

DEODATO MANSANO DOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS
INCENTIVADOS POR MICROONDAS PARA PRÉ-DESCARTE DO
RESÍDUO SÓLIDO DE TRATAMENTOS POR LODO ATIVADO**

SÃO CAETANO DO SUL
2007

DEODATO MANSANO DOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS
INCENTIVADOS POR MICROONDAS PARA PRÉ-DESCARTE DO
RESÍDUO SÓLIDO DE TRATAMENTOS POR LODO ATIVADO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Linha de pesquisa: Projeto de Processos Químicos

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Jermolovicius (processos químicos)

Co-orientador: Prof. Dr. José Thomaz Senise (microondas)

SÃO CAETANO DO SUL

2007

Santos, Deodato Mansano dos
Contribuição ao desenvolvimento de processos químicos
incentivados por microondas para pré-descarte do resíduo sólido
de tratamentos por lodo ativado / Deodato Mansano dos Santos. —
São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM, 2007.
139 p.

Dissertação de Mestrado — Programa de Pós-Graduação.
Linha de Pesquisa: Engenharia de Processos Químicos e
Bioquímicos — Escola de Engenharia Mauá do Centro
Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul,
SP, 2007.

Orientador: Luiz Alberto Jermolovicius
Co-orientador: José Thomaz Senise

1. Secagem por microondas – Lodo ativado 2. Microondas –
Secagem – Lodo ativado 3. Lodo ativado – Secagem por
microondas I. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário.
Escola de Engenharia Mauá. II. Título.

DEODATO MANSANO DOS SANTOS

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS INCENTIVADOS POR MICROONDAS PARA PRÉ-DESCARTE DO RESÍDUO SÓLIDO DE TRATAMENTOS POR LODO ATIVADO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Linha de pesquisa: Projeto de Processos Químicos

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luiz Alberto Jermolovicius
Orientador
Escola de Engenharia Mauá

Prof. Dr. José Thomaz Senise
Co-orientador
Escola de Engenharia Mauá

Prof. Dr. Guglielmo Taralli
Escola Politécnica da USP

Prof. Dr. Augusto Carlos Pavão
Escola de Engenharia Mauá

São Caetano do Sul, 03 de julho de 2007.

Para:

Daisy, Ana Paula, Maurício e Mauro.

AGRADECIMENTOS

A Deus	Supremo Engenheiro do Universo.
Aos meus pais	Pelos bons exemplos e pela educação para a formação do meu caráter.
À Daisy, minha esposa	Por ser o amor de minha vida.
Aos filhos: Ana Paula, Maurício e Mauro	Por fornecerem a inspiração para o dia-a-dia.
Aos familiares	Pelo carinho e amparo em todos os momentos.
Ao amigo Philippe Lacan	Pela sabedoria e experiência que muito contribuíram para a minha carreira profissional.
Aos amigos	Pelo fundamental apoio nos momentos longe do ambiente familiar.
Aos amigos Renato Augusto Covolato e Reinaldo Neuberger	Pelas nossas conversas sobre Meio Ambiente na Escola de Engenharia Mauá.
À Rhodia S/A	Por disponibilizar material para os ensaios.
Ao amigo José de Faria	Pelo fornecimento de informações sobre o material para os ensaios.
Ao Artur Selmikaitis e aos colegas do Laboratório de Microondas	Pela ajuda durante os ensaios quando da realização deste trabalho.
Aos profissionais da Biblioteca e do Núcleo de Informática da Mauá	Por fornecer o apoio necessário na pesquisa e suporte em informática.
À Skanska do Brasil Ltda	Por disponibilizar o acesso aos sistemas de leis e normas eletrônicas.
Aos revisores e amigos	Valéria Righe Dias que muito auxiliou na revisão ortográfica, e ao Marcos Barbosa na também valiosa revisão da formatação deste trabalho.
À banca examinadora	Pelos comentários e orientações prestados no Exame de Qualificação.
Aos meus orientadores	O meu eterno agradecimento aos professores Senise e Jermolovicius, que com a experiência e sabedoria peculiares, foram mais que orientadores; foram verdadeiros amigos e fundamentais para a realização deste trabalho, pois sem este auxílio não seria possível a realização desta dissertação.

EPÍGRAFE

APRENDA COM A NATUREZA

(por André Luiz - Francisco Cândido Xavier, extraído do livro *Agenda Cristã*, Ed. FEB, 36^a edição, página 111)

- Resplandece o Sol no alto, a fim de auxiliar a todos.
- As estrelas agrupam-se em ordem.
- O céu tem horários para a luz e para a sombra.
- O vegetal abandona a cova escura embora continue ligado ao solo, buscando a claridade a fim de produzir.
- O ramo que sobrevive à tempestade cede à passagem dela, mantendo-se não obstante, no lugar que lhe é próprio.
- A rocha garante a vida no vale, por resignar-se à solidão.
- O rio atinge os seus objetivos porque aprendeu a contornar obstáculos.
- A ponte serve ao público sem exceções, por afirmar-se contra o extremismo.
- O vaso serve ao oleiro, após suportar o clima do fogo.
- A pedra brilha, depois de sofrer as limas do lapidário.
- O canal preenche as suas finalidades, por não perder o excesso ao reservatório.
- A semeadura rende sempre, de acordo com os propósitos do semeador.

RESUMO

Os critérios para avaliar a preservação do meio ambiente são cada vez mais rigorosos e restritivos da liberdade da indústria em descartar seus resíduos oriundos dos seus processos de produção. No passado era uma prática comum a disposição de rejeitos e resíduos, diretamente no meio ambiente. Hodiernamente, se observa que os órgãos fiscalizadores do meio ambiente e as organizações não governamentais, de ênfase nos aspectos ambientais, exercem uma pressão cada vez maior, sobretudo junto às indústrias, inibindo-lhes práticas simplistas como as de outrora.

As empresas, para atenderem a essas exigências ambientais, cada vez mais draconianas, precisam despender maiores investimentos e consequentemente atingem maiores custos operacionais. Quando se trata de processo fabril, o empenho para investir é ainda mais notório; entretanto, para o descarte em si, isso não ocorre, pois existe uma tendência das empresas terceirizarem a especialistas o trabalho de eliminar os seus resíduos, para desta forma reduzir esse custo.

Pretendeu-se desenvolver um processo incentivado por microondas para pré-tratamento do resíduo de lodo ativado proveniente das Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) antes do seu descarte final. Este processo apresentou custo operacional final inferior ao do descarte convencional, porque consistiu, basicamente, em estabelecer as condições de uma secagem com microondas do resíduo sólido, promovendo a eliminação de água livre e água ligada, além de decompor parte da matéria orgânica presente no resíduo a ser descartado.

Palavras-chave: 1. Secagem por microondas – Lodo ativado 2. Microondas – Secagem – Lodo ativado 3. Lodo ativado – Secagem por microondas.

ABSTRACT

Nowadays the criteria used to appraisal environmental impact are more rigorous while those used to address environmental protection are more restrictive than in the past, especially where industry is concerned. Formerly there was freedom for industries to discard industrial waste and residue directly into the environment. At the moment national and local departments of the environment, as well as NGOs (non governmental organizations), are putting great pressure on industries to stop these former practices.

Consequently, companies in an effort to comply with these increasingly draconian environmental restrictions, are investing more into research on how industrial processes can be improved so as to reduce their impact on the environment. The result has been a rise in operational costs. The tendency has been to subcontract out to specialist services the final treatment of waste and residue. This also has proved to be very costly.

A new waste treatment process which makes use of the characteristics of microwaves allows for the initial treatment of activated silt residue coming from Effluent Treatment Stations (ETS) before it is released for final treatment. Because this microwaves treatment process requires less electrical energy it proves to be less expensive than the conventional treatment method by incineration. Basically it involves drying the solid residue by microwaves thus promoting the elimination of free water and bound water while at the same time bringing about the decomposition of a part of the organic substances present in the residue intended for disposal.

Key-words: 1. Microwave drying - Activated silt 2. Microwaves - Drying - Activated silt 3. Activated silt - Microwaves drying.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. TRATAMENTO POR LODO ATIVADO	25
2.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO TRATAMENTO DE LODO ATIVADO	25
2.2. FUNCIONAMENTO DO TRATAMENTO BÁSICO DE LODO ATIVADO	25
2.3. TIPOS DE TRATAMENTO POR LODO ATIVADO	29
2.3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS LODOS ATIVADOS QUANTO À IDADE DO LODO ...	29
2.3.2. DIVISÃO DOS LODOS ATIVADOS QUANTO AO FLUXO CONTÍNUO (CONVENCIONAL) E FLUXO INTERMITENTE (BATELADA)	30
2.4. DESCARTE DO LODO RESIDUAL	31
3. SECAGEM.....	33
3.1. CONCEITO DE SECAGEM	33
3.2. SECAGEM.....	33
3.3. O FENÔMENO DA SECAGEM	34
3.3.1. MECANISMO INTERNO DO FLUXO DO LÍQUIDO X VARIÁVEIS EXTERNAS	34
3.3.2. ETAPAS DA SECAGEM	35
3.3.3. PERÍODO DE VELOCIDADE DE SECAGEM CONSTANTE	37
3.3.4. PERÍODO DE VELOCIDADE DE DECRESCENTE	38
3.3.5. ESTIMATIVA DO TEMPO DE SECAGEM	39
3.4. SECADORES	39
4. MICROONDAS	43
4.1. RADIAÇÃO POR MICROONDAS	43
4.1.1. ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	44
4.1.2. MICROONDAS	46
4.2. AQUECIMENTO COM MICROONDAS	48
4.2.1. TIPOS DE MATERIAIS EM RELAÇÃO ÀS MICROONDAS	48
4.2.2. MECANISMOS DE AQUECIMENTO POR MICROONDAS.....	49
4.2.3. QUANTIFICAÇÃO DO AQUECIMENTO POR MICROONDAS	51
4.2.4. APLICAÇÃO DO AQUECIMENTO POR MICROONDAS	52
5. MATERIAL E EQUIPAMENTOS	53
5.1. MATERIAL	53
5.2. EQUIPAMENTOS PARA OS ENSAIOS PRELIMINARES E EFETIVOS	53
6. METODOLOGIA	57
6.1. METODOLOGIA PARA OS ENSAIOS PRELIMINARES	57

6.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	58
6.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES	59
6.4. CONCLUSÕES DOS ENSAIOS PRELIMINARES E PROPOSIÇÕES PARA OS ENSAIOS EFETIVOS.....	60
7. EXPERIMENTOS EFETIVOS.....	63
7.1. COMENTÁRIOS PRELIMINARES SOBRE OS EXPERIMENTOS EFETIVOS.....	63
7.2. METODOLOGIA.....	64
7.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EFETIVOS	66
7.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	66
7.5. ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E DE VARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DAS CURVAS EXPERIMENTAIS	70
7.6. ANÁLISE DE REGRESSÃO MULTILINEAR DOS PARÂMETROS DAS CURVAS EXPONENCIAIS EXPERIMENTAIS	93
8. CONCLUSÕES.....	99
9. REFERÊNCIAS	100
10. ANEXOS	
10.1. ANEXO: RESULTADOS DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 A 27	104
10.2. ANEXO: TRATAMENTO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 A 27	114
10.3. ANEXO: GRÁFICOS DA PERDA DE MASSA ACUMULADA DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 A 27	125
10.4. ANEXO: GRÁFICOS DA ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 A 27	130
10.5. ANEXO: GRÁFICOS DA VELOCIDADE DE SECAGEM DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 A 27	135

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ESQUEMA DE UMA UNIDADE DE TRATAMENTO DE LODO ATIVADO	26
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM FLOCO DE LODO ATIVADO .	27
FIGURA 3 – LODOS ATIVADOS COM FLUXO INTERMITENTE	31
FIGURA 4 – GRADIENTES DE UMIDADE TÍPICOS EM SÓLIDOS SOB SECAGEM	35
FIGURA 5 – CURVA EXPERIMENTAL DE SECAGEM	36
FIGURA 6 – CURVA DE VELOCIDADE DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM.....	36
FIGURA 7 – CURVA DE VELOCIDADE DE SECAGEM EM FUNÇÃO DA UMIDADE INSTANTÂNEA DO SÓLIDO	37
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA.....	43
FIGURA 9 – EFEITOS DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	45
FIGURA 10 – MATERIAL TRANSPARENTE	48
FIGURA 11 – MATERIAL DIELÉTRICO	49
FIGURA 12 – MATERIAL REFLETOR.....	49
FIGURA 13 – POLARIZAÇÃO DA ÁGUA.....	50
FIGURA 14 – FOTO DO ASPECTO DO MATERIAL UTILIZADO NO ENSAIO	53
FIGURA 15 – FOTO DA VISTA GERAL DOS EQUIPAMENTOS DE MICROONDAS E OS ITENS A, B, C, D, E, F	55
FIGURA 16 – FOTO DA VISTA EXTERNA COM OS ITENS: (A) DINAMÔMETRO; (B) EXAUSTOR; E (C) TOMADA DE TEMPERATURA DO EXAUSTOR	55
FIGURA 17 – FOTO DA VISTA GERAL DO INTERIOR DA CAVIDADE	56
FIGURA 18 – FOTO DO MATERIAL PARA ENSAIO.....	56
FIGURA 19 – PERDA ACUMULADA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO I (EXPLORATÓRIO).....	60
FIGURA 20 – FOTO DO MATERIAL APÓS ENSAIO DE SECAGEM.....	60
FIGURA 21 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 1	69
FIGURA 22 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 1	69
FIGURA 23 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 1	70
FIGURA 24 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 2	126
FIGURA 25 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 3	126
FIGURA 26 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 4	126
FIGURA 27 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 5	126
FIGURA 28 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 6	126
FIGURA 29 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 7	126

FIGURA 30 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 8	126
FIGURA 31 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 9	126
FIGURA 32 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 10	127
FIGURA 33 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 11	127
FIGURA 34 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 12	127
FIGURA 35 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 13	127
FIGURA 36 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 14	127
FIGURA 37 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 15	127
FIGURA 38 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 16	127
FIGURA 39 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 17	127
FIGURA 40 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 18	128
FIGURA 41 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 19	128
FIGURA 42 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 20	128
FIGURA 43 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 21	128
FIGURA 44 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 22	128
FIGURA 45 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 23	128
FIGURA 46 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 24	128
FIGURA 47 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 25	128
FIGURA 48 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 26	129
FIGURA 49 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 27	129
FIGURA 50 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 2.....	131
FIGURA 51 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 3.....	131
FIGURA 52 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 4.....	131
FIGURA 53 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 5.....	131
FIGURA 54 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 6.....	131
FIGURA 55 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 7.....	131
FIGURA 56 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 8.....	131
FIGURA 57 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 9.....	131
FIGURA 58 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 10.....	132
FIGURA 59 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 11.....	132
FIGURA 60 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 12.....	132
FIGURA 61 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 13.....	132
FIGURA 62 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 14.....	132
FIGURA 63 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 15.....	132
FIGURA 64 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 16.....	132
FIGURA 65 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 17.....	132
FIGURA 66 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 18.....	133

FIGURA 67 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 19.....	133
FIGURA 68 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 20.....	133
FIGURA 69 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 21.....	133
FIGURA 70 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 22.....	133
FIGURA 71 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 23.....	133
FIGURA 72 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 24.....	133
FIGURA 73 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 25.....	133
FIGURA 74 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 26.....	134
FIGURA 75 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 27.....	134
FIGURA 76 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 2	136
FIGURA 77 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 3	136
FIGURA 78 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 4	136
FIGURA 79 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 5	136
FIGURA 80 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 6	136
FIGURA 81 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 7	136
FIGURA 82 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 8	136
FIGURA 83 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 9	136
FIGURA 84 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 10	137
FIGURA 85 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 11	137
FIGURA 86 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 12	137
FIGURA 87 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 13	137
FIGURA 88 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 14	137
FIGURA 89 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 15	137
FIGURA 90 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 16	137
FIGURA 91 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 17	137
FIGURA 92 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 18	138
FIGURA 93 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 19	138
FIGURA 94 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 20	138
FIGURA 95 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 21	138
FIGURA 96 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 22	138
FIGURA 97 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 23	138
FIGURA 98 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 24	138
FIGURA 99 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 25	138
FIGURA 100 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 26	139
FIGURA 101 – VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 27	139

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS TRATAMENTOS EM FUNÇÃO DA IDADE DO LODO	29
TABELA 2 – CORES VISÍVEIS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	45
TABELA 3 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	46
TABELA 4 – ENERGIAS RELATIVAS A MOLÉCULAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS....	47
TABELA 5 – FREQÜÊNCIAS DE MICROONDAS PERMITIDAS PARA FINS MÉDICO, CIENTÍFICO E INDUSTRIAL	47
TABELA 6 – ENSAIO PRELIMINAR I	59
TABELA 7 – ENSAIO PRELIMINAR II	59
TABELA 8 – DISTRIBUIÇÃO DOS 27 ENSAIOS COM AS VARIÁVEIS REDUZIDAS E EFETIVAS.....	62
TABELA 9 – DADOS COLHIDOS NO ENSAIO 1	66
TABELA 10 – RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 1	67
TABELA 11 – RESUMO DA ANÁLISE INICIAL DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	68
TABELA 12 – REGRESSÕES PARA A DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	71
TABELA 13 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	72
TABELA 14 - EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	73
TABELA 15 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA.....	73
TABELA 16 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA DESCONSIDERADAS AS INTERAÇÕES.....	74
TABELA 17 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	74
TABELA 18 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	75
TABELA 19 – ANOVA PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	75
TABELA 20 – ANOVA PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA DESCONSIDERANDO AS INTERAÇÕES	75
TABELA 21 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	76

TABELA 22 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	77
TABELA 23 – ANOVA PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA.....	77
TABELA 24 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	78
TABELA 25 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR PRÉ- EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	79
TABELA 26 ANOVA PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	79
TABELA 27 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	80
TABELA 28 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES DO COEFICIENTE EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	81
TABELA 29 – ANOVA PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA	81
TABELA 30 – REGRESSÕES PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA..	82
TABELA 31 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	83
TABELA 32 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA.....	84
TABELA 33 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA DESCONSIDERADA AS INTERAÇÕES	84
TABELA 34 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA DESCONSIDERADA AS INTERAÇÕES	84
TABELA 35 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	85
TABELA 36 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA.....	86
TABELA 37 – ANOVA PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA.....	86
TABELA 38 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	87
TABELA 39 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA.....	88
TABELA 40 – ANOVA PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA.....	88

TABELA 41 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	89
TABELA 42 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	90
TABELA 43 – ANOVA PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	90
TABELA 44 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	91
TABELA 45 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	92
TABELA 46 – ANOVA PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA	92
TABELA 47 – RESUMO DOS RESULTADOS DAS ANOVA	92
TABELA 48 – ENSAIOS COM ANOVA 3 ³	93
TABELA 49 A – REGRESSÃO MULTILINEAR PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A PERDA DE MASSA ACUMULADA (1 ^a PARTE)	94
TABELA 49 B – REGRESSÃO MULTILINEAR PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A PERDA DE MASSA ACUMULADA (2 ^a PARTE)	94
TABELA 49 C – REGRESSÃO MULTILINEAR PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A PERDA DE MASSA ACUMULADA (3 ^a PARTE)	94
TABELA 50 A – REGRESSÃO MULTILINEAR DO FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA (1 ^a PARTE).....	96
TABELA 50 B – REGRESSÃO MULTILINEAR PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA (2 ^a PARTE)	96
TABELA 50 C – REGRESSÃO MULTILINEAR PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA (3 ^a PARTE)	96
TABELA 51 – RESULTADOS DO ENSAIO 2	105
TABELA 52 – RESULTADOS DO ENSAIO 3	105
TABELA 53 – RESULTADOS DO ENSAIO 4	105
TABELA 54 – RESULTADOS DO ENSAIO 5	106
TABELA 55 – RESULTADOS DO ENSAIO 6	106
TABELA 56 – RESULTADOS DO ENSAIO 7	106
TABELA 57 – RESULTADOS DO ENSAIO 8	107

TABELA 58 – RESULTADOS DO ENSAIO 9	107
TABELA 59 – RESULTADOS DO ENSAIO 10.....	107
TABELA 60 – RESULTADOS DO ENSAIO 11.....	108
TABELA 61 – RESULTADOS DO ENSAIO 12.....	108
TABELA 62 – RESULTADOS DO ENSAIO 13.....	108
TABELA 63 – RESULTADOS DO ENSAIO 14.....	109
TABELA 64 – RESULTADOS DO ENSAIO 15.....	109
TABELA 65 – RESULTADOS DO ENSAIO 16.....	109
TABELA 66 – RESULTADOS DO ENSAIO 17.....	110
TABELA 67 – RESULTADOS DO ENSAIO 18.....	110
TABELA 68 – RESULTADOS DO ENSAIO 19.....	110
TABELA 69 – RESULTADOS DO ENSAIO 20.....	111
TABELA 70 – RESULTADOS DO ENSAIO 21.....	111
TABELA 71 – RESULTADOS DO ENSAIO 22.....	111
TABELA 72 – RESULTADOS DO ENSAIO 23.....	112
TABELA 73 – RESULTADOS DO ENSAIO 24.....	112
TABELA 74 – RESULTADOS DO ENSAIO 25.....	112
TABELA 75 – RESULTADOS DO ENSAIO 26.....	113
TABELA 76 – RESULTADOS DO ENSAIO 27.....	113
TABELA 77 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 2.....	115
TABELA 78 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 3.....	115
TABELA 79 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 4.....	115
TABELA 80 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 5.....	116
TABELA 81 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 6.....	116
TABELA 82 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 7.....	117
TABELA 83 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 8.....	117
TABELA 84 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 9.....	117
TABELA 85 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 10.....	118
TABELA 86 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 11.....	118
TABELA 87 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 12.....	119
TABELA 88 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 13.....	119
TABELA 89 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 14.....	119
TABELA 90 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 15.....	120
TABELA 91 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 16.....	120
TABELA 92 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 17.....	120
TABELA 93 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 18.....	121
TABELA 94 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 19.....	121

TABELA 95 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 20.....	122
TABELA 96 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 21.....	122
TABELA 97 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 22.....	122
TABELA 98 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 23.....	123
TABELA 99 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 24.....	123
TABELA 100 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 25.....	123
TABELA 101 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 26.....	124
TABELA 102 – TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 27.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIQUIM	Associação Brasileira das Indústrias Químicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CCPA	<i>Canadian Chemical Producers Association</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental no Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EEEA	Energia Específica Efetiva Acumulada
EHF	Alta Freqüência Extrema
ELF	Freqüência Extremamente Baixa
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ETE	Estações de Tratamento de Efluentes
EUV	Ultravioleta Extremo
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
FIR	Infravermelho longínquo
HF	Freqüência Alta
HX	Raios X Duro
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IMT	Instituto Mauá de Tecnologia
ISO	<i>International Standards Organization</i>
LF	Freqüência Baixa
MF	Freqüência Média
MIR	Infravermelho Moderado
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras

NIR	Infravermelho Próximo
NUV	Ultravioleta Próximo
PAM	Perda de Massa Acumulada
PCS	Poder Calorífico Superior
SHF	Super-alta Freqüência
SX.....	Raios X
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UHF	Ultra-alta Freqüência
UK	<i>United Kingdom</i>
VF.....	Freqüência da Voz
VHF	Freqüência Muito Alta
VLF.....	Freqüência Muito Baixa
γ	Raio Gama

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
cal/g.....	caloria por grama
cm.....	centímetro
g	gramas
GHz	gigahertz
Hz	hertz
J/Kg	energia específica
kHz	quilohertz
kWh	quilowatt hora, energia efetiva no intervalo
kWh/kg	quilowatt hora por quilo, energia efetiva específica no intervalo
m/s.....	velocidade
MHz	megahertz
min.....	minuto
MWh.....	megawatt hora
R\$.....	real
R\$/ton.....	real por tonelada
t	temperatura
W.....	watt
W/g.....	watt por grama

1. INTRODUÇÃO

Os critérios para avaliar a preservação do meio ambiente são cada vez mais rigorosos e restritivos da liberdade da indústria em dispor seus resíduos oriundos dos seus processos de produção. No passado era uma prática comum o descarte de rejeitos e resíduos, diretamente no meio ambiente. Hodiernamente, se observa que os órgãos fiscalizadores do meio ambiente e as organizações não-governamentais, de ênfase nos aspectos ambientais, exercem uma pressão cada vez maior, sobretudo junto às indústrias inibindo-lhes práticas simplistas como as de outrora.

