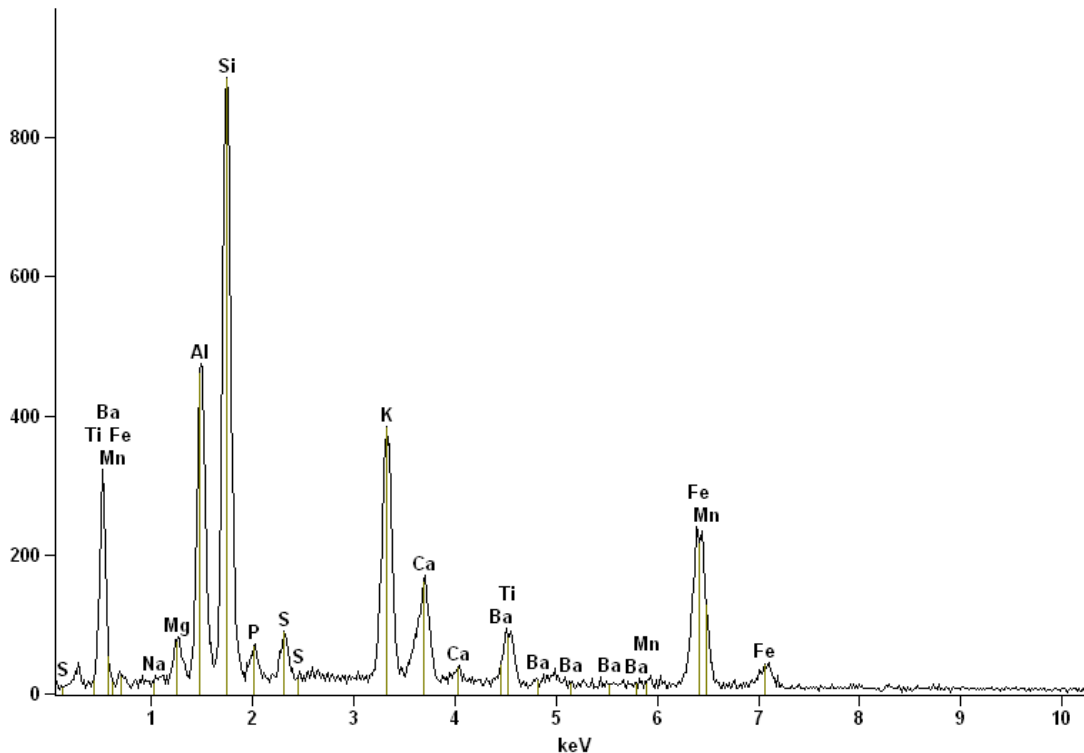


Cinza 1,930 Amostra 2

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	45.12S	61.88		---	---
Na K	52	0.49	0.47	Na ₂ O	0.66	0.66
Mg K	284	1.10	1.00	MgO	1.83	1.83
Al K	3866	11.68	9.50	Al ₂ O ₃	22.07	22.07
Si K	7974	23.23	18.15	SiO ₂	49.69	49.69
P K	247	0.98	0.70	P ₂ O ₅	2.25	2.25
S K	253	0.87	0.59	SO ₃	2.17	2.17
K K	1907	5.06	2.84	K ₂ O	6.09	6.09
Ca K	675	1.91	1.05	CaO	2.68	2.68
Ti K	320	1.11	0.51	Ti ₂ O ₃	1.67	1.67
Mn K	20	0.08	0.03	MnO ₂	0.13	0.13
Fe K	1865	8.35	3.28	FeO	10.75	10.75
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 885

Cinza = 2,227 Amostra 2(1)