No Brasil, este posicionamento dos órgãos reguladores proporcionou uma mudança de conduta das empresas em geral: seja ela motivada por uma nascente conscientização pró meio ambiente, seja pela entrada em vigor de leis, como “A Lei de Crimes Ambientais”, Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. O desrespeito à lei supramencionada é enquadrado como crime ambiental, e é inafiançável. Além das leis federais, temos as Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que entre outras emitiu a NBR 10.004, em 1987, revista em maio de 2004 [1]. Em cada estado, e em uma grande maioria dos municípios brasileiros, há leis que visam disciplinar não apenas as atividades das indústrias, mas também as de todas as empresas, que, eventualmente, possam causar um impacto ao meio ambiente.

As indústrias químicas, diante deste panorama, onde foram rotuladas de poluidoras, e preocupadas com essa imagem junto à opinião pública e especialmente junto às suas comunidades circunvizinhas, adotaram o Programa Atuação Responsável. Referido Programa criado em 1985, no Canadá pela *Canadian Chemical Producers Association* (CCPA) fixa diretrizes para uma adesão voluntária das empresas químicas, e encontra-se implantado em mais de 40 países. No Brasil, é coordenado pela Associação Brasileira das Indústrias Químicas (ABIQUIM) [2]. As empresas que a ele aderem, comprometem-se a adotar, em seu gerenciamento industrial, seus códigos de conduta, que abrangem todas as etapas dos processos de fabricação e peculiaridades de produtos químicos. São eles: segurança de processos, saúde e segurança do trabalhador, transporte e distribuição, diálogo com a comunidade incluindo a preparação e o atendimento às emergências, o gerenciamento do produto e a proteção ambiental.

Temos, no Brasil, órgãos ambientais em duas esferas. No âmbito federal: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA); e no estadual: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) com atuação no Estado de São Paulo, Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) com atuação no Estado do Rio de

Janeiro, Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) no Estado de Minas Gerais, dentre outros. Todos estes programas foram criados a fim de atuar na conscientização ao respeito à legislação ambiental e para fiscalizar as atividades industriais. São órgãos ambientais que desenvolvem também diversas atividades no referente à preservação e à conservação do patrimônio natural, exercendo o controle e a fiscalização sobre o uso dos recursos naturais e as atividades industriais [3].

As empresas, diante desta pressão social em benefício do meio ambiente, passaram a reavaliar as suas atividades e os seus processos internos, basicamente, nos seguintes pontos [4]:

- a) os procedimentos industriais são adaptados a códigos de conduta como os do Programa Atuação Responsável e/ou ao guia de requisitos para o gerenciamento ambiental de acordo *International Standards Organization* (ISO), da norma ISO 14001 [5]. Em ambas as alternativas o objetivo é implantar uma correta disciplina operacional.
- b) os equipamentos envolvidos nos processos recebem sistematicamente manutenções preventivas e preditivas a fim de que não ocorra, por exemplo, vazamentos de efluentes líquidos para o solo ou subsolo, emissões atmosféricas fora dos padrões legalmente estabelecidos. Estas ações, também, muito contribuem para preservação do meio ambiente.
- c) o desenvolvimento de novos materiais que sejam compatíveis com o meio ambiente. Temos, como exemplo, os polímeros biodegradáveis que permitem produzir embalagens que se decompõem no meio ambiente.
- d) o aprimoramento da cultura dos empregados, das comunidades vizinhas, e até dos clientes e fornecedores de referidas empresas, com investimentos em programas de treinamentos, assistência técnica aos clientes e campanhas publicitárias com enfoque ambiental favorecendo o fortalecimento da marca e, por conseguinte, da imagem da empresa.
- e) a modernização dos processos produtivos, tornando-os harmonizáveis ao meio ambiente: substituição de matérias-primas por outras menos agressivas, visando à redução e até eliminação da manipulação de produtos que afetem significativamente o conjunto das condições naturais e de influências que atuam não somente sobre os seres humanos, mas também sobre todos os organismos vivos.

Como todos os processos industriais, os métodos específicos de eliminação de poluentes, também geram resíduos, como por exemplo, o tradicional “tratamento por lodo ativado” que em suas operações gera resíduo sólido em grande volume, de toxidez elevada.

Portanto, à luz dessa nova visão empresarial, necessário se faz desenvolver alternativas para o descarte final do resíduo sólido do tratamento de efluentes.

As empresas precisam, para atender a essas exigências ambientais, cada vez mais restritivas, despender maiores investimentos, que, em consequência, atingem maiores custos operacionais. Quando se trata de processo fabril, o empenho para investir é mais notório; todavia, não o é para o descarte em si. Há, também, hoje em dia, uma tendência à terceirização do trabalho de eliminação dos resíduos, aos especialistas pelas empresas, visando reduzir esse custo.

As empresas prestadoras de serviço de remoção e descarte de resíduos sólidos são as que oferecem às indústrias a alternativa de atenderem às exigências ambientais, sem que precisem investir em instalações de tratamento e descarte de resíduos. Mas, em contrapartida, cobram um preço alto pelo serviço prestado, mas proporcional à natureza e à quantidade do resíduo a ser descartado adequadamente.

Os custos de descarte dos rejeitos e resíduos são preponderantemente determinados pela toxidez do resíduo gerado. São custos operacionais para estocar estes resíduos de acordo com padrões ambientalmente adequados, de transporte e, da tecnologia final de descarte. Não podemos deixar de mencionar os custos contingenciais, que são oriundos de acidentes ou reclamações, que em alguns casos, transformam-se em custos permanentes e que podem impedir negativamente todas as atividades da empresa.

O descarte criterioso e ecologicamente correto, no atual momento, por todos estes fatores citados, aumenta, e em muito, o custo de fabricação dos produtos. As empresas que no passado adotavam descartes incorretos, isto é, jogavam este resíduo diretamente no meio ambiente, não dispunham deste componente em seus custos; por isso, seu custo operacional era mais baixo. Por outro lado, cria-se, assim, a oportunidade de inovar, desenvolvendo novas alternativas de tratamento de resíduos, focados na redução dos custos do descarte final ambientalmente adequado. À guisa de exemplo: o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, de acordo com a Resolução CONAMA n. 375, de 29 de agosto de 2006, que define critérios e procedimentos adequados para descarte [6].

É neste panorama, que se insere o presente tema de dissertação, isto é, com uma proposta de redução dos custos operacionais relativos ao pré-descarte de resíduos sólidos gerado em unidades de tratamento de efluentes por "lodo ativado" das indústrias em geral.

O objetivo é desenvolver um processo incentivado por microondas para pré-tratamento do resíduo das Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) por lodo ativado para o seu descarte final. Este processo apresentou um custo operacional final inferior ao do descarte convencional. Basicamente, consistiu em estabelecer as condições de uma secagem com microondas do resíduo sólido, promovendo a eliminação de água livre e água ligada, além de decompor parte da matéria orgânica presente no resíduo a ser descartado.

2. TRATAMENTO POR LODO ATIVADO

O tratamento por lodo ativado é um processo biológico para purificação de esgotos domésticos e efluentes líquidos industriais onde a matéria orgânica na presença de oxigênio dissolvido, sob agitação mecânica, é consumida pela ação de microorganismos específicos. Os microorganismos consomem a matéria orgânica, gerando o “lodo ativado” ou “lodo biológico”. Em virtude do crescimento da colônia de microorganismos consegue-se a remoção ou a diminuição do teor de matéria orgânica biodegradável presente nos efluentes [7 e 8].

2.1. Vantagens e desvantagens do tratamento do lodo ativado

O tratamento de lodo ativado é utilizado, preferencialmente, em situações onde se exige uma elevada qualidade do efluente tratado, e onde a disponibilidade de área é limitada, ou, então, quando o tratamento visa eliminar produtos específicos como os compostos de nitrogênio, de fósforo, e fenólicos. Isto é possível porque determinadas cepas de microorganismos, desenvolvidos para esta aplicação, podem metabolizar estes e outros produtos.

O tratamento de lodo ativado, no entanto, requer um alto índice de mecanização, bem superior ao de outros sistemas de tratamento de efluentes, implicando, dessa maneira, em uma operação mais complexa. Assim, suas duas grandes desvantagens são: o consumo de energia elétrica para a aeração do meio em processamento e a grande produção de lodo residual [9,10 e 11].

2.2. Funcionamento do tratamento básico do lodo ativado

As operações de uma unidade de tratamento de efluentes por lodo ativado, essencialmente (Figura 1), são as seguintes:

- a) Gradeamento – através de uma grade faz-se a retenção de materiais de grandes dimensões que são arrastados pelo efluente líquido.
- b) Arenação – basicamente, é feita, por meio de uma caixa de areia, a remoção de areia contida no efluente líquido.
- c) Medição da vazão – a medição da vazão do efluente líquido é realizada em um equipamento denominado Calha Parshall. Ela apresenta baixa perda de carga, e oferece precisão para a leitura da vazão [13].

- d) Decantação primária – por meio do decantador primário é efetuada a remoção do resíduo sedimentável do efluente líquido, como gordura e óleos diversos.
- e) Reação – o material de saída do decantador primário, que em essência é efluente líquido com carga orgânica dissolvida, entra no reator, e juntamente com uma injeção de ar, nutrientes e agitação, propicia o desenvolvimento de microorganismos do lodo ativado.
- f) Decantação secundária – desenvolve-se a sedimentação no decantador secundário para a remoção de sólidos (flocos de lodo ativado).
- g) Prensagem do lodo – a prensagem do lodo é feita através de filtro prensa que tem como principal finalidade a separação física do resíduo sólido do líquido, concentrando assim o resíduo de lodo [15].
- h) Estocagem do lodo – o lodo retido no filtro prensa é retirado e disposto em um tanque de estocagem.
- i) Reciclo do lodo – em todos os processos citados acima o efluente líquido que é retirado do filtro prensa, é bombeado para retorno ao sistema.
- j) Descarte do efluente líquido – caso o efluente líquido tratado não tenha aproveitamento posterior e esteja nos padrões para emissão final, ele é descartado para o corpo receptor.

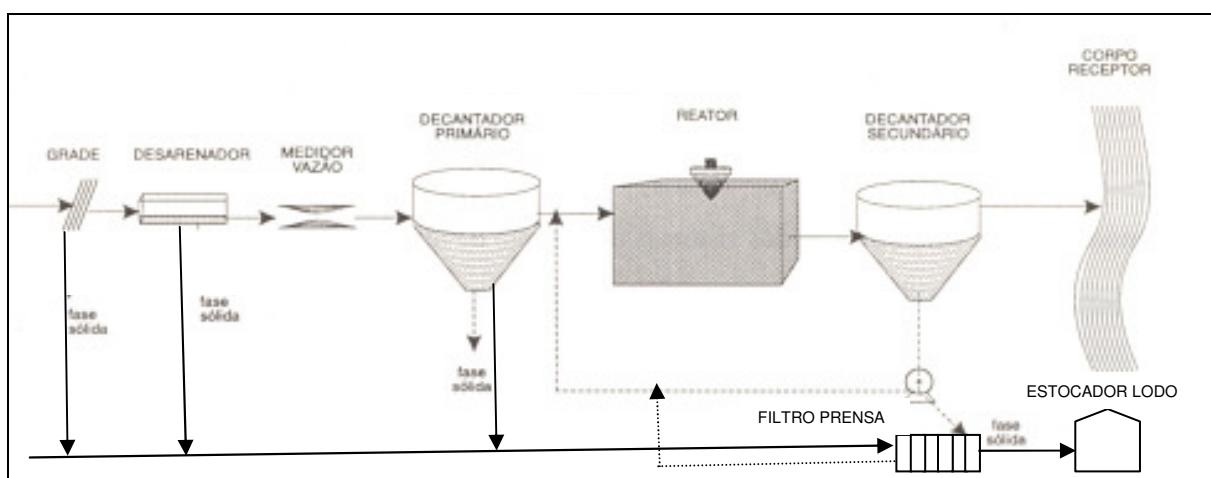


FIGURA 1 - ESQUEMA DE UMA UNIDADE DE TRATAMENTO DE LODO ATIVADO [10]

O processo de tratamento por lodo ativado (Figura 1) propriamente dito, consiste na degradação do substrato orgânico. Esta degradação ocorre na etapa bioquímica, realizada no tanque de aeração (reator), e no tanque de sedimentação (decantador secundário). As reações bioquímicas de digestão da matéria orgânica que proporcionam

uma redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ocorrem no reator aerado, isto é, a carga dos poluentes orgânicos constitui parte do substrato para os microorganismos. No decantador secundário ocorre a sedimentação dos sólidos (biomassa), permitindo que o efluente tratado saia límpido. A biomassa é separada no decantador secundário em razão de sua propriedade de flocular e de sedimentar. Tal se deve à produção de uma matriz gelatinosa, que permite a aglutinação das bactérias, dos protozoários e de outros microrganismos, responsáveis pela remoção da matéria orgânica, em flocos macroscópicos.

Os flocos possuem dimensões bem superiores às dos microrganismos, individualmente, o que facilita a sedimentação. A representação esquemática de um f�oco de lodo ativado é mostrada na Figura 2 [10]. Uma parte dos sólidos sedimentados no fundo do decantador secundário é recirculada para o reator, servindo de inóculo a fim de retroalimentar o processo. Uma maior concentração de biomassa no material sedimentado potencializa uma maior eficiência do tratamento do lodo [10].

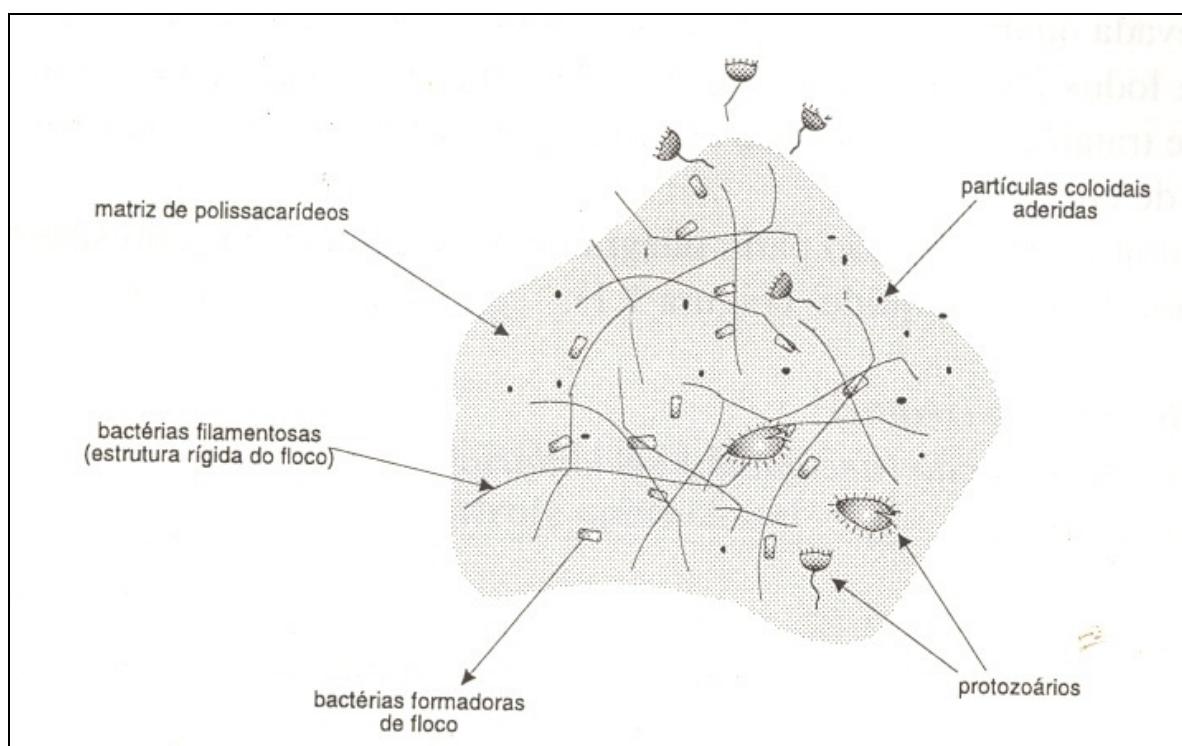


FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM FÔCO DE LODO ATIVADO [10]

Em virtude da recirculação do lodo, a concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração, no tratamento de lodos ativados, é bastante elevada quando comparado a uma lagoa de mistura completa, sem recirculação. O tempo de retenção do líquido (tempo de retenção hidráulica) é baixo [10], da ordem de horas, implicando na redução do volume do reator. No entanto, por causa da recirculação dos sólidos, estes permanecem no sistema por um tempo superior ao do líquido. O tempo de retenção dos sólidos é denominado de “tempo de retenção celular” ou de “idade do lodo”, e é definida como a relação entre a

quantidade de lodo biológico existente no reator e a quantidade de lodo biológico removida do tratamento de lodo ativado por dia. Este tempo maior de permanência dos microorganismos no sistema, permite garantir uma elevada eficiência do tratamento de lodo ativado, já que a biomassa possui tempo suficiente para metabolizar praticamente toda a matéria orgânica dos efluentes.

Na condição de alimentação contínua e reciclo total do lodo, os microrganismos crescem e se reproduzem continuamente. Conseqüentemente, a população dos mesmos aumenta até atingir concentrações onde a aeração fica insuficiente; e nesta condição ocorre a mortandade dos microorganismos. Outro senão é que os sólidos não mais sedimentando satisfatoriamente, são arrastados pelo efluente final, deteriorando a qualidade final do efluente tratado. Para manter o sistema em equilíbrio, é necessário que se retire, aproximadamente, a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução. Este lodo biológico excedente pode ser extraído diretamente do reator ou da linha de recirculação. O lodo excedente, antes de ser descartado, deve receber cuidado adicional na linha de tratamento do lodo, usualmente compreendendo digestão, adensamento, lixiviação e desidratação [10].

Na remoção de coliformes e de outros organismos patogênicos, em virtude dos diferentes tempos de retenção nas unidades do tratamento de lodo ativado, tem-se uma baixa eficiência e, usualmente, é insuficiente para atender aos requisitos de qualidade dos corpos receptores. Esta baixa eficiência é típica também de outros processos compactos de tratamento de efluentes. Caso necessário, o efluente deve ser submetido a uma etapa posterior de desinfecção. Em razão da melhoria da qualidade do efluente, a demanda de cloro para desinfecção é pequena: a adição de uma concentração de poucos miligramas por litro de cloro, ou seus derivados, após poucos minutos, é suficiente para eliminação quantitativa de patógenos. A adição do desinfetante não tem efeito significativo sobre os custos de tratamento. Todavia, sempre se deve ter em mente os problemas potenciais dos organoclorados resultantes da pós-cloração.

Devemos destacar ainda que os tratamentos por lodo ativado podem ser integrados a outros tratamentos, tais como filtros biológicos e reatores anaeróbicos. Neste último caso, os sistemas constituídos por reatores, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) – anaeróbicos com fluxo ascendente e cobertura do esgoto, seguidos por lodos ativados para remoção de nutrientes e de adicional de DBO e sais solúveis, vêm ganhando importância relevante. Os reatores UASB substituem os decantadores primários, efetuando a remoção de grande parte da DBO e dos sólidos dos efluentes a montante do reator, permitindo um sistema com menos quantidade de lodos ativados, com menor consumo de energia e, por conseguinte, menor produção de lodo excedente.

2.3. Tipos de tratamento por lodo ativado

Existem diversas variantes do processo de lodos ativados; entretanto, destacamos apenas as principais e mais utilizadas [10 e 11]:

- a) Classificação quanto à idade do lodo:
 - lodos ativados convencional;
 - aeração prolongada;
- b) Classificação quanto ao fluxo:
 - fluxo contínuo;
 - fluxo intermitente (batelada).

2.3.1. Classificação dos Lodos Ativados quanto à Idade do Lodo

Os sistemas de lodos ativados podem ser classificados, em função da idade do lodo, em uma das seguintes principais categorias como mostram a Tabela 1.

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS TRATAMENTOS EM FUNÇÃO DA IDADE DO LODO

Idade do lodo	Carga de DBO aplicada por unidade de volume	Faixa de idade do lodo	Denominação usual
Reducidíssima	Altíssima	Inferior a 3 dias	Aeração modificada
Reduzida	Alta	4 a 10 dias	Lodos ativados convencional
Intermediária	Intermediária	11 a 17 dias	---
Elevada	Baixa	18 a 30 dias	Aeração prolongada

FONTE [10]

Os tratamentos de lodo ativado mais utilizados são os de lodo ativado convencional e os de aeração prolongada. Os sistemas de reducidíssima idade do lodo são ainda pouco utilizados no Brasil, e apresentam maior aplicação em outros países como nos Estados Unidos. Tais sistemas recebem a inespecífica designação de aeração modificada nos textos americanos [10].

Os sistemas com idade do lodo intermediária não apresentam vantagens para a sua utilização por possuírem uma carga intermediária de DBO aplicada por unidade de volume [10]. Os sistemas de fluxos intermitentes podem ter a idade do lodo tanto convencional quanto prolongada, embora a segunda alternativa seja a mais freqüente.

2.3.2. Classificação dos Lodos Ativados quanto ao Fluxo Contínuo (Convencional) e Fluxo Intermítente (Batelada)

No tratamento convencional, para se economizar energia para aeração, parte da matéria orgânica em suspensão e sedimentável dos esgotos é retirada antes do tanque de aeração, através do decantador primário, conforme apresentado na Figura 1 [10].

A idade do lodo, no sistema convencional, é usualmente da ordem de quatro a dez dias, e o tempo de retenção hidráulica no reator, da ordem de seis a oito horas. Com essa idade do lodo, a biomassa retirada do sistema no lodo excedente requer ainda uma etapa de estabilização no tratamento do lodo, por conter ainda um elevado teor de matéria orgânica em processo metabolizado nas suas células.

Nos casos de tratamento de lodos ativados com elevada carga de DBO, por unidade de volume do reator, o tratamento é similar conceitualmente ao lodo ativado convencional; contudo, no geral é denominado por *aeração modificada ou lodos ativados de altíssima carga*. Possui as mesmas unidades do tratamento convencional. No entanto, por causa das maiores cargas aplicadas, os volumes das unidades são menores, implicando em economias do ponto de vista de custo de implantação, mas, exigindo uma maior atenção ao controle da operação.

Os sistemas por lodos ativados descritos acima são de fluxo contínuo com relação ao efluente líquido, ou seja, o efluente líquido está sempre entrando e saindo do reator. Há uma variante do sistema lodo ativado, com operação intermitente.

O princípio do processo de lodos ativados com operação intermitente consiste na realização de todos os processos e operações normalmente associadas ao tratamento convencional de lodo ativado, quais sejam: decantação primária, oxidação biológica e decantação secundária em um único tanque. Utilizando um tanque único, esses processos e operações passam a ser simplesmente seqüências no tempo, e não operações separadas como ocorre nos processos convencionais de fluxo contínuo, conforme descrito anteriormente. O processo de lodos ativados de fluxo intermitente (Figura 3) pode ser utilizado tanto na modalidade de permanência convencional quanto na de permanência prolongada. Nesta última, o tanque único passa a incorporar também a unidade de digestão de lodo.

O processo intermitente baseia-se em um reator de mistura completa onde ocorrem todas as etapas do tratamento. Isso é conseguido através do estabelecimento de ciclos de operação com durações definidas. A massa biológica permanece no reator durante todos os ciclos, eliminando dessa forma a necessidade de decantadores separados.

Os ciclos normais de tratamento são:

- enchimento (entrada de efluente bruto ou decantador no reator);

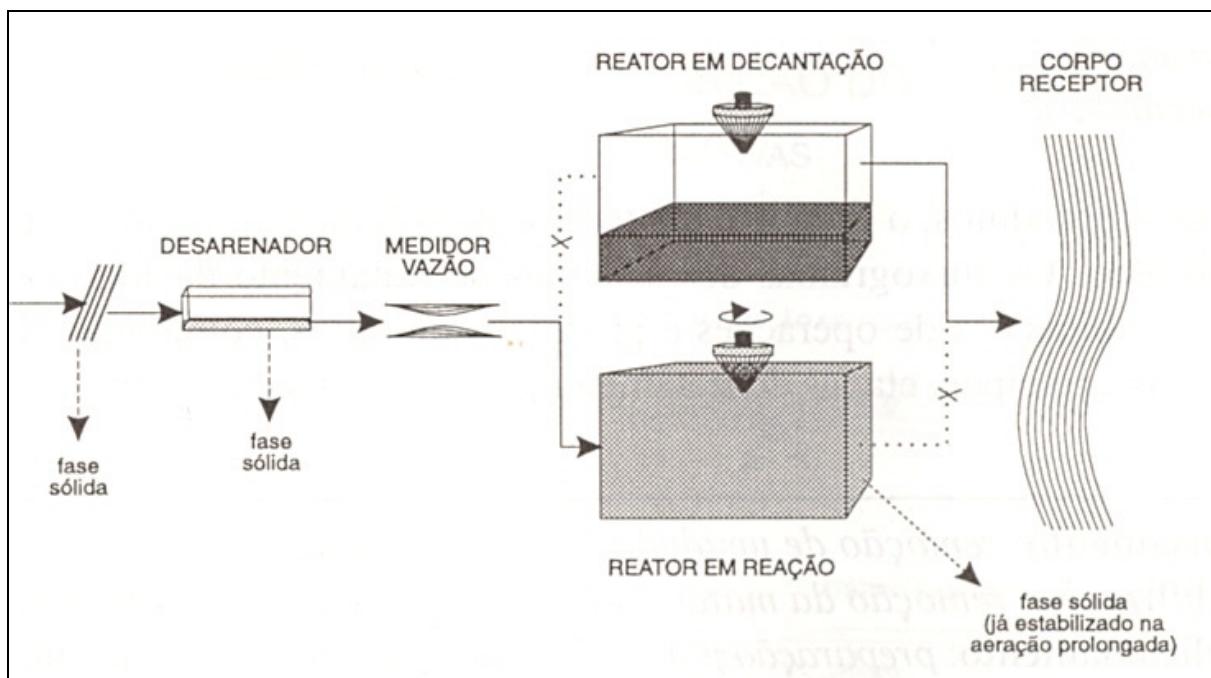


FIGURA 3 – LODOS ATIVADOS COM FLUXO INTERMITENTE [10]

- b) reação (aeração/mistura da massa líquida contida no reator);
- c) sedimentação (sedimentação e separação dos sólidos em suspensão do esgoto tratado);
- d) esvaziamento (retirada do efluente tratado no reator);
- e) repouso (ajuste de ciclos e remoção do lodo excedente).

A duração usual de cada ciclo pode ser alterada em função das variáveis da vazão de entrada, das necessidades do tratamento e das características do esgoto e da biomassa do sistema.

2.4. Descarte do lodo residual

O descarte do lodo excedente geralmente ocorre durante a última etapa (repouso); mas, como ela é opcional, já que a sua finalidade é a de permitir o ajuste entre os ciclos de operação de cada reator, o descarte pode se dar entre outras fases do processo.

Independentemente do tipo de tratamento de lodo ativado a ser utilizado e que foi anteriormente descrito, haverá uma geração de lodos residuais na forma pastosa, com mais de 90% de água [16] e que deverá passar pelas etapas de estocagem, transporte e destinação ambientalmente adequada, ou seja, respeitando no mínimo os requisitos legais.

Existem, para a borra resultante do tratamento por lodo ativado, duas possibilidades de descarte final deste lodo residual: a oxidação úmida (o uso como biofertilizante) [18] e a incineração.

A oxidação úmida é um processo de tratamento com ultravioleta e com o reativo de Fenton, isto é, com pequenas quantidades de sulfato ferroso e água oxigenada.

O biofertilizante normalmente apresenta elementos químicos como nitrogênio, fósforo e potássio na forma de produtos químicos assimiláveis por plantas e em dosagem adequada que possam ser usados diretamente na adubação de plantações. Porém, nem todo lodo residual pode ser utilizado como biofertilizante, por motivos de contaminação com metais pesados ou compostos cancerígenos [6].

A incineração é o processo de combustão à chama indireta; opera em altas temperaturas, e normalmente é utilizado para a destruição de materiais, com geração de fumos e cinzas [19]. Na incineração, a prestação desse serviço é remunerada e o custo para tal processo depende da composição dos materiais e da quantidade do resíduo encaminhado para o descarte final.

O lodo residual é material celular e possui em sua composição alta porcentagem de água. O lodo residual do presente estudo é, atualmente, lixiviado e encaminhado diretamente para incineração, em fornos de cimenteiras. Mesmo após a lixiviação deste lodo, o seu resíduo ainda continua com uma alta porcentagem de água em sua composição [20]. Diante deste panorama, propõe-se a secagem por microondas do lodo residual como etapa de pré-descarte, com a finalidade de diminuir o peso de material a incinerar.

3. SECAGEM

3.1. Conceito de secagem

O conceito de secagem pode ser entendido como sendo a operação de remoção de líquidos (freqüentemente, água) de sólidos, por métodos térmicos que permitam a vaporização do líquido em temperaturas inferiores à sua temperatura de ebulação com o auxílio de uma fase gasosa não saturada neste líquido (ar seco). Quando ocorre a remoção da água quimicamente ligada ao substrato submetido à secagem, a operação recebe o nome de desidratação [21, 22 e 23].

3.2. Secagem

Na operação de secagem, têm-se quatro variáveis: pressão, temperatura, concentração de água na fase gasosa (umidade do ar) e concentração de água na fase sólida (umidade do material a ser secado). A umidade é o teor de água em um corpo que expressa a quantidade de líquido por unidade de peso ou de volume do sólido, e pode ser referida à base seca ou à base úmida [21, 22 e 23].

O material a secar pode apresentar tanto água livre (umidade livre) como água ligada (umidade ligada). A umidade livre é o teor de líquido que se pode remover a uma dada condição de temperatura e umidade do ar de secagem. A umidade ligada é aquela onde o líquido exerce uma pressão de vapor inferior à pressão do líquido puro na mesma condição de temperatura. Esta redução de pressão pode ser ocasionada por retenção em capilares, solução homogênea no sólido, adsorção, solução em células ou paredes de fibras.

Ao analisarmos um material higroscópico, a umidade não ligada é a umidade acima da umidade de equilíbrio correspondente a uma condição de umidade de saturação do ar de secagem. Para materiais não higroscópicos, todo líquido presente é umidade não ligada.

A eficiência da secagem dos materiais em geral depende dos seguintes fatores: distribuição da umidade inicial no material, do fluxo capilar, dos estados pendular e funicular do líquido nos poros do material e da velocidade de secagem. A distribuição da umidade inicial refere-se ao perfil de distribuição de umidade no sólido, no início da secagem.

O estado pendular é o estado do líquido nos poros de um sólido, quando não mais existe um filme de líquido ao redor e entre partículas discretas de forma que o fluxo capilar não possa mais ocorrer. Ele antecede ao estado funicular, e este é a condição de

secagem de materiais porosos, onde a sucção capilar resulta na sucção de ar para os poros. Já o fluxo capilar é o fluxo de líquido nos interstícios ou superfícies ocasionado pela atração molecular entre líquido e sólido. A difusão interna ocorre quando a fase móvel obedece às leis de difusão.

3.3. O fenômeno da secagem

Na secagem de um sólido acontecem dois fenômenos simultaneamente: o da transferência de calor para evaporar o líquido, e o da transferência de massa como líquido evaporado e umidade interna. A transferência de massa na secagem ocorre com o líquido e/ou vapor dentro do sólido, e o vapor na superfície úmida.

A forma como sucede a secagem é definida pelo mecanismo interno com que o líquido flui dentro do sólido, e pelas condições externas como temperatura, umidade, vazão de ar, citadas anteriormente e da granulometria do sólido.

3.3.1. Mecanismo interno de fluxo do líquido versus variáveis externas

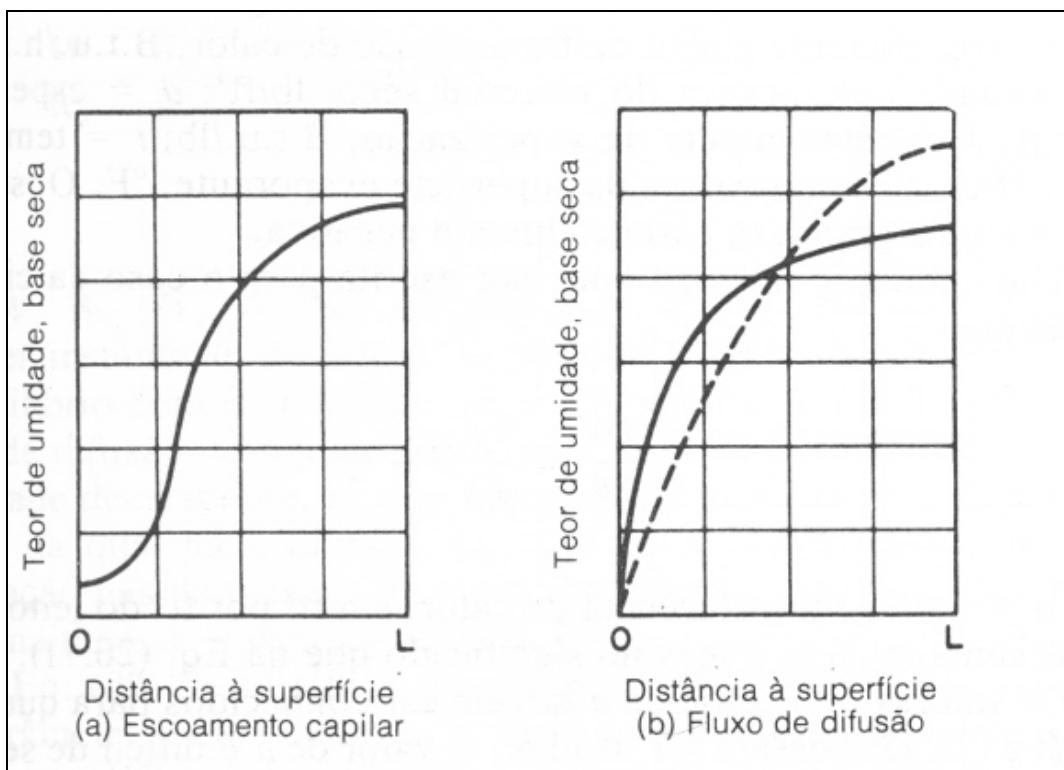
Dependendo da estrutura do sólido, podem ocorrer vários mecanismos, tais como:

- a) difusão em sólidos contínuos e homogêneos;
- b) fluxo capilar em sólidos porosos ou granulados;
- c) fluxo em virtude da contração e de gradientes de pressão;
- d) fluxo em razão da gravidade;
- e) fluxo causado por vaporização/condensação.

Durante as diferentes fases da secagem, é comum um destes mecanismos predominarem sobre os outros, como também, haver alteração de mecanismo predominante.

Estudos experimentais estabeleceram modelos das curvas da Figura 4, onde se pode ver que: a) o fluxo capilar é por causa do gradiente de umidade e apresenta dupla curvatura e um ponto de inflexão (Figura 4a); b) o fluxo de difusão é representado por uma curva suave como se pode prever das equações de difusão; mas, a curva experimental (Figura 4b – linha sólida) afasta-se um pouco da teórica (Figura 4b – linha tracejada) provavelmente em razão da difusividade não ser constante como se costuma assumir.

O conhecimento do mecanismo interno de secagem é muito importante, especialmente quando se busca analisá-la; entretanto, a determinação experimental de tais dados apresenta dificuldades. Por esse motivo, é muito mais comum estudar a secagem em função de variáveis externas como temperatura do ar, umidade do ar, vazão de ar,



granulometria do sólido, movimentação do sólido, forma de suportar o sólido, contato entre as superfícies quentes do secador com o sólido úmido.

3.3.2. *Etapas da secagem*

A Figura 5 exibe uma curva experimental típica de secagem, onde AB apresenta uma pequena concavidade, BC é um segmento de reta e CD mostra uma convexidade. Estes dados são derivados para obter a velocidade de secagem.

Com essas velocidades de secagem são construídas as Figuras 6 e 7. Na Figura 6, temos a velocidade de secagem em função do tempo de secagem; observa-se um trecho AB de aumento de velocidade de secagem, onde o material começa a ser aquecido no início; um trecho BC onde a velocidade é constante, um trecho CD com a velocidade decrescente. O ponto C corresponde à umidade crítica.

Na Figura 7, a velocidade de secagem é expressa em função da umidade instantânea do sólido. Observa-se, analogamente, um trecho côncavo AB de início do processo de secagem; um trecho BC de velocidade constante; e um trecho CD de velocidade decrescente.

O trecho AB representa um período transitório, em que a carga sofre aquecimento para atingir as condições de secagem, por não apresentar grande influência,

não costuma ser considerada.

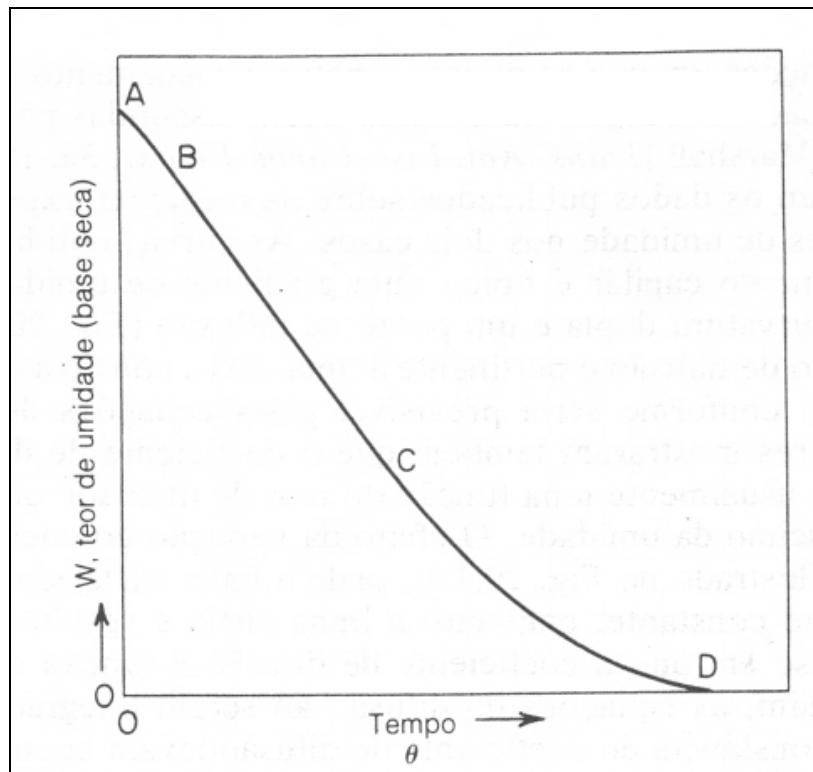


FIGURA 5 - CURVA EXPERIMENTAL DE SECAGEM [21]

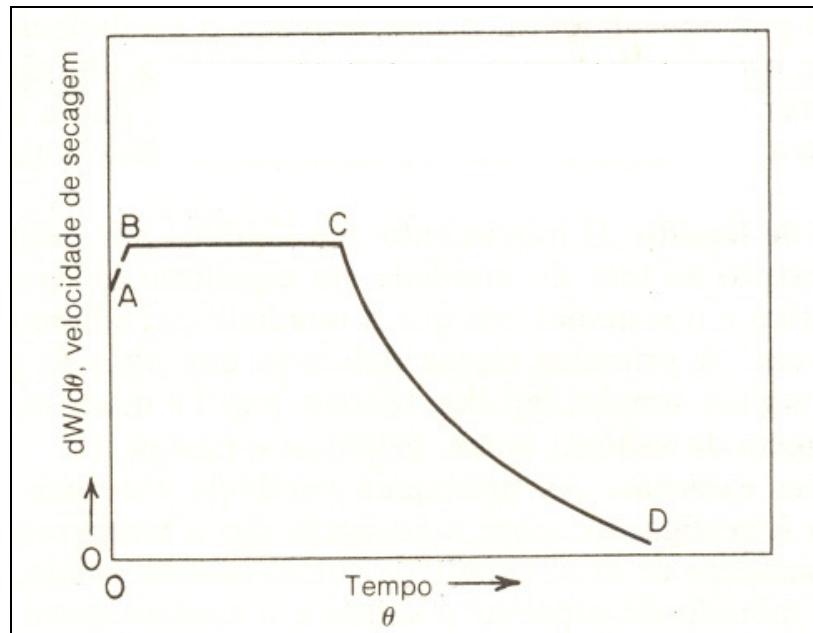


FIGURA 6 - CURVA DE VELOCIDADE DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM

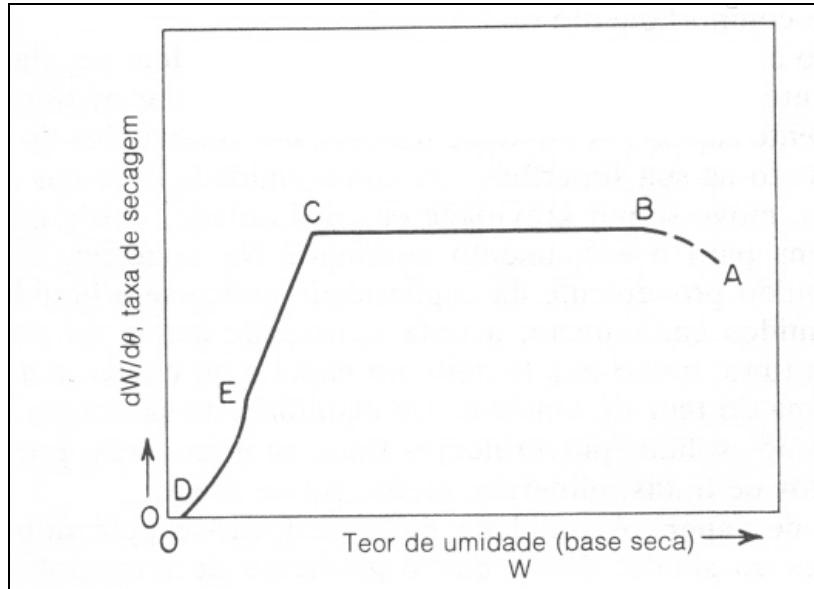


FIGURA 7 - CURVA DE VELOCIDADE DE SECAGEM EM FUNÇÃO DA UMIDADE INSTANTÂNEA DO SÓLIDO

3.3.3. Período de velocidade de secagem constante

O trecho BC da Figura 7, de velocidade constante de secagem, corresponde ao período em que há a evaporação da água livre (não ligada) da superfície do sólido. Aqui a velocidade independe das características do sólido, e é equivalente à velocidade de evaporação do líquido nas mesmas condições operacionais, ou seja, a velocidade é controlada pela difusão do líquido via vapor no ar de secagem. Neste caso há a tendência de a temperatura da superfície do sólido manter-se constante. Se houver apenas a condução de calor por convecção (gás/líquido), essa temperatura será próxima à da temperatura de bulbo úmido. Se houver influência de transmissão de calor por condução ou radiação, além da convecção, essa temperatura oscilará entre a de bulbo úmido e a do ar de secagem. Nesta segunda condição, a velocidade de secagem é maior que na convecção pura. Caso a troca térmica por condução seja maior que a da convecção, pode-se atingir a temperatura de ebulição do líquido, tornando a secagem muito mais rápida.

Supondo que apenas o mecanismo de aquecimento por convecção (do gás seco quente para o sólido úmido) seja presente, no trecho de velocidade constante de secagem, estabelece-se um equilíbrio entre a transferência de calor e a de massa:

$$dw/d\theta = h_t \cdot A \cdot \Delta t / \lambda \quad (1)$$

onde: $dw/d\theta$ é a velocidade de secagem (kg liq./hr); h_t é o coeficiente global de troca térmica ($\text{kcal/hr.m}^2.\text{°C}$); A é a área de transferência de calor/evaporação (m^2); Δt é a diferença entre as temperaturas da superfície ($t_s, \text{ °C}$) e a do ar ($t_a, \text{ °C}$); e λ é o calor latente

do líquido (kcal/kg).

O coeficiente global ht efetivamente, é a soma do coeficiente de convecção (hc) e do coeficiente de radiação (hr).

A velocidade do ar influí sobre o valor de hc da seguinte forma:

$$h_c = 0,0128 \cdot G^{0.8} \quad (2)$$

onde G é a velocidade mássica do ar ($\text{kg}/\text{hr} \cdot \text{m}^2$).

Dessa forma, para o caso em que o efeito da radiação é insignificante, temos, durante o período de velocidade de secagem constante a seguinte fórmula:

$$dw / d\theta = 0,0128 \cdot G^{0.8} \cdot A \cdot \Delta t / \lambda \quad (3)$$

ou em termos mássicos:

$$dw / d\theta = 0,0128 \cdot G^{0.8} \cdot A \cdot \Delta t / \lambda \cdot \delta_s \cdot L \quad (4)$$

onde L é a espessura da camada de sólido (m) e δ_s é a densidade do sólido (kg/m^3).

3.3.4. Período de velocidade decrescente

O trecho CD inicia-se no ponto em que se atinge a umidade crítica (fim do período de velocidade de secagem constante) e pode ser dividido em duas regiões:

- a) região de secagem de superfície não saturada: ocorre logo depois de atingida a umidade crítica e a redução de velocidade de secagem é em razão do surgimento de áreas secas na superfície do sólido, isto é, quando a área de evaporação é reduzida. É o trecho linear CE da Figura 7.
- b) região onde o controle da velocidade é do fluxo interno de líquido: é trecho ED da Figura 7. Costuma ser a etapa mais demorada da secagem, quando se desejam baixos valores de umidade final. Aqui ocorrem os mecanismos de difusão, capilaridade e gradiente de pressão por causa da contração.

Neste período, a velocidade de secagem pode ser representada por:

$$dW / d\theta = - (\pi^2 \cdot D / 4 \cdot L^2) \times (W - W_e) \quad (5)$$

onde $dW/d\theta$ é a velocidade de secagem ($\text{kg}/\text{hr} \cdot \text{kg}$ material seco); W é a umidade instantânea ($\text{kg líquido}/\text{kg sólido seco}$); W_e é a umidade de equilíbrio nas condições de

secagem (kg líquido/kg sólido seco); D é a difusibilidade do líquido no sólido (m^2/hr); e L é a espessura da camada de sólido.

3.3.5. Estimativa do Tempo de Secagem

Para obtermos a estimativa do tempo de secagem, é preciso que definamos o trecho em que o regime de velocidade é constante e decrescente. As equações (6) e (7) apresentam este cálculo, com base nas considerações anteriores:

$$\theta_t = \theta_c + \theta_f = \{[(W_0 - W_c) \cdot \rho_s \cdot \lambda \cdot d] / h_t \cdot [(t - t'_s)_m] + \\ + [(W_c - W_e) \cdot \rho_s \cdot \lambda \cdot d] / h_t \cdot [(t - t'_s)_m]\} \ln [(W_c - W_e) / (W_t - W_e)] \quad (6)$$

sendo,

θ_t = tempo total de secagem, h;

θ_c = tempo de secagem durante o período à velocidade constante, h;

θ_f = tempo de secagem durante o período à velocidade descrente, h;

W_0 = teor de umidade inicial, lb de água/lb de sólido seco;

W_c = teor de umidade crítica, lb de água/lb de sólido seco;

W_e = teor de umidade no equilíbrio, médio, lb de água/lb de sólido seco;

W_t = teor de umidade médio no instante θ_t , lb de água/lb de sólido seco;

d = profundidade do material na bandeja, ft;

λ = calor latente de vaporização na temperatura t'_s , B.t.u./lb;

ρ_s = densidade volumétrica do sólido seco, lb/ft³;

$(t - t'_s)_m$ = média diferença de temperatura, sendo t a temperatura do ar e t'_s a temperatura do sólido, °F;

h_t = coeficiente de transmissão total de calor, B.t.u. / h.ft². °F.

$$\theta_t = B \cdot \{[(W_0 - W_c) / (W_c - W_e)] + \ln [(W_c - W_e) / (W_t - W_e)]\} \quad (7)$$

$$\text{onde } B = \{[(W_c - W_e) \cdot \rho_s \cdot \lambda \cdot d] / h_t \cdot [(t - t'_s)_m]\} = 1/K_1 \quad (8)$$

Os valores de determinados coeficientes da equação acima são definidos para cada uma das substâncias, como o calor latente de vaporização, o volume específico; com o seu valor inverso obtém-se, a densidade volumétrica, e podem ser obtidos em Tabelas.