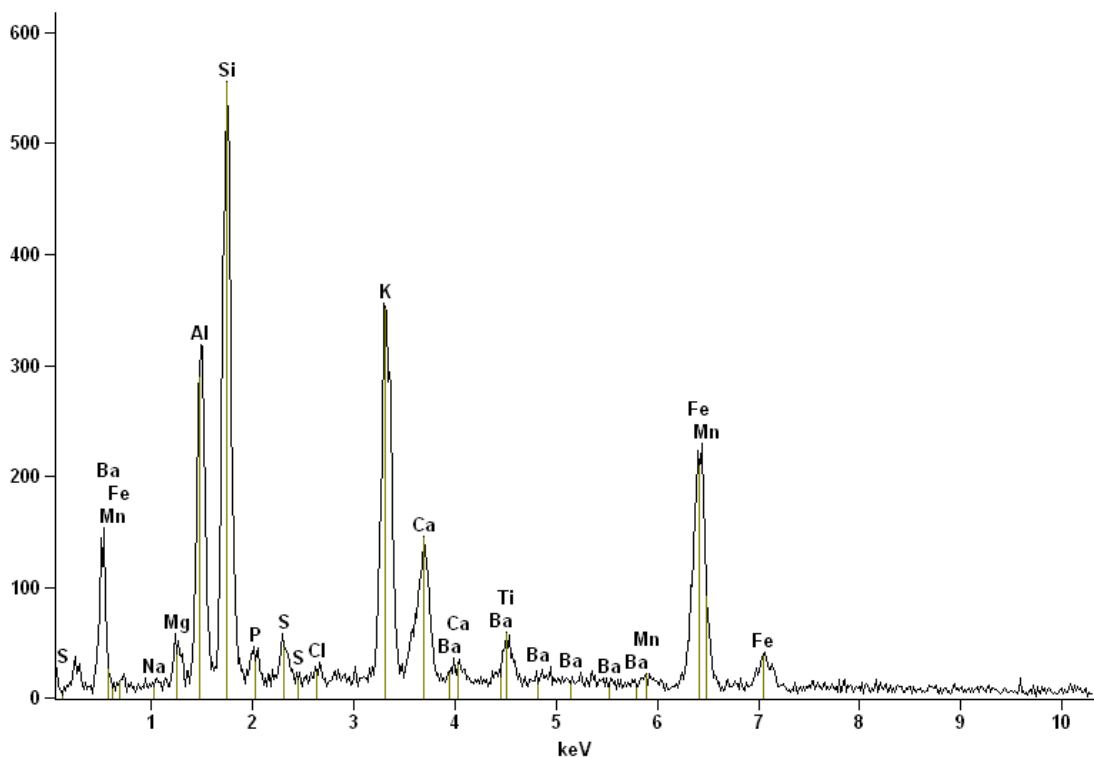


Cinza = 2,227 Amostra 2(1)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	41.63S	60.48		---	---
Na K	0	0.00	0.00	Na2O	0.00	0.00
Mg K	475	1.41	1.35	MgO	2.34	2.34
Al K	4140	9.52	8.20	Al2O3	17.98	17.98
Si K	8533	17.65	14.60	SiO2	37.75	37.75
P K	507	1.30	0.98	P2O5	2.99	2.99
S K	755	1.70	1.23	SO3	4.25	4.25
K K	4465	8.01	4.76	K2O	9.64	9.64
Ca K	1666	3.29	1.91	CaO	4.60	4.60
Ti K	1075	2.62	1.27	Ti2O3	3.93	3.93
Mn K	49	0.15	0.06	MnO2	0.23	0.23
Fe K	3876	12.14	5.05	FeO	15.61	15.61
Ba L	165	0.59	0.10	BaO	0.66	0.66
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 556

Cinza = 2,227 Amostra 2(2)