3.4. Secadores [21]

Os secadores, que são os equipamentos que permitem realizar a secagem, podem ser classificados de diversas formas. As duas classificações mais úteis baseiam-se no método de transferência de calor para os sólidos úmidos; nas características de manipulação e nas propriedades físicas do material úmido. O primeiro método de classificação revela diferenças nos modelos e operações dos secadores, enquanto o segundo método é mais útil na escolha de um grupo de secadores para a consideração preliminar de um dado problema de secagem.

As classes por transferência de calor são:

- a) os secadores de aquecimento direto – para esta classe de secadores, o calor necessário para a secagem, é fornecido pelo contato direto do gás quente com o material úmido. O líquido vaporizado é retirado pelo próprio gás quente. Em virtude fato do mecanismo principal de transferência de calor ser por convecção, os secadores pertencentes a esta classe, são também chamados de secadores por convecção.
- b) os secadores de aquecimento indireto – para esta classe de secadores, o calor necessário para a secagem, é fornecido indiretamente através do contato com uma superfície quente. O líquido vaporizado é removido independentemente do meio de aquecimento, ou seja, pela transferência de calor por condução da parede/sólido dentro do sólido. A velocidade de secagem depende do contato do material úmido com superfícies quentes. Em razão destas características os secadores com aquecimento indireto são também chamados de secadores por condução ou contato.
- c) os secadores aquecidos com calor radiante ou infravermelho e os secadores aquecidos dielectricamente – a operação com secador por calor radiante depende da geração, da transmissão e da absorção dos raios infravermelhos. Os secadores dielétricos são os que operam por aquecimento dentro do material, quando colocados em um campo elétrico de alta freqüência como nos secadores por radiofreqüência e por microondas.

Certos secadores podem operar através de uma combinação do aquecimento direto e indireto [21 e 25]. Os secadores podem ser classificados quanto à operação em contínuos e descontínuos.

A escolha do equipamento de secagem deve ser efetuada incluindo, também alguns critérios. A seguir destacamos os principais [21]:

- a) Propriedade do material a secar:

- Características físicas (higroscópico) quando material úmido.
- Características físicas (% de finos) quando o material seco.

- Compatibilidade com o material do equipamento para que seja minimizada a erosão.
 - Toxidez.
 - Inflamabilidade.
 - Dimensão da partícula.
 - Abrasividade.
- b) Características de secagem do material:
- Tipo de umidade (ligada, não-ligada ou ambas).
 - Teor de umidade inicial.
 - Teor de final de umidade (máximo).
 - Temperatura de secagem admissível.
 - Tempo provável de secagem para os diferentes secadores.
- c) Escoamento do material para o secador e para o seu interior:
- Quantidade manipulada por unidade de tempo.
 - Operação contínua ou descontínua.
 - Processo antes e depois da operação de secagem.
- d) Qualidade do produto:
- Contaminação.
 - Uniformidade do teor final de umidade.
 - Secagem em excesso.
- e) Sensibilidade térmica:
- Contração.
 - Estado de subdivisão.
 - Densidade média.
- f) Dificuldades para a recuperação de:
- Poeira.
 - Solvente.
 - Gases.
- g) Viabilidade da instalação proposta:
- Espaço.
 - Temperatura, umidade e limpeza do ar.
 - Combustível empregado.
 - Tipo de energia empregada.
- h) Aspectos de segurança e saúde dos trabalhadores, nível de risco, poeiras ou perdas térmicas admissíveis.
- i) Meio ambiente:
- Perda de gás do processo, efluente líquido, rejeito sólido e ruído da

instalação para a comunidade.

- Área para estocagem dos resíduos de secagem.
- Transporte dos resíduos até a destinação final.

j) Custos de:

- Implantação da instalação.
- Operação da planta.
- Manutenção da planta.

A escolha do equipamento de secagem é orientada pelos fatores acima apresentados, principalmente, pelas propriedades do material a secar [21 e 26]. O lodo residual em questão apresenta características que dificultam sua secagem pelos processos convencionais; fato este que nos induz a especular sobre a viabilidade técnica de secar com microondas o lodo residual de tratamentos por lodo ativado.

4. MICROONDAS

4.1. Radiação de Microondas

A radiação de microondas segundo [27 e 30], é uma radiação eletromagnética, isto é, uma forma de energia que se propaga em linha reta no espaço livre de obstáculos.

A radiação eletromagnética tem o mesmo significado de onda eletromagnética. Exemplos: luz visível, luz infravermelha, ondas de rádio, microondas. A radiação eletromagnética é constituída por um campo elétrico (E) conjugado com um campo magnético (H), caracterizado por um comprimento de onda (λ) ou número de ondas (v) e movendo-se na velocidade da luz (c), ou seja, na velocidade de 300.000 Km/s no vácuo, como se representa na Figura 8 [28].

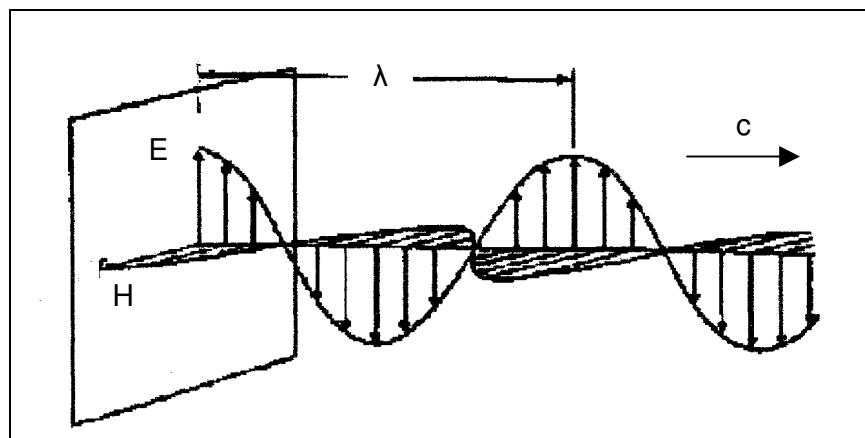


FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA [28]

Ao definir-se uma dada freqüência (f), está-se individualizando a onda eletromagnética, pois a freqüência possui a propriedade de ser invariante, isto é, não pode ser alterada por nenhum processo linear. A velocidade de mudança de ciclo da onda eletromagnética é representada por uma onda senoidal. Sua unidade, no Sistema Internacional de Unidades (SIU), é o hertz (Hz), que representa quantas vezes um evento ou ciclo ocorre em um segundo.

O comprimento de onda (λ) é dado através da relação entre a velocidade da onda (v) e a freqüência (f). Esta relação está representada através da equação (9).

$$\lambda = v / f \quad (9)$$

Quando a propagação da onda eletromagnética ocorre no vácuo, a velocidade da onda será a velocidade da luz ($c = 3.10^8$ m/s, ou mais precisamente 299.792.458 m/s):

$$\lambda = c / f \quad (10)$$

A unidade de comprimento de onda no Sistema Internacional de Unidades é o metro (m). O número de ondas é mais usado em espectrometria [29], e é o inverso do comprimento de onda, sua unidade é m⁻¹ (usual, cm⁻¹):

$$v = 1 / \lambda = f / c \quad (11)$$

A radiação pode ser descrita por um modelo ondulatório (onda eletromagnética) como também por um modelo corpuscular (feixe de fótons). Os fótons são partículas de carga nula que se movimentam com velocidade constante e igual à da luz, e apresentam uma quantidade de energia (E) medida em joules (J) ou eletronvolt (eV), sendo 1 eV = 1,6.10⁻¹⁹ J, e definida por:

$$E=h.f=h.c/\lambda \quad (12)$$

onde h é a constante de Planck (6,63.10⁻³⁴ J/Hz).

A radiação eletromagnética não deve ser confundida com a radioatividade. A radioatividade é a emissão de energia (raio γ) e de partículas subatômicas (neutrinos, partículas alfa, etc.) pelos átomos de elementos químicos. Pode ser natural, quando essa emissão é espontânea, como no caso do rádio, urânio, tório, etc.; ou pode ser artificial, quando essa emissão é provocada artificialmente, como no caso do césio 137.

4.1.1. Espectro Eletromagnético

Pode-se, através da Figura 9, observar como o espectro eletromagnético é amplo. O estreito trecho denominado de luz visível que varia de 400 a 750 nm, compreende as cores visíveis é mostrado na Tabela 2 [32 e 33]:

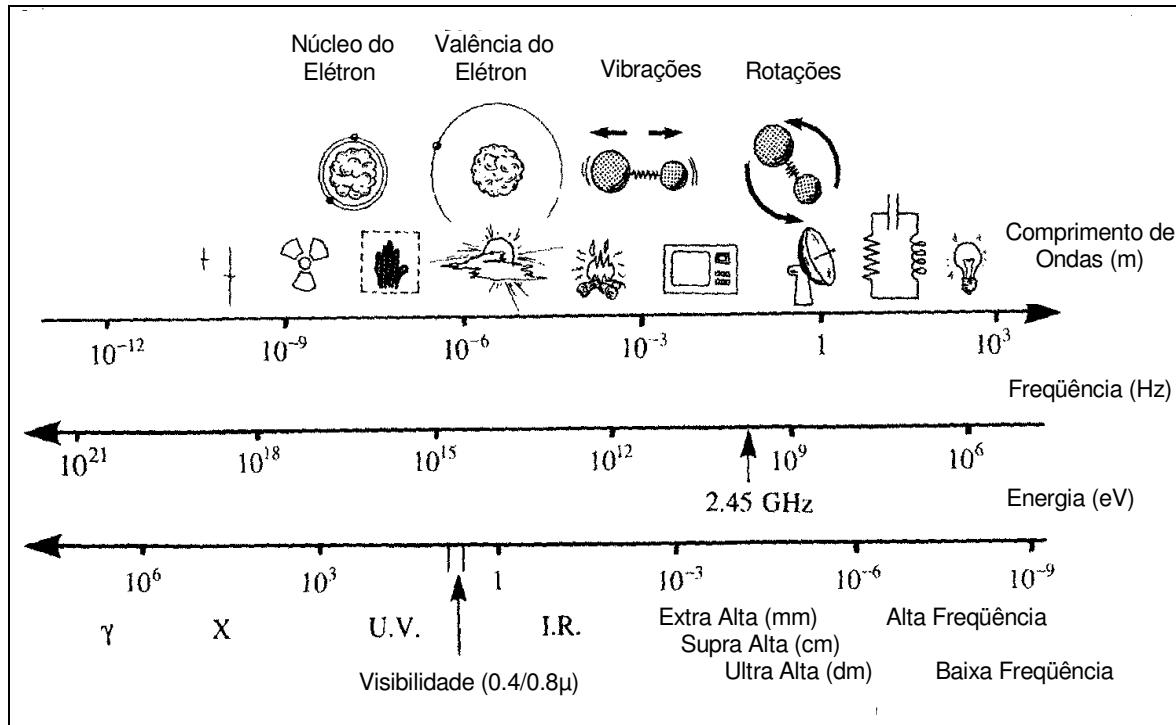


FIGURA 9 - EFEITOS DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS [31]

TABELA 2 - CORES VISÍVEIS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Cores	Faixa de freqüência
Violeta	400 – 450 nm
Azul	450 – 480 nm
Verde-azulado	480 – 490 nm
Azul-esverdeado	490 – 500 nm
Verde	500 – 560 nm
Amarelo-esverdeado	560 – 575 nm
Amarelo	575 – 590 nm
Alaranjado	590 – 625 nm
Vermelho	625 – 800 nm

FONTE [32 e 33]

Cada uma das faixas de freqüência, tem associadas: uma classe, uma faixa de comprimento de onda e de energia como mostra a Tabela 3.

TABELA 3 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Representação	Classe	Faixa de freqüência	Faixa de cumprimento de onda	Faixa de energia
γ	Raios gama	300 EHHz – 30 EHzz	1 pm – 10 pm	1,24 MeV – 124 keV
HX	Raios X duro	30 EHzz - 3 EHzz	10 pm - 100 pm	124 keV – 12,4 keV
SX	Raios X	3 EHzz - 30 PHzz	100 pm - 10 nm	12,4 keV – 124 eV
EUV	Ultravioleta extremo	30 PHzz - 3 PHzz	10 nm - 100 nm	124 eV – 12,4 eV
NUV	Ultravioleta próximo	3 PHzz - 300 THzz	1100 nm - 1 μm	12,4 eV – 1,24 eV
NIR	Infravermelho próximo	300 THzz - 30 THzz	1 μm - 10 μm	1,24 eV – 124 meV
MIR	Infravermelho moderado	30 THzz - 3 THzz	10 μm - 100 μm	124 meV – 12,4 meV
FIR	Infravermelho longínquo	3 THzz - 300 GHz	100 μm - 1 mm	12,4 meV – 1,24 meV
EHF	Alta freqüência extrema	300 GHz - 30 GHz	1 mm - 1 cm	1,24 meV – 124 μeV
SHF	Super-alta freqüência	30 GHz - 3 GHz	1cm – 1 dm	124 μeV – 12,4 μeV
UHF	Ultra-alta freqüência	3 GHz - 300 MHz	1 dm - 1 m	12,4 μeV – 1,24 μeV
VHF	Freqüência muito alta	300 MHz - 30 MHz	1 m – 1 dam	1,24 μeV – 124 neV
HF	Freqüência alta	30 MHz - 3 MHz	1 dam – 1 hm	124 neV – 12,4 neV
MF	Freqüência média	3 MHz - 300 kHz	1 hm – 1 km	12,4 neV – 1,24 neV
LF	Freqüência baixa	300 kHz – 30 kHz	1 km – 10 km	1,24 neV – 124 peV
VLF	Freqüência muito baixa	30 kHz – 3 kHz	10 km – 100 km	124 peV – 12,4 peV
VF	Freqüência da voz	3 kHz – 300 Hz	100 km – 1Mm	12,4 peV – 1,24 peV
ELF	Freqüência extremamente baixa	300 Hz – 30 Hz	1 Mm – 10 Mm	1,24 peV – 124 feV

FONTE [27 e 31]

4.1.2. Microondas

As microondas localizam-se na faixa de freqüência entre 300 MHz e 30 GHz. Ao observar a Figura 9, pode-se deduzir que as microondas são radiações de baixa energia. Ao compararmos as faixas de energias das microondas com as energias necessárias para quebrar as ligações químicas (Tabela 4), percebe-se que, as microondas não são capazes

de romper essas ligações químicas. Conseqüentemente, as microondas não são radiações ionizantes, e, com esta intensidade de energia, podem apenas, provocar a rotação de moléculas bipolares e ou o movimento de íons [30].

TABELA 4 - ENERGIAS RELATIVAS A MOLÉCULAS DE COMPOSTOS QUÍMICOS

Moléculas de compostos químicos	Energia (kJ/mol)	Energia (eV)
Movimento browniano	1,64	0,017
Ligações de hidrogênio	3,8 – 42	0,04 – 0,44
Ligações covalentes C-H	435	4,51
Ligações covalentes C-C	368	3,82
Ligações iônicas	730	7,6

FONTE [31]

A Figura 9 apresenta de forma esquemática os efeitos que as diferentes radiações eletromagnéticas podem apresentar numa escala entre o comprimento de ondas, a freqüência e a energia.

Com o intuito de evitar interferências das microondas nas telecomunicações, foram definidas faixas restritas para o uso em aplicações industriais, médicas e científicas. A Tabela 5 traz as faixas de freqüências de microondas permitidas mundialmente e aquelas específicas para vários países [34].

TABELA 5 - FREQÜÊNCIAS DE MICROONDAS PERMITIDAS PARA FINS MÉDICO, CIENTÍFICO E INDUSTRIAL

Freqüência (GHZ)	Tolerância (+/-)	Área em que a freqüência é permitida
0,434	0,2%	Áustria, Holanda, Portugal, Alemanha, Suíça
0,896	10 MHz	Grã-Bretanha
0,915	13 MHz	América do Norte e América do Sul
2,375	50 MHz	Rússia, Albânia, Bulgária, CIS, República Tcheca, Eslováquia, Hungria, Romênia
2,450	50 MHz	Mundial exceto onde é usada a freqüência de 2,375
3,390	0,6%	Holanda
5,800	5 MHz	Mundial
6,780	0,6%	Holanda
24,150	25 MHz	Mundial
40,680	25 MHz	Grã-Bretanha

FONTE [34]

4.2. Aquecimento com Microondas

4.2.1. Tipos de Materiais em Relação às Microondas [35]

Os materiais diante de microondas podem ser caracterizados por sua permissividade elétrica (constante dielétrica, ϵ'), fator de perdas (constante de perdas, ϵ'') e tangente de perdas ($\tan \delta$). A permissividade elétrica mede a energia armazenada por um dielétrico; o fator de perdas calcula a energia dissipada por um dielétrico; e a tangente de perdas é a relação entre o fator de perdas e a permissividade, ou seja, relaciona a energia dissipada com a armazenada:

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (13)$$

Os materiais, por conseguinte, em função destas propriedades, apresentam diferentes comportamentos em face das microondas e podem ser classificados em:

- a) Transparentes – são os materiais e os compostos com baixos valores de ϵ' e $\tan \delta$; são invisíveis às microondas, não as retêm e permitem que atravessem o material. Exemplos: Teflon, polipropileno, hidrocarbonetos, clorofórmio, gelo, etc. A Figura 10 ilustra o comportamento de um material transparente frente às microondas.

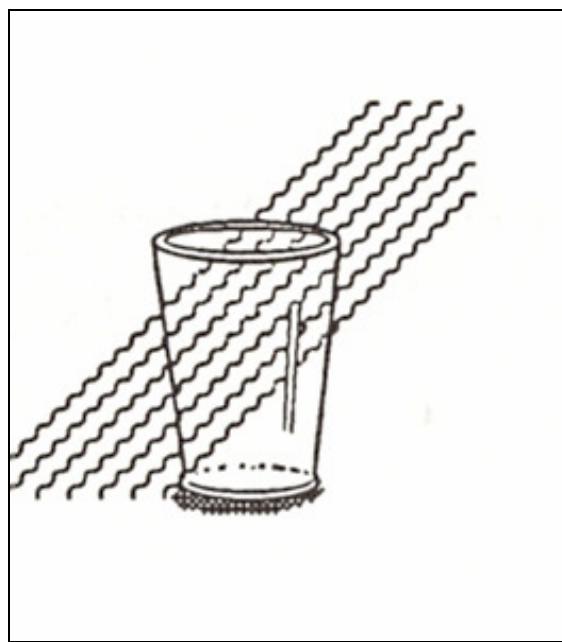


FIGURA 10 – MATERIAL TRANSPARENTE [28]

- b) Dielétricos - são os materiais e os compostos com altos valores de ϵ' e $\tan \delta$; são os materiais que absorvem microondas, transformando-as em calor. Exemplos: carbeto de tungstênio, carbeto de silício, água líquida, álcoois,

substâncias polares em geral. A Figura 11 ilustra o comportamento de um material dielétrico perante as microondas.

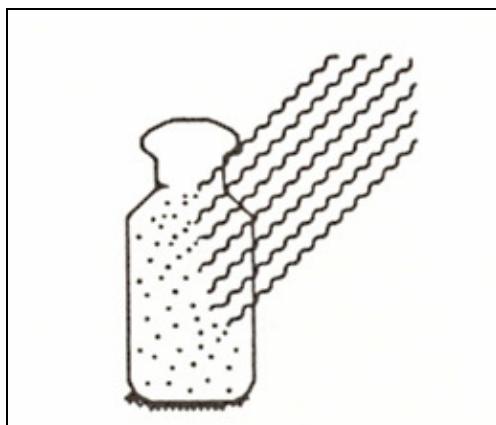


FIGURA11 – MATERIAL DIELÉTRICO [28]

- c) Refletores – são os materiais que são ótimos condutores de energia elétrica. Exemplos: alumínio, aço inoxidável, cobre, latão e metais em geral. A Figura 12 ilustra o comportamento de um material refletor ante as microondas.

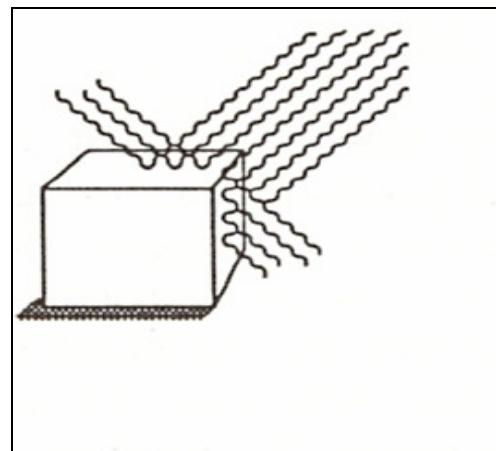


FIGURA 12 – MATERIAL REFLETOR [28]

Os materiais refletores são indicados como equipamentos e elementos que constituem as instalações, e que tenham contato com as microondas.

4.2.2. Mecanismos de Aquecimento por Microondas

Ao invés de deslocar energia pelas formas convencionais de condução e convecção, no aquecimento por microondas, a transferência é feita por meio de uma onda eletromagnética [35]. Conforme [30], o campo elétrico das microondas é o responsável pelo aquecimento de materiais dielétricos.

Destacamos aqui dentre as várias teorias apresentadas [30, 34 e 37], para explicar o mecanismo pelo quais as microondas aquecem um material, as teorias da polarização dipolar:

- Mecanismo de polarização dipolar: neste mecanismo as moléculas bipolares, como as da água, são submetidas a um campo elétrico, e tendem a ter o seu dipolo orientado na mesma orientação do campo elétrico. Na faixa de microondas, a freqüência é baixa o bastante para que os bipolos moleculares respondam à alternância do campo elétrico e, consequentemente, sofram um movimento rotacional. Também a freqüência não é alta o bastante para que o dipolo consiga seguir a mudança do campo elétrico com precisão. Por conseguinte, há um retardo entre o posicionamento das fases do campo e dos bipolos. Essa defasagem entre estas orientações causa perda de energia por fricção molecular e colisões das moléculas possibilitando o aquecimento do dielétrico. A Figura 13 representa o esquema de aquecimento das moléculas de água, onde se percebe que as cargas negativas e positivas estão devidamente orientadas em relação ao campo magnético, e a cada molécula há uma alternância de sentido.
- Mecanismo de condução: neste mecanismo os íons presentes em soluções iônicas, sob a ação do campo elétrico, movem-se segundo a orientação do campo. Este movimento tem por efeito o aumento do número de choques, que por sua vez resulta em dissipação de energia, aumentando a temperatura, ou seja, ocorre a transformação de energia cinética em energia térmica. O efeito destes choques é mais intenso que o resultante da polarização bipolar.

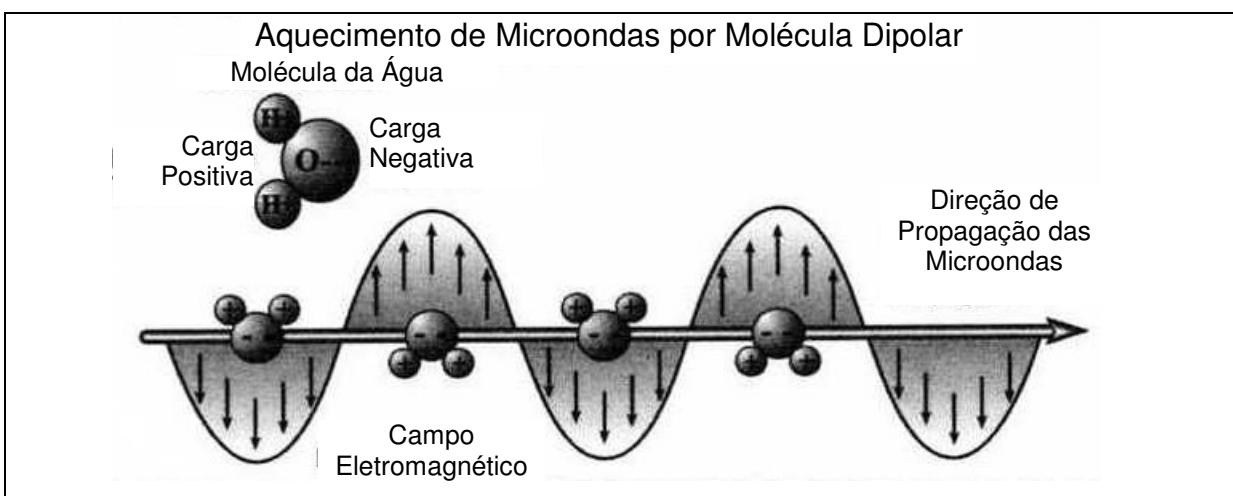


FIGURA 13: POLARIZAÇÃO DA ÁGUA [38]

4.2.3. Quantificação do Aquecimento por Microondas [35, 40]

A potência dissipada em um dielétrico é (W/m^3):

$$P_v = \omega \cdot \epsilon'' \cdot E_m^2 / 2 \quad (14)$$

$$P_v = \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' \cdot \tan \delta \cdot E_m^2 \approx 2,78 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \epsilon_r' \cdot \tan \delta \cdot E_m^2 \quad (15)$$

onde E_m é a intensidade de campo elétrico; f é a freqüência da onda eletromagnética; ϵ_0 é a permissividade do vácuo ($\approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$); e ϵ_r' é a permissividade do dielétrico relativa ao vácuo.

A intensidade do campo elétrico, dentro do dielétrico, decai exponencialmente:

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (16)$$

onde α é o fator de atenuação:

$$\alpha \approx 1,48 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \{\epsilon_r' \cdot [\sqrt{(1 + \tan^2 \delta)} - 1]\}^{1/2} \quad (17)$$

e E_0 é o campo na superfície ($z = 0$).

Destas equações tem-se que a potência dissipada na cota z é:

$$P_v(z) \approx 2,78 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \epsilon_r' \cdot \tan \delta \cdot E_0^2 \cdot e^{-2\alpha z} \quad (18)$$

Em conseqüência desta potência dissipada, a temperatura, em função da penetração, é representada, em $^\circ\text{C/s}$, por:

$$\delta T(z) / \delta t = P_v(z) / \rho \cdot C_p \quad (19)$$

onde ρ é a massa específica (kg/m^3) e C_p é o calor específico ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$).

O nível de penetração das microondas em um dielétrico é representado pela equação (18):

$$d = c/2 \cdot \pi \cdot f \cdot \{2 \cdot \epsilon_r' \cdot [\sqrt{(1 + \tan^2 \delta)} - 1]\}^{1/2} \quad (20)$$

4.2.4. Aplicação do Aquecimento por Microondas

As aplicações industriais de microondas perfazem uma pequena fração dos seus utilizadores, que em sua grande maioria está voltada para as telecomunicações. Todavia, as aplicações de microondas são economicamente importantes e são fontes de avanços científicos e de desenvolvimentos práticos [42].

O aquecimento por microondas já é usado em processos de secagem para uma grande variedade de materiais como: papel, tinta de impressão, couro, têxteis, madeira, argamassa, concreto, cerâmica, moldes de fundição, borracha, farmacêuticos, alimentos e outros materiais [36 e 42]. Também já se aplicam microondas na indústria de alimentos incluindo o cozimento (bem conhecido no âmbito doméstico); no descongelamento de carnes; na pasteurização, entre outras aplicações [42], onde o material irradiado apresenta estruturas químicas análogas às encontradas no lodo residual deste estudo.

5. MATERIAL E EQUIPAMENTOS

5.1. Material

Os materiais utilizados nos Ensaios Preliminares e nos Ensaios Efetivos foram resíduos provenientes de uma estação de tratamento de efluentes por lodo ativado, massa pastosa, com coloração marrom, classe II segundo a NBR 10.004, umidade em torno de 80% e odor nauseabundo. A Figura 14 mostra a foto com o seu aspecto geral.



FIGURA 14 - FOTO DO ASPECTO DO MATERIAL UTILIZADO NO ENSAIO

5.2. Equipamentos para os Ensaios Preliminares e Efetivos

- a) Cavidade para microondas em alumínio, com volume interno de 1m³, fabricação *Genesys Systems INC*, modelo 4021 série 106, com refletor giratório de alumínio na base, exaustor de seção redonda, diâmetro de 17 cm, suporte de bandeja giratório fixado no teto da cavidade, conforme a Figura 15, itens a e b, que exibe a foto dos equipamentos utilizados nos Ensaios Específicos.
- b) Conjunto de alimentação de microondas (Figura 15, item c):
 - Gerador com capacidade de 3 kW; 2,45 MHz, *Cober Electronics INC*, modelo MT 3000B – 110HC.
 - Acoplador direcional modelo 4009 série 154, *Genesys Systems INC*.
 - Acoplador direcional modelo 4009 série 255 *Gerling Moore*.

- Circulador modelo 4065 série 440, Gerling Moore.
 - Circulador modelo 4065 série 441, Gerling Moore.
 - Carga casada, modelo 4011 série 536, Gerling Moore.
 - Carga casada, modelo 4011 série 537, Gerling Moore.
- c) Medidor de radiação de microondas modelo 1501 – 2450 MHz n. 52201, *Holaday Industries*. (para verificação de fuga de microondas).
- d) Medidor de potência, analógico, modelo 435B, *Hewlett Packard*.
- e) Medidor de potência, digital, modelo E4418B, *Agilent*.
- f) Balança elétrica, tara na escala de 0-3000 g, pesagem máxima de 10.000 g com precisão de leitura de 1 (um) g, modelo P10N, *Mettler*.
- g) Pirômetro infravermelho, com escala de -18 °C a +870 °C e precisão de leitura de 1% (um por cento), modelo Ray RPM 5023B, série 651D1, *Raytek*.
- h) Termômetro de mercúrio com escala de 0-100 °C e precisão de leitura de 0,1 °C, *Incoterm*.
- i) Cronômetro, mecânico e com precisão de leitura de 0,2s, *Hanhart*.
- j) Dinamômetro, com escala de 100 g, conforme Figura 16 item c, para os Ensaios Efetivos.
- k) Suporte metálico para colocação da bandeja, protegido com material isolando as microondas conforme Figura 17 (para os Ensaios Efetivos).
- l) Anemômetro fabricação *Airflow Instruments* número de série 089005 – IMT fabricado no Reino Unido (UK) (para os Ensaios Efetivos).
- m) Três fôrmas com as dimensões de 0,246 m x 0,222 m x 0,052 m, Marinex. A Figura 18 mostra a foto de uma fôrma com material.
- n) Duas Espátulas.
- o) Conjunto com três gabaritos para ajuste da altura do material, conforme Tabela 8 (para os Ensaios Efetivos).
- p) Gabarito para fixação da abertura, definida como vazão intermediaria na saída de gases do exaustor (para os Ensaios Efetivos).
- q) Os Equipamentos de Proteção Individual – EPI, utilizados nos Ensaios foram:
 - máscara respiratória com filtro de proteção para vapores orgânicos;
 - óculos de segurança;
 - protetor auricular;
 - luvas de raspa;
 - bota de segurança;
 - avental.
- r) Embalagens de polietileno de alta densidade, esterilizado, com lacre e 250 ml para guardar amostras tipo Whirl Pak Sample Bags da Nasco.

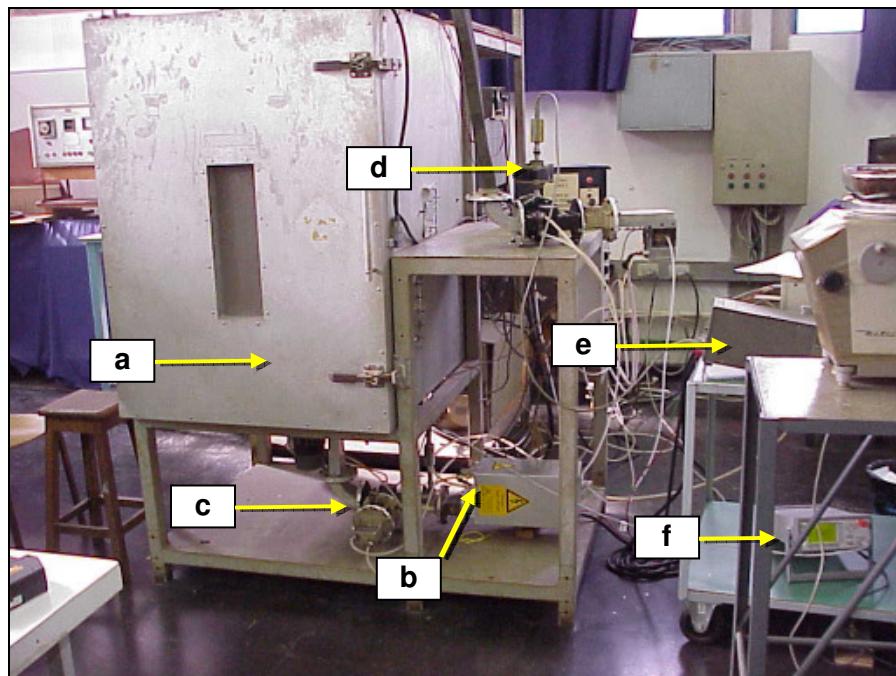


FIGURA 15 – FOTO DA VISTA GERAL DOS EQUIPAMENTOS DE MICROONDAS E OS ITENS A, B, C, D, E, F

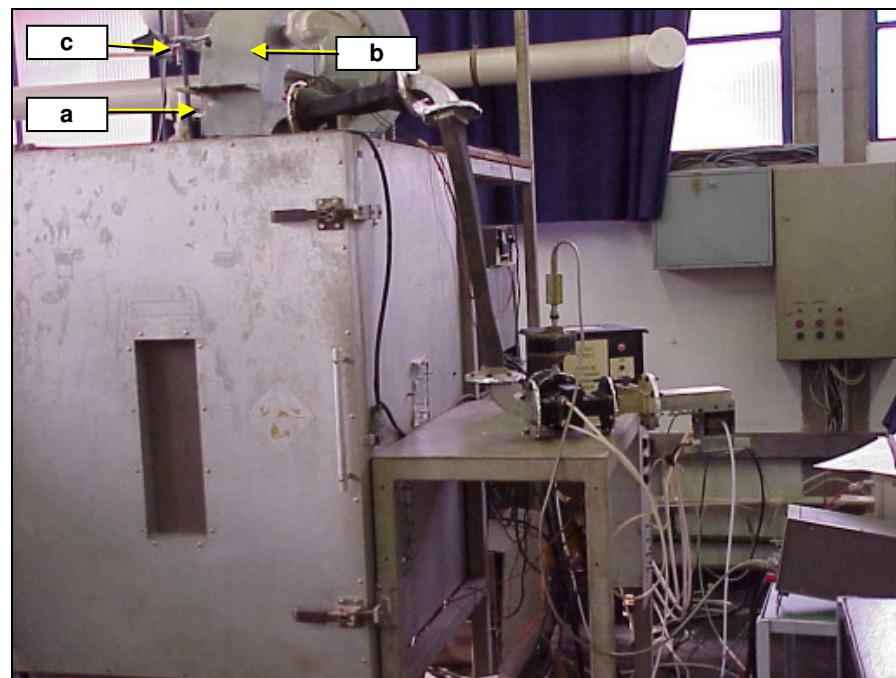


FIGURA 16 - FOTO DA VISTA EXTERNA COM OS ITENS: (a) DINAMÔMETRO; (b) EXAUSTOR; E (c) TOMADA DE TEMPERATURA DO EXAUSTOR



FIGURA 17 - FOTO DA VISTA GERAL DO INTERIOR DA CAVIDADE



FIGURA 18 - FOTO DO MATERIAL PARA ENSAIO

6. METODOLOGIA

6.1. Metodologia para os Ensaios Preliminares

Utilizando o material e os equipamentos descritos no capítulo “Material e métodos” foram realizados dois Ensaios (I e II) de secagem do lodo residual proveniente de uma estação de tratamento de efluentes para a verificação do comportamento do material.

O procedimento detalhado da secagem por microondas é o seguinte:

- a) abrir a válvula de entrada de ar da cavidade para microondas, na posição máxima;
- b) zerar a balança;
- c) tarar a fôrma;
- d) adicionar à forma cerca de 1 (um) kg de resíduo;
- e) nivelar o resíduo com uma espátula;
- f) repesar este conjunto e anotar o peso do resíduo (Figura 18);
- g) colocar a fôrma com a amostra no suporte da cavidade;
- h) verificar se a saída de ar do forno está aberta;
- i) medir a temperatura ambiente com o termômetro de mercúrio, anotando o resultado;
- j) medir com o pirômetro infravermelho a temperatura da superfície da amostra, em três pontos aleatórios, anotando o valor médio, como a temperatura do material;
- k) fechar a porta da cavidade;
- l) ajustar, no conjunto de geração de microondas as condições de trabalho para o ensaio do material;
- m) ligar o exaustor;
- n) acionar, simultaneamente, o gerador e o cronômetro;
- o) medir a potência irradiada e a refletida de microondas;
- p) efetuar se necessário, os ajustes nos parâmetros de operação do gerador de microondas;
- q) verificar se há vazamento de microondas, usando o medidor de radiação;
- r) monitorar visualmente a secagem do material;
- s) a cada 15 minutos:
 - desligar o gerador de microondas;
 - abrir a cavidade;
 - medir a temperatura em três pontos aleatórios anotando os resultados;

- retirar a amostra da cavidade; pesar e anotar o peso;
- retornar o material à cavidade;
- fechar a porta;
- reiniciar o gerador de microondas;
- efetuar os ajustes se necessário;
- verificar se há vazamento de microondas, usando o medidor de radiação.

Após a realização dos Ensaios Preliminares, procedeu-se a ensaio externo para determinação do poder calorífico por calorimetria, utilizando-se um calorímetro marca *Parr*, como também a determinação da umidade do resíduo da pirólise por secagem em estufa a 105 °C.

A seguir descrevemos o conteúdo das fotos. A Figura 14 exibe a foto com o aspecto do material utilizado no Ensaio; e a Figura 15, a foto com a vista geral dos equipamentos de microondas, com os seguintes itens:

- a) cavidade para microondas em alumínio;
- b) gerador *Cober*;
- c) conjunto com Circulador *Gerling Moore*, modelo 4065 série 440, Carga casada, modelo 4011, série 536 e Acoplador direcional modelo 4009, série 154;
- d) conjunto com Circulador *Gerling Moore*, modelo 4065, série 441, Carga casada, modelo 4011, série 537 e Acoplador direcional modelo 4009, série 255;
- e) medidor de potência, *Hewlett Packard*, analógico, modelo 435B; e
- f) medidor de potência, *Agilent*, digital, modelo 4418B.

6.2. Resultados dos Ensaios Preliminares

O Ensaio I foi realizado com potência transmitida de 0,83 W/g com duração de 75 minutos. O Ensaio II foi feito com potência transmitida de 2,39 W/g. Aos 23 minutos de Ensaio, apresentou a liberação de fumos brancos, e em seguida o material inflamou-se. Neste momento, encerrou-se o Ensaio para evitar uma combustão generalizada do material, que poderia danificar o equipamento.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados dos Ensaios Preliminares.

Uma amostra do resíduo de secagem proveniente do Ensaio II foi experimentada externamente para obtenção da sua umidade e do poder calorífico. O resultado apresentou umidade de 4,75% em peso. O poder calorífico superior (PCS) foi de 2,72 cal/g.

TABELA 6 - ENSAIO PRELIMINAR I

Tempo (min)	Leitura massa bruta (g)	Massa líquida (g)	Perda de massa no intervalo (g)
0	2595	989	0
15	2372	866	123
30	2200	694	172
45	2033	527	167
60	1868	362	165
75	1758	252	110

TABELA 7 - ENSAIO PRELIMINAR II

Tempo (min)	Leitura massa bruta (g)	Massa líquida (g)	Perda de massa no intervalo (g)
0	2546	1040	0
15	1965	459	581
23

6.3. Análise dos Resultados dos Ensaios Preliminares

O Ensaio I teve uma perda acumulada de massa de 74,5%. A Figura 19 mostra a curva da perda acumulada do Ensaio I.

Observou-se no material após a secagem, a formação de carepas aglomeradas do material, que podem ter acontecido em razão:

- da eliminação não homogênea de água, resultante da dificuldade do vapor de água vencer a espessura da massa do material;
- da temperatura na qual o material foi submetido durante o Ensaio; e
- do material seco que após os Ensaios apresentou uma coloração preta e após estar frio passou a atrair mosquitos; o seu aspecto geral pode ser visto na Figura 20.

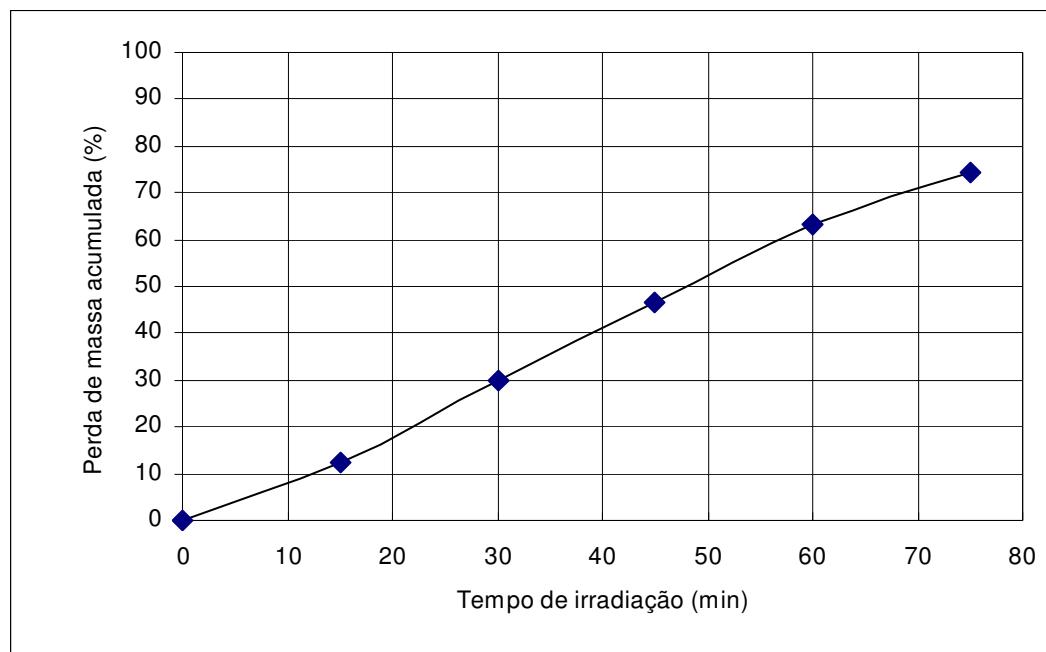


FIGURA 19 – PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO I (EXPLORATÓRIO)

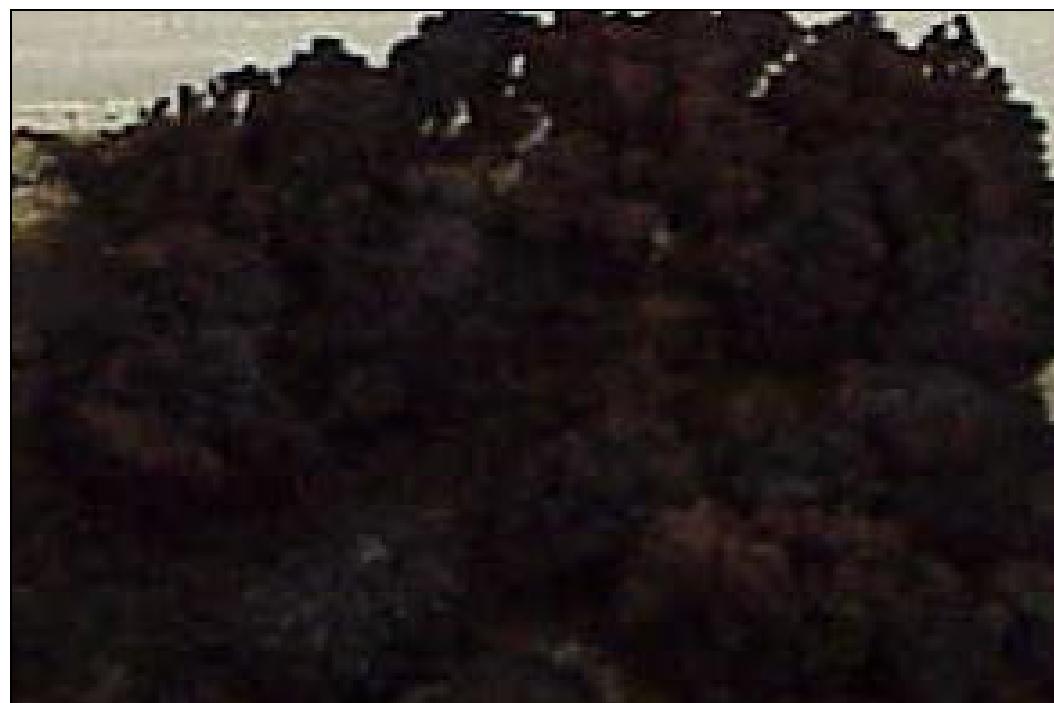


FIGURA 20 – FOTO DO MATERIAL APÓS ENSAIO DE SECAGEM

6.4. Conclusões dos Ensaios Preliminares e Proposições para os Ensaios Efetivos

Os resultados experimentais permitiram concluir, em uma primeira aproximação, que:

- a) aparentemente, é possível secar com microondas o lodo residual de tratamentos por lodos ativados;
- b) esta secagem pode gerar fumos inflamáveis; e
- c) não seria recomendável para o presente estudo, operar em altas potências de radiação de microondas acima de 2.400 W, por motivo de segurança do processo, pois o lodo residual seco, se inflamado, pode liberar 2,72 cal/g (PCS), o que é suficiente para danificar a cavidade utilizada.

Propõe-se, após estes Ensaios Exploratórios, para o estudo final, o seguinte:

- a) o tempo máximo de duração dos ensaios, será coincidente ao inicio do desprendimento de fumos esbranquiçados;
- b) o desenvolvimento de um dispositivo na cavidade de microondas para que seja feita a leitura diretamente no forno, sem interrupção do aquecimento; e
- c) a realização da medição em intervalos inferiores a 15 minutos, a fim de se obter mais pontos de observação.

Em função do estado da arte, das observações e das conclusões, dos Ensaios Preliminares, foram estudados os seguintes parâmetros de secagem [21].

- a) potência efetiva específica, que determina a temperatura do material;
- b) vazão do ar, que fixa a velocidade de remoção do vapor de água ao redor da superfície do material na secagem; e
- c) altura da massa do lodo a secar na fôrma Pyrex, que estabelece a massa a ser secada.

Visando estabelecer a significância destas variáveis e a sua possível correlação, propõe-se um delineamento fatorial completo de 3^3 . Os vinte e sete Ensaios deste delineamento permitirão identificar a influência dos três parâmetros acima, no processo de secagem por microondas e como cada um dos três parâmetros influencia no processo de secagem por microondas.