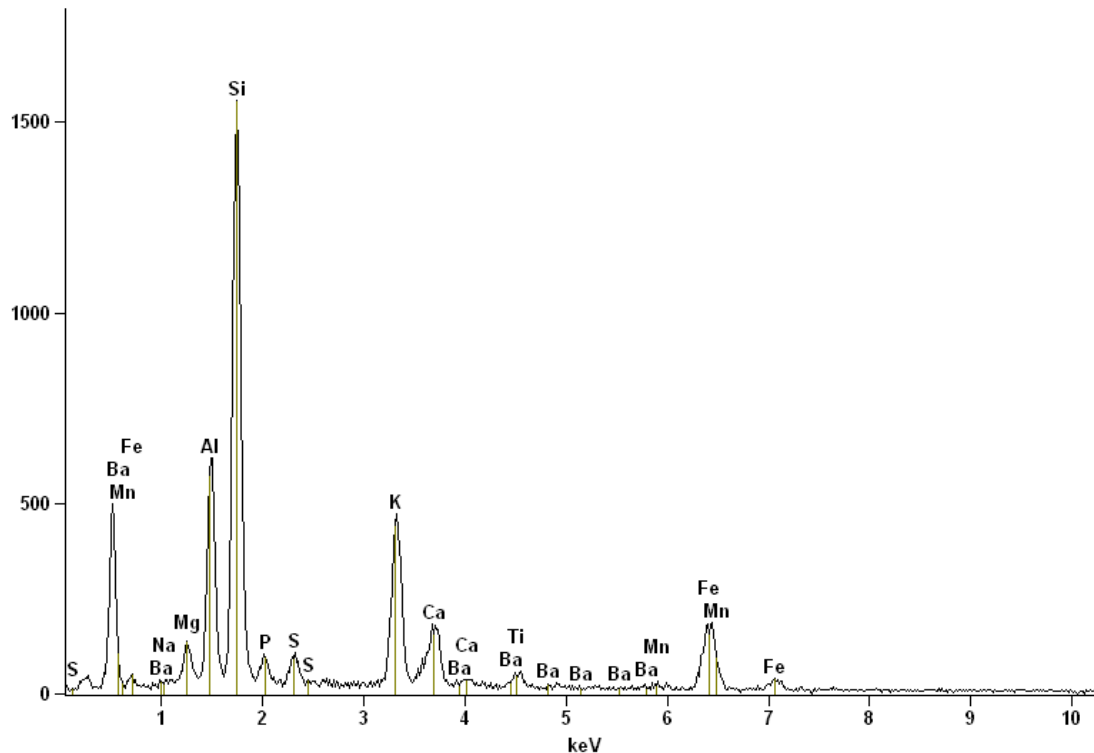


Cinza = 2,227 Amostra 2(2)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	39.21S	58.70		---	---
Na K	46	0.50	0.52	Na2O	0.67	0.67
Mg K	290	1.27	1.25	MgO	2.10	2.10
Al K	2596	8.66	7.68	Al2O3	16.36	16.36
Si K	5345	15.60	13.30	SiO2	33.37	33.37
P K	341	1.19	0.92	P2O5	2.74	2.74
S K	416	1.28	0.95	SO3	3.19	3.19
Cl K	149	0.42	0.29	Cl	0.42	0.42
K K	4246	10.50	6.43	K2O	12.65	12.65
Ca K	1401	3.90	2.33	CaO	5.46	5.46
Ti K	533	1.83	0.91	Ti2O3	2.74	2.74
Mn K	145	0.61	0.26	MnO2	0.96	0.96
Fe K	3442	15.02	6.44	FeO	19.32	19.32
Ba L	4	0.02	0.00	BaO	0.03	0.03
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1556