TABELA 8 - DISTRIBUIÇÃO DOS 27 ENSAIOS COM AS VARIÁVEIS REDUZIDAS E EFETIVAS

Ensaio	Variáveis Reduzidas			Variáveis Efetivas		
	a	b	c	A (W)	B (m/s)	C (cm)
1	-1	-1	-1	1500	7	3,8
2	-1	-1	0	1500	7	4,5
3	-1	-1	1	1500	7	5,2
4	-1	0	-1	1500	8	3,8
5	-1	0	0	1500	8	4,5
6	-1	0	1	1500	8	5,2
7	-1	1	-1	1500	9	3,8
8	-1	1	0	1500	9	4,5
9	-1	1	1	1500	9	5,2
10	0	-1	-1	1800	7	3,8
11	0	-1	0	1800	7	4,5
12	0	-1	1	1800	7	5,2
13	0	0	-1	1800	8	3,8
14	0	0	0	1800	8	4,5
15	0	0	1	1800	8	5,2
16	0	1	-1	1800	9	3,8
17	0	1	0	1800	9	4,5
18	0	1	1	1800	9	5,2
19	1	-1	-1	2100	7	3,8
20	1	-1	0	2100	7	4,5
21	1	-1	1	2100	7	5,2
22	1	0	-1	2100	8	3,8
23	1	0	0	2100	8	4,5
24	1	0	1	2100	8	5,2
25	1	1	-1	2100	9	3,8
26	1	1	0	2100	9	4,5
27	1	1	1	2100	9	5,2

[†]Nas variáveis reduzidas a, b e c, os símbolos, -1, 0 e 1, estão distribuídos conforme a combinação de Ensaios ³, e indicam respectivamente os valores: menor, intermediário e maior, apresentados nas variáveis efetivas.

7. EXPERIMENTOS EFETIVOS

7.1. Comentários Preliminares sobre os Experimentos Efetivos

Os valores de potência irradiada (ou transmitida) foram definidos considerando a capacidade de potência dos equipamentos do Laboratório de Microondas, e os valores mais usuais empregados nos ensaios com microondas. Os valores de potência transmitida usados nos ensaios foram: 2100 W como o de maior potência, 1800 W como o de potência intermediária e o de 1500 W como a menor potência.

Para a determinação dos três valores de velocidade do ar, utilizaram-se três níveis de abertura da saída de gases: com a posição totalmente aberta obteve-se o valor de 9 m/s como o valor de maior velocidade do ar; a posição totalmente fechada, ou de menor velocidade do ar, com velocidade de 7 m/s. Através de regulagem da abertura e respectiva medição, foi acertada a posição correspondente ao valor de 8 m/s da velocidade do ar, que passou a ser a velocidade do ar intermediária. Para reproduzir esta posição de velocidade intermediária, nos ensaios seguintes, foi preparado um gabarito, para fixar a abertura da válvula sempre na mesma posição. Assim, para os ensaios de velocidade do ar intermediária, foi sempre colocado o gabarito e com o anemômetro verificada a respectiva velocidade do ar.

Para conter as amostras de lodo, utilizaram-se três fôrmas Pyrex nas quais as dimensões de superfície (largura e profundidade) foram bem maiores que a altura, para facilitar a remoção dos vapores da amostra durante o aquecimento. As três fôrmas tinham as mesmas dimensões compatíveis com o suporte instalado no interior da cavidade e continham aproximadamente 1 (um) kg do lodo residual. Com a fôrma totalmente cheia obteve-se o valor de maior altura e consequentemente de maior massa. Este valor de massa ficou em torno de 1,2 kg e nesta condição o valor de altura encontrado correspondeu a 5,2 cm. Através de tentativas foi obtida a altura que correspondia aproximadamente a 1 (um) kg de massa e nesta circunstância foi encontrada a altura intermediária de 4,5 cm. A diferença entre essa e a maior altura foi de 0,7 cm. Para a determinação do menor valor de massa foram retirados 0,7 cm da altura intermediária, ficando a menor com 3,8 cm, e o valor aproximado de massa encontrado foi de 0,9 kg. A Figura 18 mostra uma fôrma com amostra preparada para a secagem. Para garantir a reprodução das três alturas de material no interior da fôrma Pyrex, foram construídos três gabaritos.

Nestes vinte e sete ensaios encontramos em todos eles, as variáveis da potência transmitida, da vazão de ar e da altura da massa na fôrma. Para esta quantidade de ensaios tivemos, por exemplo, a potência transmitida maior, presente em nove dos vinte e sete ensaios, e assim também para cada um dos demais valores.

Para eliminar a influência de variáveis não controladas (como a umidade do ar, temperatura ambiente, etc.), que pudessem vir a exercer sobre os parâmetros de secagem acima relacionados, bem como das suas interações de segunda classe, a ordem de realização dos vinte e sete ensaios foi segundo uma seqüência ao acaso sem restrições.

A seqüência sorteada para a realização dos ensaios de secagem é apresentada através da Tabela 8.

7.2. Metodologia

O experimento foi conduzido segundo um delineamento fatorial completo de 3^3 , apresentado na Tabela 8.

Os ensaios foram realizados logo após o recebimento do material para evitar a sua deterioração. A seguir descrevemos o procedimento operacional para a realização dos vinte e sete ensaios efetivos:

Regular a válvula de entrada de ar da cavidade para microondas, na velocidade preestabelecida na Tabela 8.

- a) zerar a balança;
- b) tarar a fôrma;
- c) adicionar à fôrma, com o uso da espátula, a quantidade de resíduo e ajustar a altura com o uso do gabarito de altura conforme o previsto na Tabela 8;
- d) pesar este conjunto e anotar o peso do resíduo para a secagem (Figura 18);
- e) abrir a porta da cavidade;
- f) colocar a fôrma com a amostra no suporte da cavidade (Figura 17);
- g) verificar a temperatura ambiente com o termômetro de mercúrio, anotando o resultado;
- h) medir a umidade relativa do ar;
- i) medir com o pirômetro óptico de infravermelho a temperatura da superfície da amostra em três pontos aleatórios e anotar o valor médio, como a temperatura inicial do material;
- j) fechar a porta da cavidade;
- k) ajustar o conjunto de geração de microondas às condições de trabalho, conforme a Tabela 8;
- l) ligar o exaustor;
- m) fazer a leitura do peso indicado pelo dinamômetro e anotar o resultado;
- n) ligar o misturador de microondas;
- o) acionar, simultaneamente, o gerador de microondas e o cronômetro;

- p) avaliar a potência irradiada ou transmitida e a potência refletida de microondas, e anotar os valores;
- q) efetuar se necessário, os ajustes nos parâmetros de operação do gerador de microondas;
- r) verificar se há vazamento de microondas, usando o medidor de radiação.
- s) monitorar: a variação de massa indicada no dinamômetro, à temperatura da saída de ar do exaustor e o tempo correspondente;
- t) ao observar a queda de temperatura da saída de ar do exaustor (a redução de massa acima 70% da massa inicial), e ou surgimento de fumos esbranquiçados no interior da cavidade:
 - anotar o valor de massa da massa final indicada no dinamômetro;
 - marcar o tempo correspondente;
 - desligar o gerador de microondas;
 - abrir a porta da cavidade;
 - medir com o pirômetro óptico em três pontos aleatórios da superfície do material e anotar o valor médio da temperatura; e
 - desligar o exaustor.

A Figura 17 exibe a foto com a vista geral do interior da cavidade e a Figura 18, mostra o material após a pesagem e disposto na fôrma para o ensaio.

A análise estatística dos resultados obtidos foi o seguinte:

- a) realizar uma análise de regressão (Excel) para determinar a equação da curva experimental de secagem;
- b) em seguida, aplicação do método de Yates para 3^3 aos coeficientes de regressão obtidos para as variáveis potência, vazão do ar e altura do material na fôrma *versus* os coeficientes em regressão linear [44];
- c) a análise de variância (ANOVA), que é basicamente a determinação da diferença entre os quadrados dos afastamentos de uma variável aleatória em relação à média aritmética. Este procedimento foi aplicado utilizando os efeitos determinados pelo método de Yates para os coeficientes de regressão [44];

Devido ao fato dos parâmetros inicialmente definidos (A, B e C) não atingirem a significância no teste F em relação aos seus efeitos sobre a perda de massa e o consumo de energia específica acumulada, ambos em um pré-determinado tempo de irradiação, os dados colhidos foram remanejados para um delineamento fatorial 2^3 completo e tratados conforme o roteiro:

- d) aplicação do procedimento para a redução dos dados de 3³ para um dileneamento 2³ [44]; e
- e) emprego do procedimento para a regressão multilinear 2³ com ponto central [44].

7.3. Resultados dos Ensaios Efetivos

Na Tabela 9 apresentam-se os resultados do Ensaio 1, os resultados dos outros vinte e seis ensaios estão descritos no Anexo 10.1 (Resultados dos Ensaios Efetivos números 2 a 27).

TABELA 9 – DADOS COLHIDOS NO ENSAIO 1

Tempo (min)	Leitura dinamômetro (g)	Temperatura exaustor (°C)	Massa líquida (g)	Perda de massa (g)
0	3450	30,5	910	0
7	3350	30,5	810	100
14	3150	30,5	610	200
21	2950	30,0	410	200
28	2800	30,0	260	150
35	2750	30,5	210	50
42	1089	30,3	152	58

Outros dados observados durante o Ensaio 1:

- Temperatura de bulbo seco = 24,0 °C
- Temperatura de bulbo úmido = 18,0 °C
- Umidade do ar ambiente = 55 %
- Temperatura inicial da amostra = 21 °C
- Temperatura final da amostra = 273 °C

7.4. Análise e Discussão dos Resultados

O tratamento dos respectivos resultados das Tabelas do “Anexo de Resultados dos Ensaios Efetivos de números 2 a 27” permitiu obter os dados correspondentes de perda de massa acumulada em relação à massa inicial, à energia efetiva específica acumulada corrigida e ao custo de energia elétrica gasto em cada um dos ensaios.

O custo da energia elétrica da concessionária Eletropaulo, na época da realização deste ensaio foi de R\$ 120,00/MWh.

Uma informação importante para a presente análise fornecido pela empresa que forneceu o material para estes ensaios, é o valor de R\$ 400,00/ton cobrado por uma prestadora de serviços para fazer o acondicionamento, o transporte, a queima em incinerador e o descarte das cinzas.

A Tabela 10 apresenta um resumo do tratamento dos resultados obtidos no Ensaio 1. A potência efetiva é a diferença entre a potência transmitida e a potência refletiva.

TABELA 10 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIO 1

Minuto	Perda (g)	Perda acum. (g)	Perda acum. (%)	Potência efetiva (W)	Energia efetiva no intervalo (kWh)	Energia efetiva específica intervalo (kWh/kg)	Energia efetiva específica acumulada (kWh/kg)	Energia efetiva específica acumulada corrigida (kWh/Kg)	Custo específico tratamento (R\$/ton)
0	0	0	0	1617,43	0	0	0	0	0
7	100	100	10,99	1594,47	0,1860	0,2297	0,2297	0,3445	41,34
14	200	300	32,97	1586,16	0,1851	0,3034	0,5330	0,7995	95,94
21	200	500	54,95	1487,87	0,1736	0,4234	0,9564	1,4346	172,15
28	150	650	71,43	1371,26	0,1600	0,6153	1,5717	2,3576	282,91
35	50	700	76,92	1377,96	0,1608	0,7655	2,3372	3,5059	420,70
42	58	758	83,30	1377,96	0,1608	1,0576	3,3949	5,0923	611,08

Para a transformação de energia elétrica para energia de microondas há uma perda usual de 50%, em função desta perda, adota-se o fator de correção para energia efetiva específica é 1,5. A energia efetiva específica acumulada após usar este fator de 1,5 recebe o nome de energia efetiva específica acumulada corrigida.

O Ensaio 1 teve 42 minutos de duração, com 7 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 83,30% em relação à massa inicial e a energia efetiva específica acumulada corrigida de 5,09 kWh/kg. Considerando o custo de energia elétrica para 28 minutos de ensaio, obteve-se o custo de energia elétrica consumida no valor de R\$ 282,91/ton e 71,43% de perda acumulada de massa, portanto inferior ao custo de descarte praticado pela empresa que forneceu o material para os ensaios.

Uma visão completa dos resultados obtidos, em termos de pontos característicos de cada ensaio, é apresentada no Anexo 10.2 (Tratamento dos Resultados dos Ensaios Efetivos números 2 a 27).

TABELA 11 – RESUMO DA ANÁLISE INICIAL DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Ensaios	A	B	C	Perda acumulada (%)	Custo energia acumulada / tonelada (R\$)	Duração do Ensaio (min)	Perda acumulada/ Duração do Ensaio (%/min)
1	1500	7	3,8	71,43	282,91	28	2,6
2	1500	7	4,5	77,24	301,85	28	2,8
3	1500	7	5,2	76,21	298,48	35	2,2
4	1500	8	3,8	72,09	350,88	35	2,1
5	1500	8	4,5	74,55	298,56	29	2,6
6	1500	8	5,2	73,95	263,50	35	2,1
7	1500	9	3,8	66,01	235,80	24	2,8
8	1500	9	4,5	75,19	338,23	27	2,8
9	1500	9	5,2	78,00	397,36	42	1,9
10	1800	7	3,8	77,95	350,56	25	3,1
11	1800	7	4,5	74,95	302,30	25	3,0
12	1800	7	5,2	82,64	372,46	35	2,4
13	1800	8	3,8	77,35	397,47	29	2,7
14	1800	8	4,5	77,75	372,72	31	2,5
15	1800	8	5,2	78,51	351,71	35	2,2
16	1800	9	3,8	76,84	317,77	25	3,1
17	1800	9	4,5	69,59	277,09	23	3,0
18	1800	9	5,2	78,06	354,51	35	2,2
19	2100	7	3,8	77,09	357,16	22	3,5
20	2100	7	4,5	83,73	364,29	20	4,2
21	2100	7	5,2	71,91	251,54	23	3,1
22	2100	8	3,8	77,09	358,71	22	3,5
23	2100	8	4,5	75,35	290,69	20	3,8
24	2100	8	5,2	84,98	380,90	30	2,8
25	2100	9	3,8	71,66	274,68	20	3,6
26	2100	9	4,5	75,03	276,13	20	3,8
27	2100	9	5,2	80,37	322,42	25	3,2

A Tabela 11 mostra os valores dos custos da energia acumulada por tonelada abaixo de R\$ 400,00. Estes valores variaram entre R\$ 235,80 a R\$ 397,47; e o percentual da perda de massa acumulada, ficou entre 66,01% a 84,98%, para estes valores a duração dos ensaios variou entre 20 e 42 minutos, constatou-se também que a relação entre a máxima perda acumulada e a duração do ensaio esteve na faixa de 1,9 a 4,2 %/min. Importante observar que o custo da energia elétrica despendida é o custo de referência inicial.

Com base nos resultados dos 27 ensaios, foi possível obter as curvas para a perda de massa acumulada, energia específica acumulada corrigida e a velocidade de secagem. As curvas que representam o ensaio 1 são apresentadas através das respectivas Figuras 21, 22 e 23. As curvas para os demais Ensaios poderão ser vistas nos anexos 10.3, (Gráficos da Perda de Massa Acumulada dos Ensaios Efetivos números 2 a 27), 10.4,

(Gráficos da Energia Específica Acumulada Corrigida dos Ensaios Efetivos números 2 a 27) e 10.5, (Gráficos da Velocidade de Secagem dos Ensaios Efetivos números 2 a 27).

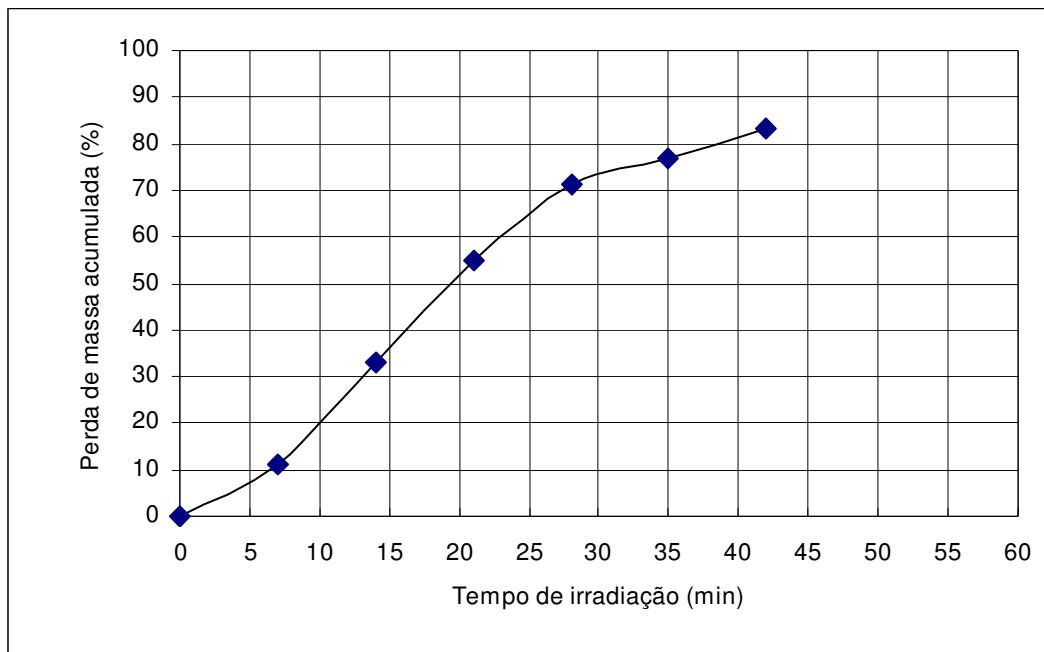


FIGURA 21 – PERDA ACUMULADA DE MASSA DO ENSAIO 1

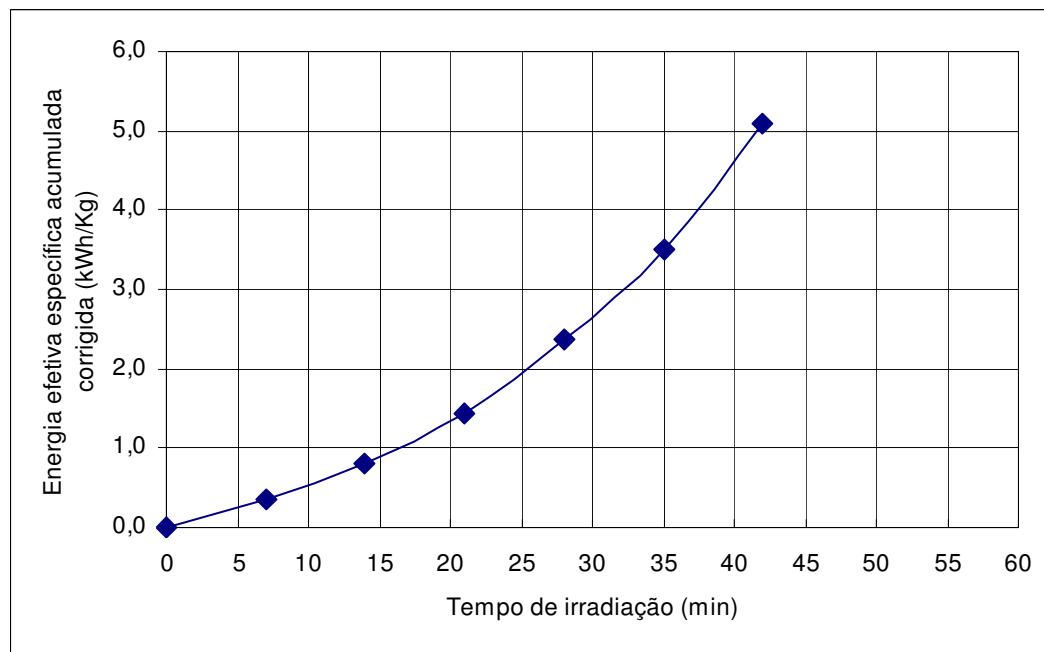


FIGURA 22 – ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA DO ENSAIO 1

A velocidade de secagem como mostra a Figura 23, é negativa, em função da perda de massa.

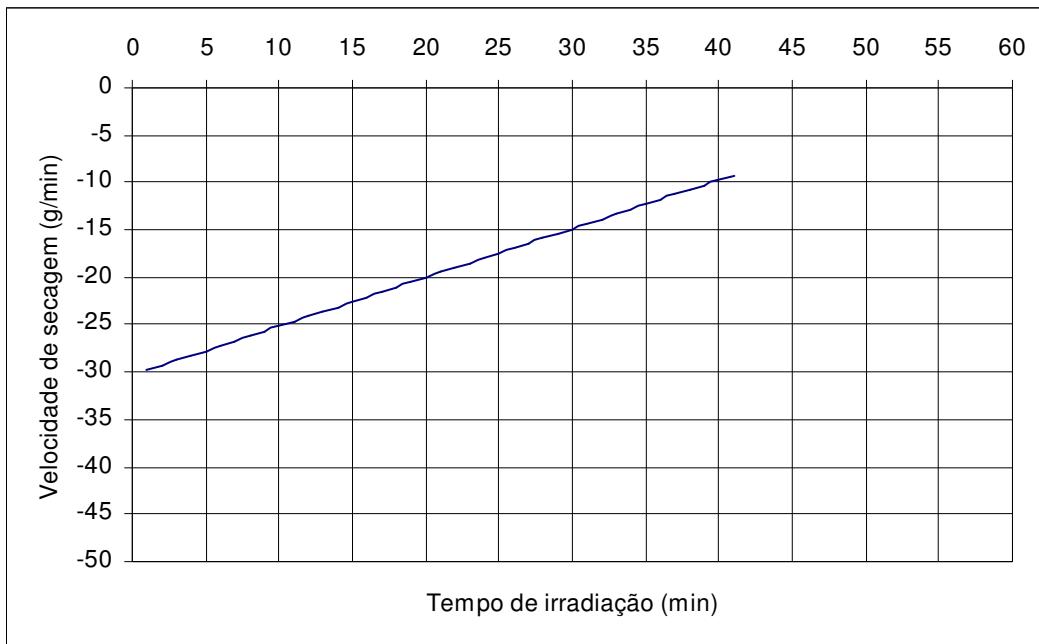


FIGURA 23: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 1

Analisando os resultados obtidos podemos deslumbrar melhorias a serem introduzidas no processo de secagem do lodo residual, como a secagem contínua, o reaproveitamento dos gases extraídos da secagem no pré-aquecimento, a variação da potência efetiva nas diferentes etapas de aquecimento, entre outras medidas.

7.5. Análise de Regressão Linear e de Variância dos Parâmetros das Curvas Experimentais

Considerando que cada ensaio realizado gera uma curva complexa, para a análise das três variáveis em estudo foi adotada a estratégia de realizar inicialmente uma análise de regressão para obter a curva que melhor se ajuste aos pontos experimentais. A curva de regressão foi realizada no Excel através da ferramenta de Análise Regressão, que executa uma análise de regressão linear usando o método de "quadrados mínimos".

Para evitar confusão entre as variáveis em estudo A (potência efetiva específica), B (vazão do ar), C (altura da massa do lodo a secar) e os parâmetros da regressão polinomial, estes serão indicado por (Ax^2) , (Bx) e (C) .

A Tabela 12 apresenta os resultados da regressão polinomial e exponencial, que foram as de melhor ajuste aos dados experimentais. O "y" indicado nas equações polinomiais e nas exponenciais indica a perda de massa acumulada e o "x" destas mesmas equações indica a variável tempo de secagem.

TABELA 12 – REGRESSÕES PARA A DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Ensaio	Equação Polimomial		Equação Exponencial	
1	$y = -0,0525x^2 + 4,6518x - 19,89$	R2 = 0,9968	$y = 12,54e^{0,0528x}$	R2 = 0,7956
2	$y = -0,0647x^2 + 5,3411x - 26,448$	R2 = 0,9877	$y = 10,511e^{0,0617x}$	R2 = 0,8295
3	$y = -0,0365x^2 + 3,9313x - 19,979$	R2 = 0,9923	$y = 12,416e^{0,0429x}$	R2 = 0,775
4	$y = -0,031x^2 + 3,6715x - 13,646$	R2 = 0,9913	$y = 11,29e^{0,0552x}$	R2 = 0,8282
5	$y = -0,0552x^2 + 4,9539x - 25,441$	R2 = 0,9945	$y = 12,926e^{0,0553x}$	R2 = 0,8805
6	$y = -0,0227x^2 + 3,159x - 13,475$	R2 = 0,9922	$y = 6,5293e^{0,0636x}$	R2 = 0,8036
7	$y = -0,0581x^2 + 4,8657x - 19,793$	R2 = 0,9826	$y = 7,815e^{0,0661x}$	R2 = 0,7699
8	$y = -0,0628x^2 + 5,094x - 20,82$	R2 = 0,9998	$y = 16,594e^{0,0453x}$	R2 = 0,815
9	$y = -0,0286x^2 + 3,1955x - 4,9146$	R2 = 0,9895	$y = 12,976e^{0,0449x}$	R2 = 0,7848
10	$y = -0,0225x^2 + 3,3135x + 4,9263$	R2 = 0,9763	$y = 18,641e^{0,0545x}$	R2 = 0,9480
11	$y = -0,0658x^2 + 5,1897x - 16,121$	R2 = 0,9908	$y = 12,681e^{0,0638x}$	R2 = 0,8271
12	$y = -0,0394x^2 + 4,2123x - 18,899$	R2 = 0,9937	$y = 6,7607e^{0,0756x}$	R2 = 0,7884
13	$y = -0,0662x^2 + 5,4166x - 25,511$	R2 = 0,992	$y = 9,6196e^{0,0697x}$	R2 = 0,8628
14	$y = -0,0404x^2 + 4,1524x - 12,46$	R2 = 0,9871	$y = 9,6804e^{0,0664x}$	R2 = 0,8886
15	$y = -0,039x^2 + 4,1235x - 18,411$	R2 = 0,9933	$y = 7,5887e^{0,0674x}$	R2 = 0,7763
16	$y = -0,087x^2 + 6,242x - 27,113$	R2 = 0,9896	$y = 8,0256e^{0,0811x}$	R2 = 0,7621
17	$y = -0,0636x^2 + 5,1732x - 17,928$	R2 = 0,9961	$y = 13,577e^{0,0605x}$	R2 = 0,8845
18	$y = -0,0396x^2 + 4,164x - 18,447$	R2 = 0,9947	$y = 6,7646e^{0,0751x}$	R2 = 0,7846
19	$y = -0,1309x^2 + 8,2485x - 42,959$	R2 = 0,9948	$y = 16,85e^{0,0569x}$	R2 = 0,8354
20	$y = -0,0935x^2 + 6,3064x - 19,504$	R2 = 0,9982	$y = 11,626e^{0,0787x}$	R2 = 0,8245
21	$y = -0,0532x^2 + 4,8902x - 16,031$	R2 = 0,9939	$y = 9,2642e^{0,0799x}$	R2 = 0,8255
22	$y = -0,1309x^2 + 8,2485x - 42,959$	R2 = 0,9948	$y = 16,85e^{0,0569x}$	R2 = 0,8354
23	$y = -0,1067x^2 + 6,5243x - 14,78$	R2 = 0,9964	$y = 19,265e^{0,0538x}$	R2 = 0,7886
24	$y = -0,0201x^2 + 3,2659x + 1,9686$	R2 = 0,9884	$y = 15,581e^{0,0589x}$	R2 = 0,908
25	$y = -0,0901x^2 + 6,2618x - 18,831$	R2 = 0,9982	$y = 9,8549e^{0,0951x}$	R2 = 0,8597
26	$y = -0,09x^2 + 6,358x - 20,171$	R2 = 0,9918	$y = 9,4025e^{0,0977x}$	R2 = 0,8664
27	$y = -0,0958x^2 + 6,6823x - 29,267$	R2 = 0,9957	$y = 10,611e^{0,0786x}$	R2 = 0,8299

Para melhor visualização do fenômeno de secagem do lodo residual por microondas, levantaram-se as equações polimoniais e exponenciais, para a perda de massa acumulada e para a energia específica acumulada. A vantagem da equação exponencial é devido ao fato de muitos fenômenos serem representados por curvas exponenciais.

Os parâmetros das curvas de Perda de Massa Acumulada (Ax^2), (Bx) e (C), obtidos na Análise Regressão, foram submetidos ao método de Yates e de Análise de Variância (ANOVA), para identificar como eles se relacionam com as variáveis estudadas A (potência efetiva específica), B (vazão do ar), C (altura da massa do lodo a secar).

As Tabelas 13 a 24, apresentam a analise estatística dos parâmetros de regressão polinomial, e as Tabelas 25 a 32 apresentam a analise estatística dos parâmetros dos parâmetros da regressão exponencial.

TABELA 13 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	-0,053	0,002756	-0,206	-0,669	-1,687	I	---	---	---	---
2	-0,023	0,000506	-0,228	-0,643	-0,399	A L	1	2	18	0,0088489
3	-0,131	0,017135	-0,235	-0,375	-0,296	A Q	1	3	54	0,0016258
4	-0,031	0,000961	-0,224	-0,210	-0,057	B L	1	2	18	0,0001780
5	-0,066	0,004382	-0,202	-0,108	-0,003	AB LL	2	1	12	0,0000005
6	-0,131	0,017135	-0,216	-0,081	0,131	AB QL	2	2	36	0,0004760
7	-0,058	0,003376	-0,129	-0,142	-0,150	B Q	1	3	54	0,0004178
8	-0,087	0,007569	-0,082	-0,133	0,047	AB LQ	2	2	36	0,0000621
9	-0,090	0,008118	-0,164	-0,021	-0,070	AB QQ	2	3	108	0,0000455
10	-0,065	0,004186	-0,078	-0,029	0,294	C L	1	2	18	0,0048118
11	-0,066	0,004330	-0,100	0,008	0,129	AC LL	2	1	12	0,0013868
12	-0,094	0,008742	-0,032	-0,035	0,121	AC QL	2	2	36	0,0004080
13	-0,055	0,003047	-0,029	0,046	-0,006	BC LL	2	1	12	0,0000026
14	-0,040	0,001632	-0,052	0,002	-0,097	ABC LLL	3	0	8	0,0011737
15	-0,107	0,011385	-0,027	-0,051	-0,199	ABC QLL	3	1	24	0,0016418
16	-0,063	0,003944	-0,017	0,164	-0,145	BC QL	2	2	36	0,0005808
17	-0,064	0,004045	0,003	0,001	-0,179	ABC LQL	3	1	24	0,0013276
18	-0,090	0,008100	-0,067	-0,034	-0,073	ABC QQL	3	2	72	0,0000738
19	-0,037	0,001332	-0,138	0,015	0,241	C Q	1	3	54	0,0010783
20	-0,039	0,001552	-0,030	-0,036	-0,077	AC LQ	2	2	36	0,0001630
21	-0,053	0,002830	0,026	-0,130	0,104	AC QQ	2	3	108	0,0000994
22	-0,023	0,000515	-0,027	0,089	-0,079	BC LQ	2	2	36	0,0001751
23	-0,039	0,001521	-0,081	0,047	-0,007	ABC LLQ	3	1	24	0,0000022
24	-0,020	0,000404	-0,026	-0,089	0,128	ABC QLQ	3	2	72	0,0002272
25	-0,029	0,000818	-0,011	-0,054	-0,043	BC QQ	2	3	108	0,0000170
26	-0,040	0,001568	0,035	0,110	-0,094	ABC LQQ	3	2	72	0,0001219
27	-0,096	0,009178	-0,045	-0,127	-0,400	ABC QQQ	3	3	216	0,0007411

A Tabela 14 apresenta um remanejamento dos efeitos apurados na Tabela 13, considerando os efeitos lineares e quadráticos de um fator ou interação.

TABELA 14 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	0,01047474
B	0,00059575
C	0,00589006
AB	0,00058413
AC	0,00205716
BC	0,00077551
ABC	0,00413564

Nas análises de variância de 3^3 ordem realizadas, as interações foram desconsideradas para obter melhor grau de liberdade para o “resto”. Isto é viável, pois as interações de 3^3 ordem costumeiramente, possuem pouca relevância física.

Nos resultados das ANOVA das Tabelas 15 e 16 para os parâmetros (Ax^2), como as interações de 2^3 ordem que não atingiram significância, estes resultados foram incorporadas ao “resto”, reforçando assim a significância dos parâmetros individuais. Analogamente para os demais parâmetros.

TABELA 15 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,010475	0,005237	7,891562	95%
B	2	0,000596	0,000298	0,448835	---
C	2	0,005890	0,002945	4,437508	90%
AB	4	0,000584	0,000146	0,220041	---
AC	4	0,002057	0,00514	0,77492	---
BC	4	0,000776	0,000194	0,292129	---
RESTO	8	0,005309	0,000664		
TOTAL	26	0,025687			

TABELA 16 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA DESCONSIDERADAS AS INTERAÇÕES

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,010000	0,005000	12,00387	99,9%
B	2	0,001000	0,000000	0,682724	---
C	2	0,006000	0,003000	6,749904	99%
RESTO	20	0,009000	0,000000		
TOTAL	26	0,026000			

TABELA 17 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	4,652	21,639243	16,214	50,920	137,637	I	---	---	---	---
2	3,314	10,979282	17,337	49,093	17,922	A L	1	2	18	17,8445371
3	8,249	68,037752	17,370	37,624	11,675	A Q	1	3	54	2,5243080
4	3,672	13,479912	16,837	9,570	1,952	B L	1	2	18	0,2116185
5	5,417	29,339556	15,631	3,800	0,626	AB LL	2	1	12	0,0326563
6	8,249	68,037752	16,625	4,553	-6,639	AB QL	2	2	36	1,2244898
7	4,866	23,675036	13,034	6,004	7,090	B Q	1	3	54	0,9309170
8	6,242	38,962564	10,548	5,547	-0,841	AB LQ	2	2	36	0,0196374
9	6,262	39,210139	14,042	0,125	4,361	AB QQ	2	3	108	0,1760956
10	5,341	28,527349	3,597	1,156	-13,296	C L	1	2	18	9,8211643
11	5,190	26,932986	4,577	-0,212	-5,017	AC LL	2	1	12	2,0976913
12	6,306	39,770681	1,396	1,008	-5,879	AC QL	2	2	36	0,9600734
13	4,954	24,541125	0,965	-2,201	-0,148	BC LL	2	1	12	0,0018179
14	4,152	17,242426	1,570	0,299	4,729	ABC LLL	3	0	8	2,7948390
15	6,524	42,566490	1,264	2,528	8,783	ABC QLL	3	1	24	3,2139925
16	5,094	25,948836	0,959	-7,630	7,069	BC QL	2	2	36	1,3879589
17	5,173	26,761998	0,107	-0,162	8,393	ABC LQL	3	1	24	2,9351720
18	6,358	40,424164	3,487	1,153	2,848	ABC QQL	3	2	72	0,1126305
19	3,931	15,455120	6,273	-1,090	-9,642	C Q	1	3	54	1,7216684
20	4,212	17,743471	1,087	2,201	6,523	AC LQ	2	2	36	1,1819314
21	4,890	23,914056	-1,357	5,979	-4,966	AC QQ	2	3	108	0,2283440
22	3,159	9,979281	1,268	-4,161	2,588	BC LQ	2	2	36	0,1860053
23	4,124	17,003252	3,173	-0,912	-0,270	ABC LLQ	3	1	24	0,0030398
24	3,266	10,666103	1,106	4,232	-6,152	ABC QLQ	3	2	72	0,5256371
25	3,196	10,211220	0,397	2,743	0,487	BC QQ	2	3	108	0,0021915
26	4,164	17,338896	-1,822	-3,973	1,894	ABC LQQ	3	2	72	0,0498069
27	6,682	44,653133	1,550	5,591	16,280	ABC QQQ	3	3	216	1,2270749

TABELA 18 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	20,36884510
B	1,14253549
C	11,54283265
AB	1,45287904
AC	4,46804008
BC	1,57797364
ABC	8,06735362

TABELA 19 – ANOVA PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	20,36885	10,18442	7,501	95%
B	2	1,142535	0,571268	0,421	---
C	2	11,54283	5,771416	4,251	90%
AB	4	1,452879	0,36322	0,268	---
AC	4	4,46804	1,11701	0,823	---
BC	4	1,577974	0,394493	0,291	---
RESTO	8	10,86219	1,3577774		
TOTAL	26	51,4153			

TABELA 20 – ANOVA PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA DESCONSIDERANDO AS INTERAÇÕES

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	20,36865	10,18442	11,09349	99,9%
B	2	1,142535	0,571268	0,622259	---
C	2	11,54283	5,771416	6,286574	99,0%
RESTO	20	18,36109	0,918054		
TOTAL	26	51,4153			

TABELA 21 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	-19,890	395,612100	-57,923	-205,776	-516,904	I	---	---	---	---
2	4,926	24,268431	-82,116	-173,673	-38,127	A L	1	2	18	80,758493
3	-42,959	1845,475681	-65,737	-137,455	-67,013	A Q	1	3	54	83,160899
4	-13,646	186,213316	-62,073	-51,420	-2,380	B L	1	2	18	0,314662
5	-25,511	650,811121	-52,681	18,254	-10,564	AB LL	2	1	12	9,300546
6	-42,959	1845,475681	-58,919	-4,961	97,803	AB QL	2	2	36	265,706300
7	-19,793	391,762849	-54,909	-62,683	-22,761	B Q	1	3	54	9,593340
8	-27,113	735,114769	-29,917	-34,146	-28,502	AB LQ	2	2	36	22,565033
9	-18,831	354,606561	-52,629	29,816	-80,307	AB QQ	2	3	108	59,715542
10	-26,448	699,496704	-23,069	-7,814	68,321	C L	1	2	18	259,317669
11	-16,121	259,886641	-29,313	3,154	46,459	AC LL	2	1	12	179,871439
12	-19,504	380,406016	0,962	2,280	92,499	AC QL	2	2	36	237,666417
13	-25,441	647,244481	6,944	24,031	10,095	BC LL	2	1	12	8,491914
14	-12,460	155,251600	10,661	-6,295	-52,331	ABC LLL	3	0	8	342,321928
15	-14,780	218,448400	0,649	-28,300	-87,379	ABC QLL	3	1	24	318,130191
16	-20,820	433,472400	3,948	88,304	-88,275	BC QL	2	2	36	216,458147
17	-17,928	321,413184	15,444	8,575	-87,811	ABC LQL	3	1	24	321,279228
18	-20,171	406,869241	-24,352	0,924	-0,197	ABC QQL	3	2	72	0,000540
19	-19,979	399,160441	-72,702	40,572	4,115	C Q	1	3	54	0,313624
20	-18,899	357,172201	-5,583	-15,630	-92,889	AC LQ	2	2	36	239,675810
21	-16,031	256,992961	15,602	-47,703	35,425	AC QQ	2	3	108	11,619990
22	-13,475	181,575625	-13,710	36,519	-11,842	BC LQ	2	2	36	3,895294
23	-18,411	338,964921	-15,301	-13,729	8,321	ABC LLQ	3	1	24	2,884683
24	1,969	3,8753860	-5,135	-51,292	72,078	ABC QLQ	3	2	72	72,156085
25	-4,915	24,153293	1,788	-45,934	24,130	BC QQ	2	3	108	5,391044
26	-18,447	340,291809	25,316	11,757	12,685	ABC LQQ	3	2	72	2,234991
27	-29,267	856,557289	2,712	-46,131	-115,578	ABC QQQ	3	3	216	61,844290

TABELA 22 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	163,91939247
B	9,90800245
C	259,63129333
AB	357,28742089
AC	668,83365601
BC	234,23639917
ABC	778,53000753

TABELA 23 – ANOVA PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	163,919	81,960	0,585	---
B	2	9,908	4,954	0,035	---
C	2	259,631	129,816	0,927	---
AB	4	357,287	89,322	0,638	---
AC	4	668,834	167,208	1,193	---
BC	4	234,236	58,559	0,418	---
RESTO	8	1120,852	140,106		
TOTAL	26	2814,668			

TABELA 24 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	12,540	157,251600	48,031	111,486	316,241	I	---	---	---	
2	18,641	347,486881	37,760	116,263	15,707	A L	1	2	18	13,706626
3	16,850	283,922500	25,696	88,492	36,225	A Q	1	3	54	24,300535
4	11,290	127,464100	34,818	11,910	-15,669	B L	1	2	18	13,640387
5	9,620	92,536704	41,871	0,262	-9,790	AB LL	2	1	12	7,986682
6	16,850	283,922500	39,574	3,535	13,477	AB QL	2	2	36	5,045414
7	7,815	61,074225	28,441	2,628	-11,750	B Q	1	3	54	2,556495
8	8,026	64,410255	29,699	8,448	-47,145	AB LQ	2	2	36	61,739782
9	9,855	97,119054	30,352	25,150	-49,767	AB QQ	2	3	108	22,932910
10	10,511	110,481121	4,310	-22,336	-22,995	C L	1	2	18	29,375091
11	12,681	160,807761	5,560	4,756	-8,375	AC LL	2	1	12	5,845052
12	11,626	135,163876	2,040	1,911	22,522	AC QL	2	2	36	14,090013
13	12,926	167,081476	1,115	-2,270	24,246	BC LL	2	1	12	48,989851
14	9,680	93,710144	6,339	-8,307	3,057	ABC LLL	3	0	8	1,168080
15	19,265	371,140225	-7,192	0,787	-7,612	ABC QLL	3	1	24	2,414082
16	16,594	275,360836	-3,152	9,511	1,187	BC QL	2	2	36	0,039151
17	13,577	184,334929	9,052	2,068	-18,850	ABC LQL	3	1	24	14,805261
18	9,403	88,407006	-2,365	1,899	28,426	ABC QQL	3	2	72	11,222506
19	12,416	154,157056	-7,892	-1,793	-32,548	C Q	1	3	54	19,618247
20	6,761	45,707064	8,901	-9,351	14,920	AC LQ	2	2	36	6,183345
21	9,264	85,825402	1,619	-0,605	10,882	AC QQ	2	3	108	1,096382
22	6,529	42,631758	-3,225	-4,770	-29,936	BC LQ	2	2	36	24,893114
23	7,589	57,588368	12,830	-18,755	15,130	ABC LLQ	3	1	24	9,537826
24	15,581	242,767561	-1,158	-23,620	7,275	ABC QLQ	3	2	72	0,735018
25	12,976	168,376576	8,159	-24,075	16,304	BC QQ	2	3	108	2,461421
26	6,765	45,759813	6,933	-30,043	9,119	ABC LQQ	3	2	72	1,154871
27	10,611	112,593321	10,058	4,351	40,362	ABC QQQ	3	3	216	7,541976

TABELA 25 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	38,00716130
B	16,19688218
C	48,99333724
AB	97,70478894
AC	27,21479252
BC	76,38353783
ABC	47,41153962

TABELA 26 – ANOVA PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	38,007	19,004	3,129	90%
B	2	16,197	8,098	1,334	---
C	2	48,993	24,497	4,034	90%
AB	4	97,705	24,426	4,022	90%
AC	4	27,215	6,804	1,120	---
BC	4	76,384	19,096	3,145	90%
RESTO	8	48,560	6,072		
TOTAL	26	353,080			

TABELA 27 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	0,053	0,002788	0,164	0,588	1,758	I	---	---	---	---
2	0,055	0,002970	0,182	0,583	0,169	A L	1	2	18	0,001581
3	0,057	0,003238	0,242	0,587	-0,084	A Q	1	3	54	0,000130
4	0,055	0,003047	0,204	0,035	0,078	B L	1	2	18	0,000335
5	0,070	0,004858	0,176	0,068	0,057	AB LL	2	1	12	0,000271
6	0,057	0,003238	0,204	0,066	0,009	AB QL	2	2	36	0,000002
7	0,066	0,004369	0,198	-0,028	0,117	B Q	1	3	54	0,000253
8	0,081	0,006577	0,190	0,011	0,182	AB LQ	2	2	36	0,000922
9	0,095	0,009044	0,199	-0,067	0,106	AB QQ	2	3	108	0,000104
10	0,062	0,003807	0,004	0,078	-0,001	C L	1	2	18	0,000000
11	0,064	0,004070	0,002	-0,001	0,031	AC LL	2	1	12	0,000081
12	0,079	0,006194	0,029	0,000	-0,040	AC QL	2	2	36	0,000044
13	0,055	0,003058	0,017	0,025	-0,078	BC LL	2	1	12	0,000506
14	0,066	0,004409	-0,002	0,035	-0,028	ABC LLL	3	0	8	0,000099
15	0,054	0,002894	0,052	-0,003	0,003	ABC QLL	3	1	24	0,000000
16	0,045	0,002052	0,037	-0,002	-0,026	BC QL	2	2	36	0,000018
17	0,061	0,003660	-0,005	0,009	0,050	ABC LQL	3	1	24	0,000106
18	0,098	0,009545	0,034	0,002	-0,085	ABC QQL	3	2	72	0,000100
19	0,043	0,001840	0,001	0,043	0,009	C Q	1	3	54	0,000001
20	0,076	0,005715	-0,027	0,057	-0,035	AC LQ	2	2	36	0,000034
21	0,080	0,006384	-0,001	0,017	-0,117	AC QQ	2	3	108	0,000127
22	0,064	0,004045	0,013	0,030	0,080	BC LQ	2	2	36	0,000176
23	0,067	0,004543	-0,024	0,072	-0,049	ABC LLQ	3	1	24	0,000101
24	0,059	0,003469	0,022	0,080	-0,018	ABC QLQ	3	2	72	0,000005
25	0,045	0,002016	-0,028	0,054	-0,053	BC QQ	2	3	108	0,000026
26	0,075	0,005640	-0,012	0,082	-0,035	ABC LQQ	3	2	72	0,000017
27	0,079	0,006178	-0,027	-0,031	-0,141	ABC QQQ	3	3	216	0,000092

TABELA 28 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	0,00171145
B	0,00058718
C	0,00000154
AB	0,00129927
AC	0,00028633
BC	0,00072680
ABC	0,00042029

TABELA 29 – ANOVA PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE PERDA DE MASSA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,001711	0,000856	13,17263	99,5%
B	2	0,000587	0,000294	4,519361	95%
C	2	1,54E-06	7,71E-07	0,011876	---
AB	4	0,001299	0,000325	5,000101	95%
AC	4	0,000286	7,16E-05	1,101918	---
BC	4	0,000727	0,000182	2,797003	---
RESTO	8	0,000520	6,5E-05		
TOTAL	26	0,005132			

TABELA 30 – REGRESSÕES PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Ensaio	Equação Polinomial		Equação Exponencial	
1	$y = 0,0025x^2 + 0,0135x + 0,0625$	R2 = 0,9988	$y = 0,0168e^{1,4954x}$	R2 = 0,9903
2	$y = 0,0027x^2 + 0,0122x + 0,0333$	R2 = 0,9989	$y = 0,9758e^{0,3668x}$	R2 = 0,9921
3	$y = 0,0019x^2 + 0,0022x + 0,0795$	R2 = 0,9993	$y = 0,01048e^{1,5499x}$	R2 = 0,9839
4	$y = 0,0027x^2 - 0,0051x + 0,1285$	R2 = 0,9869	$y = 0,9859e^{0,3629x}$	R2 = 0,9910
5	$y = 0,0024x^2 + 0,0164x + 0,0355$	R2 = 0,9992	$y = 0,0138e^{1,5458x}$	R2 = 0,9917
6	$y = 0,0017x^2 + 0,0005x + 0,0675$	R2 = 0,9987	$y = 0,0140e^{1,4148x}$	R2 = 0,9725
7	$y = 0,0025x^2 + 0,0297x - 0,0106$	R2 = 0,9985	$y = 0,0190e^{1,5009x}$	R2 = 0,9890
8	$y = 0,0024x^2 + 0,0205x + 0,0309$	R2 = 0,9997	$y = 0,0147e^{1,5503x}$	R2 = 0,9936
9	$y = 0,0015x^2 + 0,0154x + 0,0459$	R2 = 0,9994	$y = 0,0157e^{1,4189x}$	R2 = 0,9932
10	$y = 0,0021x^2 + 0,0237x + 0,0288$	R2 = 0,9994	$y = 0,0329e^{1,3856x}$	R2 = 0,9889
11	$y = 0,0035x^2 + 0,0121x + 0,0622$	R2 = 0,9992	$y = 0,0212e^{1,4859x}$	R2 = 0,9863
12	$y = 0,0026x^2 - 0,0073x + 0,106$	R2 = 0,9965	$y = 0,0143e^{1,4777x}$	R2 = 0,9772
13	$y = 0,0033x^2 + 0,0177x + 0,0409$	R2 = 0,9994	$y = 0,0184e^{1,5371x}$	R2 = 0,9909
14	$y = 0,0031x^2 + 0,0037x + 0,0796$	R2 = 0,9975	$y = 0,0219e^{1,4381x}$	R2 = 0,9870
15	$y = 0,0023x^2 + 0,0017x + 0,0868$	R2 = 0,9985	$y = 0,0149e^{1,4713x}$	R2 = 0,9825
16	$y = 0,0038x^2 + 0,0091x + 0,0572$	R2 = 0,9993	$y = 0,0191e^{1,5337x}$	R2 = 0,9851
17	$y = 0,0035x^2 + 0,0187x + 0,0346$	R2 = 0,9995	$y = 0,0185e^{1,5535x}$	R2 = 0,9920
18	$y = 0,0023x^2 + 0,0046x + 0,0761$	R2 = 0,9981	$y = 0,0162e^{1,4409x}$	R2 = 0,9839
19	$y = 0,0069x^2 - 0,0144x + 0,068$	R2 = 0,9981	$y = 0,0108e^{1,0313x}$	R2 = 0,9872
20	$y = 0,005x^2 + 0,0082x + 0,0679$	R2 = 0,9984	$y = 0,0237e^{1,5244x}$	R2 = 0,9873
21	$y = 0,005x^2 - 0,0217x + 0,1143$	R2 = 0,9945	$y = 0,0169e^{1,5530x}$	R2 = 0,9719
22	$y = 0,0061x^2 + 0,0031x + 0,0649$	R2 = 0,9992	$y = 0,0225e^{1,5884x}$	R2 = 0,9846
23	$y = 0,0047x^2 + 0,0257x + 0,0294$	R2 = 0,9998	$y = 0,0235e^{1,5594x}$	R2 = 0,9916
24	$y = 0,0025x^2 + 0,0285x + 0,0278$	R2 = 0,9982	$y = 0,0263e^{1,3849x}$	R2 = 0,9951
25	$y = 0,0049x^2 + 0,0173x + 0,0504$	R2 = 0,9979	$y = 0,0282e^{1,4712x}$	R2 = 0,9888
26	$y = 0,0051x^2 + 0,0123x + 0,0502$	R2 = 0,9982	$y = 0,0255e^{1,4988x}$	R2 = 0,9866
27	$y = 0,0043x^2 - 0,0003x + 0,0571$	R2 = 0,9972	$y = 0,0141e^{1,6264x}$	R2 = 0,9897

Os parâmetros das curvas de Energia Efetiva Específica Acumulada obtidos na Análise Regressão foram submetidos ao método de Yates e de Análise de Variância (ANOVA), conforme apresenta as Tabelas 31 a 40, para a regressão polinomial, e respectivamente para as Tabelas 41 a 46, para as regressões pré-exponencial e exponencial.