Cinza = 2,227 Amostra 2

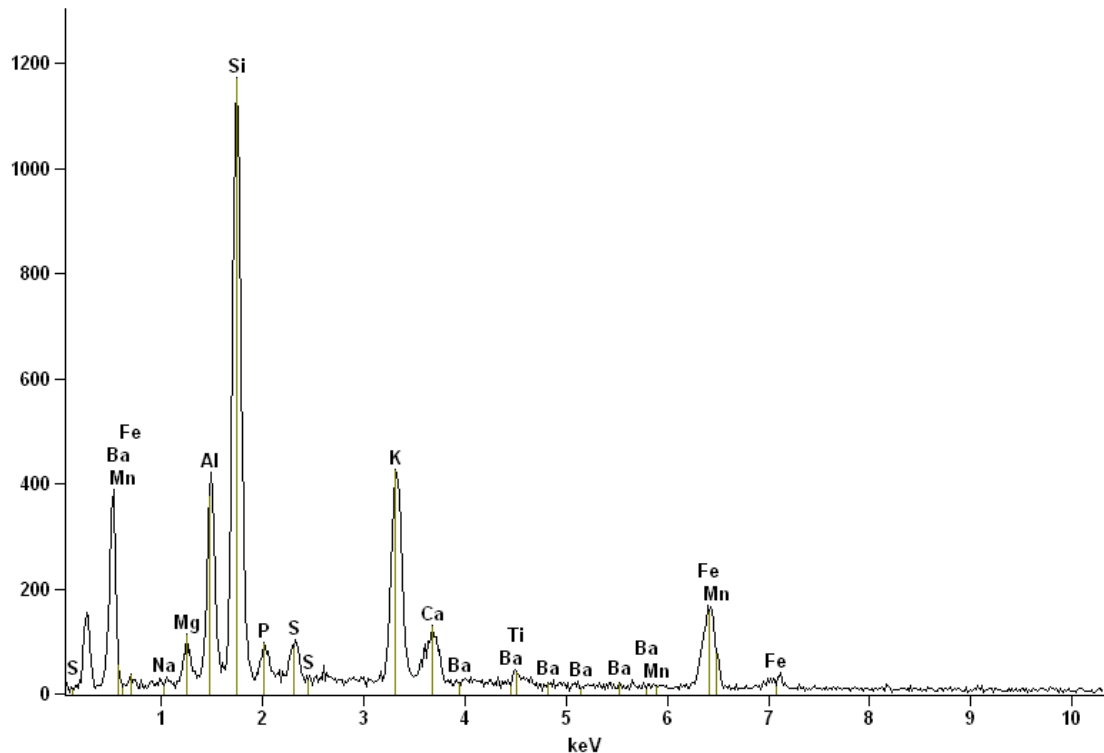


Cinza = 2,227 Amostra 2

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	44.27S	61.44		---	---
Na K	97	0.50	0.49	Na2O	0.68	0.68
Mg K	874	1.88	1.71	MgO	3.11	3.11
Al K	4987	8.45	6.95	Al2O3	15.96	15.96
Si K	14507	22.14	17.50	SiO2	47.36	47.36
P K	755	1.57	1.13	P2O5	3.60	3.60
S K	933	1.70	1.18	SO3	4.25	4.25
K K	5453	7.86	4.47	K2O	9.47	9.47
Ca K	1819	2.88	1.60	CaO	4.03	4.03
Ti K	515	1.00	0.46	Ti2O3	1.50	1.50
Mn K	97	0.23	0.09	MnO2	0.37	0.37
Fe K	3038	7.51	2.99	FeO	9.67	9.67
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1173

Cinza maior 2,227 Amostra 2(1)

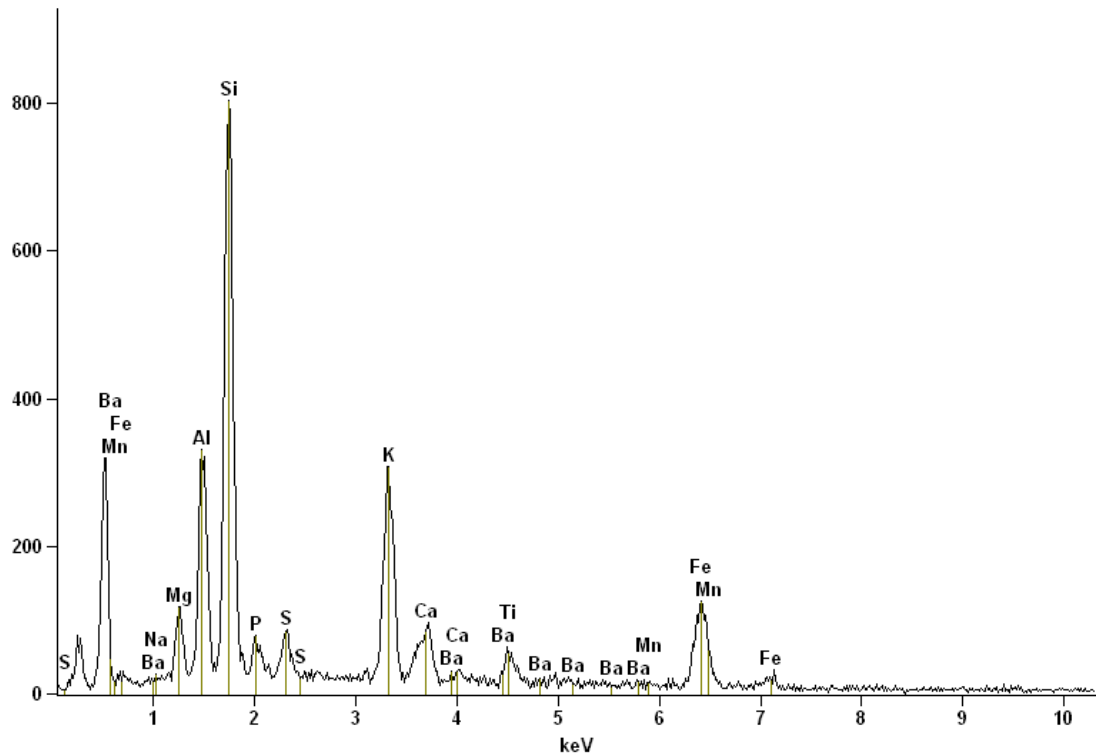


Cinza maior 2,227 Amostra 2(1)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	43.94S	61.41		---	---
Na K	47	0.32	0.31	Na ₂ O	0.43	0.43
Mg K	637	1.76	1.62	MgO	2.92	2.92
Al K	3283	7.12	5.90	Al ₂ O ₃	13.45	13.45
Si K	11572	22.02	17.53	SiO ₂	47.10	47.10
P K	749	1.95	1.41	P ₂ O ₅	4.48	4.48
S K	896	2.07	1.44	SO ₃	5.16	5.16
K K	5280	9.71	5.55	K ₂ O	11.70	11.70
Ca K	1016	2.08	1.16	CaO	2.91	2.91
Ti K	283	0.70	0.33	Ti ₂ O ₃	1.06	1.06
Mn K	95	0.29	0.12	MnO ₂	0.46	0.46
Fe K	2549	8.04	3.22	FeO	10.35	10.35
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 803

Cinza maior 2,227 Amostra 2(2)

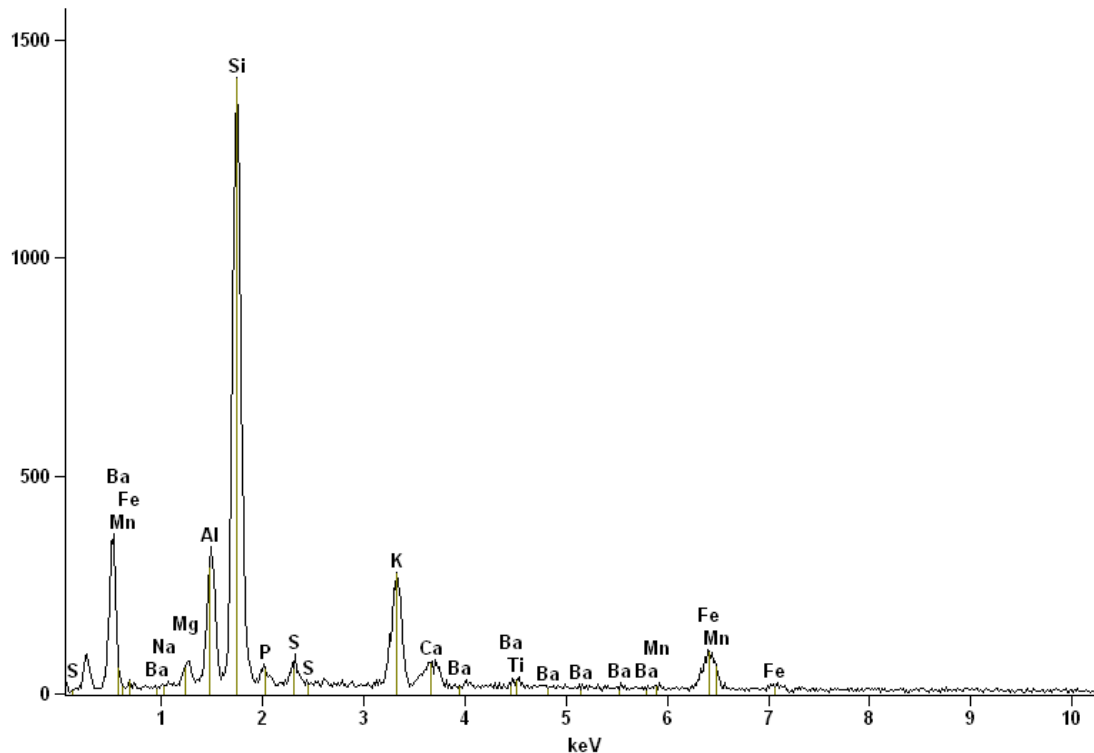


Cinza maior 2,227 Amostra 2(2)

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	43.75S	61.12		---	---
Na K	38	0.33	0.32	Na ₂ O	0.44	0.44
Mg K	810	2.85	2.62	MgO	4.73	4.73
Al K	2908	8.23	6.82	Al ₂ O ₃	15.56	15.56
Si K	8125	20.48	16.30	SiO ₂	43.81	43.81
P K	540	1.80	1.30	P ₂ O ₅	4.12	4.12
S K	639	1.88	1.31	SO ₃	4.69	4.69
K K	3544	8.28	4.73	K ₂ O	9.98	9.98
Ca K	961	2.47	1.38	CaO	3.46	3.46
Ti K	577	1.82	0.85	Ti ₂ O ₃	2.73	2.73
Mn K	37	0.14	0.06	MnO ₂	0.23	0.23
Fe K	1979	7.96	3.19	FeO	10.25	10.25
Ba L	0	0.00	0.00	BaO	0.00	0.00
Total		100.00	100.00		100.00	100.00

Full scale counts: 1412

Cinza maior 2,227 Amostra 2



Cinza maior 2,227 Amostra 2

Element Line	Net Counts	Weight %	Atom %	Formula	Compnd %	Norm. Compnd%
O K	0	46.46S	62.91		---	---
Na K	28	0.20	0.19	Na2O	0.27	0.27
Mg K	456	1.36	1.21	MgO	2.25	2.25
Al K	2704	6.33	5.09	Al2O3	11.97	11.97
Si K	13539	27.90	21.52	SiO2	59.69	59.69
P K	407	1.28	0.90	P2O5	2.94	2.94
S K	570	1.56	1.05	SO3	3.89	3.89
K K	3196	6.82	3.78	K2O	8.22	8.22
Ca K	695	1.61	0.87	CaO	2.25	2.25
Ti K	215	0.61	0.27	Ti2O3	0.91	0.91
Mn K	105	0.36	0.14	MnO2	0.57	0.57
Fe K	1443	5.19	2.01	FeO	6.68	6.68
Ba L	75	0.31	0.05	BaO	0.35	0.35
Total		100.00	100.00		100.00	100.00