TABELA 31 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	0,0025	0,000006250	0,007	0,020	0,091	I	---	---	---	---
2	0,0027	0,000007290	0,007	0,027	-0,011	A L	1	2	18	0,0000064
3	0,0019	0,000003610	0,006	0,045	-0,006	A Q	1	3	54	0,0000006
4	0,0027	0,000007290	0,008	-0,003	-0,002	B L	1	2	18	0,0000002
5	0,0024	0,000005760	0,009	-0,002	-0,001	AB LL	2	1	12	0,0000001
6	0,0017	0,000002890	0,010	-0,006	-0,001	AB QL	2	2	36	0,0000000
7	2,50E-03	0,000006250	0,017	-0,002	0,005	B Q	1	3	54	0,0000004
8	0,0024	0,000005760	0,013	-0,004	0,006	AB LQ	2	2	36	0,0000010
9	0,0015	0,000002250	0,014	0,000	-0,001	AB QQ	2	3	108	0,0000000
10	0,0021	0,000004410	-0,001	-0,001	0,024	C L	1	2	18	0,0000325
11	0,0035	0,000012250	-0,001	0,001	-0,004	AC LL	2	1	12	0,0000010
12	0,0026	0,000006760	-0,001	-0,003	0,002	AC QL	2	2	36	0,0000001
13	0,0033	0,000010890	0,001	0,000	-0,002	BC LL	2	1	12	0,0000003
14	0,0031	0,000009610	-0,001	-0,002	0,002	ABC LLL	3	0	8	0,0000004
15	0,0023	0,000005290	-0,002	0,001	-0,003	ABC QLL	3	1	24	0,0000004
16	0,0038	0,000014440	-0,002	0,000	0,005	BC QL	2	2	36	0,0000006
17	0,0035	0,000012250	-0,004	0,001	0,004	ABC LQL	3	1	24	0,0000008
18	0,0023	0,000005290	-0,001	-0,003	0,004	ABC QQL	3	2	72	0,0000002
19	6,90E-03	0,000047610	-0,001	0,000	0,012	C Q	1	3	54	0,0000026
20	0,005	0,000025000	0,000	0,000	-0,005	AC LQ	2	2	36	0,0000006
21	0,005	0,000025000	-0,001	0,005	0,006	AC QQ	2	3	108	0,0000003
22	0,0061	0,000037210	-0,002	0,000	-0,006	BC LQ	2	2	36	0,0000010
23	0,0047	0,000022090	-0,001	0,001	0,005	ABC LLQ	3	1	24	0,0000010
24	0,0025	0,000006250	-0,001	0,005	-0,006	ABC QLQ	3	2	72	0,0000004
25	0,0049	0,000024010	0,002	-0,001	0,004	BC QQ	2	3	108	0,0000001
26	0,0051	0,000026010	-0,001	-0,002	0,003	ABC LQQ	3	2	72	0,0000001
27	0,0043	0,000018490	-0,001	0,003	0,006	ABC QQQ	3	3	216	0,0000001

TABELA 32 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	0,00000701
B	0,00000065
C	0,00003511
AB	0,00000118
AC	0,00000206
BC	0,00000207
ABC	0,00000304

TABELA 33 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,000007	0,000004	8,250	95%
B	2	0,000001	0,000000	0,760	---
C	2	0,000035	0,000018	41,356	99,9%
AB	4	0,000001	0,000000	0,697	---
AC	4	0,000002	0,000001	1,214	---
BC	4	0,000002	0,000001	1,222	---
RESTO	8	0,000003	0,000000		
TOTAL	26	0,000051			

TABELA 34 – ANOVA PARA O FATOR (Ax^2) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA DESCONSIDERADAS AS INTERAÇÕES

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,000007	0,000004	8,037	99%
B	2	0,000001	0,000000	0,740	---
C	2	0,000035	0,000018	40,286	99,9%
RESTO	20	0,000009	0,000000		
TOTAL	26	0,000051			

TABELA 35 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	0,0135	0,000182250	0,028	0,116	0,273	I	---	---	---	---
2	0,0122	0,000148840	0,022	0,099	-0,066	A L	1	2	18	0,0002420
3	0,0022	0,000004840	0,066	0,059	-0,116	A Q	1	3	54	0,0002492
4	0,0051	0,000026010	0,043	-0,030	0,085	B L	1	2	18	0,0003995
5	0,0164	0,000268960	0,023	-0,037	-0,001	AB LL	2	1	12	0,0000001
6	0,0005	0,000000250	0,032	0,001	0,028	AB QL	2	2	36	0,0000215
7	0,0297	0,000882090	-0,028	-0,032	-0,034	B Q	1	3	54	0,0000212
8	0,0205	0,000420250	0,057	-0,005	-0,080	AB LQ	2	2	36	0,0001796
9	0,0154	0,000237160	0,030	-0,079	-0,011	AB QQ	2	3	108	0,0000011
10	0,0237	0,000561690	-0,011	0,038	-0,056	C L	1	2	18	0,0001755
11	0,0121	0,000146410	-0,005	-0,011	0,031	AC LL	2	1	12	0,0000816
12	0,0073	0,000053290	-0,014	0,058	-0,048	AC QL	2	2	36	0,0000627
13	0,0177	0,000313290	-0,016	-0,003	0,020	BC LL	2	1	12	0,0000337
14	0,0037	0,000013690	-0,016	0,012	-0,007	ABC LLL	3	0	8	0,0000056
15	0,0017	0,000002890	-0,005	-0,010	0,033	ABC QLL	3	1	24	0,0000446
16	0,0091	0,000082810	-0,007	0,013	-0,162	BC QL	2	2	36	0,0007299
17	0,0187	0,000349690	0,025	-0,031	-0,059	ABC LQL	3	1	24	0,0001436
18	0,0046	0,000021160	-0,017	0,046	-0,070	ABC QQL	3	2	72	0,0000675
19	-0,0144	0,000207360	-0,009	0,050	-0,022	C Q	1	3	54	0,0000093
20	0,0082	0,000067240	-0,027	0,029	0,045	AC LQ	2	2	36	0,0000555
21	-0,0217	0,000470890	0,004	-0,113	-0,101	AC QQ	2	3	108	0,0000950
22	0,0031	0,000009610	0,007	-0,016	0,117	BC LQ	2	2	36	0,0003796
23	0,0257	0,000660490	0,012	0,011	-0,037	ABC LLQ	3	1	24	0,0000555
24	0,0285	0,000812250	-0,024	-0,075	0,119	ABC QLQ	3	2	72	0,0001977
25	0,0173	0,000299290	-0,053	0,050	-0,122	BC QQ	2	3	108	0,0001371
26	0,0123	0,000151290	-0,020	-0,041	-0,114	ABC LQQ	3	2	72	0,0001796
27	0,0003	0,000000090	-0,007	-0,020	0,112	ABC QQQ	3	3	216	0,0000578

TABELA 36 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	0,00049119
B	0,00024200
C	0,00024919
AB	0,00042066
AC	0,00039950
BC	0,00002116
ABC	0,00074610

TABELA 37 – ANOVA PARA O FATOR (Bx) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,000491	0,000246	2,614	---
B	2	0,000421	0,000210	2,238	---
C	2	0,000185	0,000092	0,983	---
AB	4	0,000202	0,000051	0,538	---
AC	4	0,000295	0,000074	0,784	---
BC	4	0,001280	0,000320	3,406	90%
RESTO	8	0,000752	0,000094		
TOTAL	26	0,003626			

TABELA 38 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	0,0625	0,001936000	0,175	0,473	1,575	I	---	---	---	---
2	0,0333	0,0003180960	0,232	0,572	0,170	A L	1	2	18	0,0016131
3	0,0795	0,0005836960	0,066	0,530	0,304	A Q	1	3	54	0,0017159
4	0,1285	0,002313610	0,197	0,013	-0,231	B L	1	2	18	0,0029568
5	0,0355	0,0002851560	0,207	0,142	-0,058	AB LL	2	1	12	0,0002842
6	0,0675	0,0005580090	0,168	0,016	-0,088	AB QL	2	2	36	0,0002132
7	-0,0106	0,0001772410	0,250	0,174	-0,108	B Q	1	3	54	0,0002140
8	0,0309	0,0003237610	0,122	0,043	0,327	AB LQ	2	2	36	0,0029703
9	0,0459	0,0005012640	0,158	0,088	-0,078	AB QQ	2	3	108	0,0000560
10	0,0288	0,0002460160	0,017	-0,109	0,057	C L	1	2	18	0,0001805
11	0,0622	0,0002948490	-0,061	-0,029	0,003	AC LL	2	1	12	0,0000010
12	0,106	0,0004583290	0,057	-0,093	-0,086	AC QL	2	2	36	0,0002074
13	0,0409	0,0002430490	0,077	0,040	0,017	BC LL	2	1	12	0,0000230
14	0,0796	0,0002672890	0,046	-0,058	-0,079	ABC LLL	3	0	8	0,0007821
15	0,0868	0,0003492810	0,019	-0,040	0,063	ABC QLL	3	1	24	0,0001628
16	0,0572	0,0001962490	0,046	-0,102	0,385	BC QL	2	2	36	0,0041216
17	0,0346	0,0003180960	-0,037	0,054	-0,068	ABC LQL	3	1	24	0,0001944
18	0,0761	0,0005431690	0,007	-0,039	0,187	ABC QQL	3	2	72	0,0004852
19	0,068	0,0001497690	0,075	-0,222	-0,141	C Q	1	3	54	0,0003703
20	0,0679	0,0002830240	0,125	-0,050	-0,256	AC LQ	2	2	36	0,0018148
21	0,1143	0,0004596840	-0,027	0,164	0,175	AC QQ	2	3	108	0,0002849
22	0,0649	0,0001584040	0,010	0,196	-0,143	BC LQ	2	2	36	0,0005712
23	0,0294	0,0002313610	-0,032	0,004	0,117	ABC LLQ	3	1	24	0,0005655
24	0,0278	0,0003003040	0,064	0,127	-0,249	ABC QLQ	3	2	72	0,0008591
25	0,0504	0,0001260250	0,047	-0,201	0,042	BC QQ	2	3	108	0,0000160
26	0,0502	0,0002323240	0,034	0,138	0,314	ABC LQQ	3	2	72	0,0013703
27	0,0571	0,0005184000	0,007	-0,014	-0,490	ABC QQQ	3	3	216	0,0011129

TABELA 39 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	0,00332903
B	0,00317081
C	0,00055076
AB	0,00352367
AC	0,00230795
BC	0,00473184
ABC	0,00475005

TABELA 40 – ANOVA PARA O FATOR (C) DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,003329	0,001665	2,407	---
B	2	0,003171	0,001585	2,293	---
C	2	0,000551	0,000275	0,398	---
AB	4	0,003524	0,000881	1,274	---
AC	4	0,002308	0,000577	0,834	---
BC	4	0,004732	0,001183	1,711	---
RESTO	8	0,005532	0,000692		
TOTAL	26	0,023146			

TABELA 41 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	0,016889	0,000285	1,003	2,066	2,436	I	---	---	---	---
2	0,975895	0,952372	1,014	0,178	-1,011	A L	1	2	18	0,0567593
3	0,010468	0,000110	0,050	0,192	-0,981	A Q	1	3	54	0,0178131
4	0,9859	0,971999	0,069	-0,982	-0,952	B L	1	2	18	0,0503494
5	0,01383	0,000191	0,055	-0,025	-0,001	AB LL	2	1	12	0,0000001
6	0,014006	0,000196	0,054	-0,004	1,934	AB QL	2	2	36	0,1039210
7	1,90E-02	0,000362	0,052	-0,947	-0,988	B Q	1	3	54	0,0180882
8	0,014702	0,000216	0,072	-0,007	1,904	AB LQ	2	2	36	0,1006985
9	0,015785	0,000249	0,068	-0,027	-3,871	AB QQ	2	3	108	0,1387470
10	0,032972	0,001087	-0,006	-0,954	-1,875	C L	1	2	18	0,1952163
11	0,021248	0,000451	-0,972	-0,015	0,977	AC LL	2	1	12	0,0795839
12	0,014319	0,000205	-0,003	0,016	0,920	AC QL	2	2	36	0,0235203
13	0,018418	0,000339	-0,019	0,003	0,970	BC LL	2	1	12	0,0784192
14	0,021954	0,000482	-0,003	0,016	-0,023	ABC LLL	3	0	8	0,0000687
15	0,014985	0,000225	-0,003	-0,020	-1,919	ABC QLL	3	1	24	0,1534403
16	0,019126	0,000366	0,006	1,930	0,949	BC QL	2	2	36	0,0250336
17	0,018546	0,000344	0,004	-0,006	-1,950	ABC LQL	3	1	24	0,1583834
18	0,016297	0,000266	-0,014	0,011	3,832	ABC QQL	3	2	72	0,2039373
19	1,09E-02	0,000119	-1,924	-0,975	1,903	C Q	1	3	54	0,0670437
20	0,023716	0,000562	0,972	0,012	-0,936	AC LQ	2	2	36	0,0243374
21	0,016989	0,000289	0,005	-0,025	-0,959	AC QQ	2	3	108	0,0085090
22	0,022557	0,000509	0,005	1,934	-0,908	BC LQ	2	2	36	0,0229161
23	0,023593	0,000557	-0,011	-0,015	-0,049	ABC LLQ	3	1	24	0,0000989
24	0,0263	0,000692	-0,002	-0,016	1,954	ABC QLQ	3	2	72	0,0530076
25	0,02826	0,000799	-0,020	-3,864	-1,024	BC QQ	2	3	108	0,0097031
26	0,025545	0,000653	0,002	0,024	1,948	ABC LQQ	3	2	72	0,0526950
27	0,01411	0,000199	-0,009	-0,032	-3,943	ABC QQQ	3	3	216	0,0719929

TABELA 42 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	0,07457239
B	0,06843755
C	0,262226007
AB	0,34336666
AC	0,13595053
BC	0,13607193
ABC	0,69355553

TABELA 43 – ANOVA PARA O FATOR PRÉ-EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,074572	0,037286	0,430	---
B	2	0,068438	0,034219	0,395	---
C	2	0,2622260	0,131130	1,512	---
AB	4	0,343367	0,085842	0,990	---
AC	4	0,135951	0,033988	0,392	---
BC	4	0,136072	0,034018	0,392	---
RESTO	8	0,693624	0,086703		
TOTAL	26	1,714283			

TABELA 44 – APLICAÇÃO DO MÉTODO YATES PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Ensaio	R1	R1*R1	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Efeito	r.	t.	d.	Somatória dos Quadrados da Coluna 3
1	1,4954	2,236221	3,412	11,206	37,767	I	---	---	---	---
2	0,3668	0,134542	3,324	13,324	1,431	A L	1	2	18	0,1138122
3	1,5499	2,402190	4,470	13,238	0,198	A Q	1	3	54	0,0007282
4	0,3629	0,131696	4,349	1,024	1,725	B L	1	2	18	0,1652358
5	1,5458	2,389498	4,447	-0,066	-0,688	AB LL	2	1	12	0,0394339
6	1,4148	2,001659	4,528	0,473	-1,952	AB QL	2	2	36	0,1058309
7	1,5009	2,252701	4,109	0,817	0,859	B Q	1	3	54	0,0136708
8	1,5503	2,403430	4,533	-0,109	-0,917	AB LQ	2	2	36	0,0233326
9	1,4189	2,013277	4,596	-0,510	4,180	AB QQ	2	3	108	0,1617737
10	1,3856	1,919887	0,055	1,058	2,032	C L	1	2	18	0,2294128
11	1,4859	2,207899	1,052	0,179	-0,551	AC LL	2	1	12	0,0253001
12	1,4777	2,183597	-0,082	0,488	-1,327	AC QL	2	2	36	0,0489147
13	1,5371	2,362676	0,092	-0,137	-0,570	BC LL	2	1	12	0,0271035
14	1,4381	2,068132	-0,066	-0,185	-0,230	ABC LLL	3	0	8	0,0066125
15	1,4713	2,164724	-0,093	-0,367	3,057	ABC QLL	3	1	24	0,3893854
16	1,5337	2,352236	0,522	-2,493	-1,596	BC QL	2	2	36	0,0707117
17	1,5535	2,413362	-0,204	-0,024	3,215	ABC LQL	3	1	24	0,4307296
18	1,4409	2,076193	0,155	0,565	-4,832	ABC QQL	3	2	72	0,3243077
19	1,0313	1,063580	2,312	1,235	-2,204	C Q	1	3	54	0,0899640
20	1,5244	2,323795	-1,314	-0,016	1,631	AC LQ	2	2	36	0,0738752
21	1,5530	2,411809	-0,181	-0,360	0,524	AC QQ	2	3	108	0,0025463
22	1,5884	2,523015	-0,109	-2,131	1,188	BC LQ	2	2	36	0,0391974
23	1,5594	2,431728	0,132	0,131	-0,133	ABC LLQ	3	1	24	0,0007393
24	1,3849	1,917948	-0,132	1,084	-1,880	ABC QLQ	3	2	72	0,0490993
25	1,4712	2,164429	-0,465	4,759	0,906	BC QQ	2	3	108	0,0076054
26	1,4988	2,246401	-0,146	-0,505	-1,309	ABC LQQ	3	2	72	0,0238056
27	1,6264	2,645177	0,100	-0,074	5,696	ABC QQQ	3	3	216	0,1501951

TABELA 45 – EFEITOS PRINCIPAIS CONFORME YATES PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fonte de Variação	Somatória dos Quadrados
A	0,11454041
B	0,17890667
C	0,31937682
AB	0,33037110
AC	0,15063627
BC	0,14461795
ABC	1,36826203

TABELA 46 – ANOVA PARA O FATOR EXPONENCIAL DA EQUAÇÃO DE ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA

Fator de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado da Média	Fator Calculado	P
A	2	0,114540	0,057270	0,333	---
B	2	0,178907	0,089453	0,521	---
C	2	0,319377	0,159688	0,929	---
AB	4	0,330371	0,082593	0,481	---
AC	4	0,150636	0,037659	0,219	---
BC	4	0,144618	0,036154	0,210	---
RESTO	8	1,374875	0,171859		
TOTAL	26	2,613324			

A Tabela 47 apresenta uma súmula dos resultados das ANOVA obtidos. Ressalta-se que o parâmetro B aparece predominantemente como interação. Isto pode ser atribuído à proximidade entre os níveis adotados para a altura do material. Também, pode ser a indicação de que o mecanismo de secagem com microondas seja influenciado pela altura da massa, uma vez que ela é da ordem da penetração das microondas esperadas em um material com muita água.

TABELA 47 – RESUMO DOS RESULTADOS DAS ANOVA

Equação	Fator	Perda de Massa Acumulada				Energia Efetiva Específica Acumulada			
		Parâmetros				Parâmetros			
		A	B	C	Interação	A	B	C	Interação
Polinomial	(Ax ²)	99,9%	---	99%	---	99%	---	---	---
	(Bx)	99,9%	---	99%	---	---	---	---	90% BC
	(C)	---	---	---	---	99,9%	---	---	---
Exponencial	Pré-Exponencial	90%	---	90%	AB e BC 90%	---	---	---	---
	Exponencial	99,5%	95%	---	95% AB	---	---	---	---

7.6. Análise de Regressão Multilinear dos Parâmetros das Curvas Exponenciais Experimentais

A análise de regressão multilinear permite que as variáveis estudadas A (potência efetiva específica), B (vazão do ar), C (altura da massa do lodo a secar) sejam correlacionadas com os parâmetros determinados na regressão exponencial como mostram a Tabela 46.

Optou-se em trabalhar apenas com as curvas exponenciais, devido ao fato de vários fenômenos físicos serem bem representativos para este tipo de equação.

Os resultados obtidos com o delineamento fatorial 3^3 foram reduzidos a um fatorial 2^3 , eliminando os pontos médios. A Tabela 48 apresenta esta **seleção em negrito**.

TABELA 48 – ENSAIOS COM ANOVA 3^3

Ensaio	Parâmetros			Ensaio	Parâmetros		
	A	B	C		A	B	C
1	-1	-1	-1	15	0	0	1
2	-1	-1	0	16	0	1	-1
3	-1	-1	1	17	0	1	0
4	-1	0	-1	18	0	1	1
5	-1	0	0	19	1	-1	-1
6	-1	0	1	20	1	-1	0
7	-1	1	-1	21	1	-1	1
8	-1	1	0	22	1	0	-1
9	-1	1	1	23	1	0	0
10	0	-1	-1	24	1	0	1
11	0	-1	0	25	1	1	-1
12	0	-1	1	26	1	1	0
13	0	0	-1	27	1	1	1
14	0	0	0	---	---	---	---

Aos dados dos ensaios de números: 1, 3, 7, 9, 19, 21, 25 e 27, destacados em negrito, aplicou-se o método estatístico de Análise de Regressão Multilinear [45].

As Tabelas 49 A a 49 C, apresentam estes cálculos para a perda de massa.

TABELA 49 A – REGRESSÃO MULTILINEAR DO FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A PERDA DE MASSA ACUMULADA (1^a PARTE)

Ensaio	A	B	C	x _{0.}	x ₁	x ₂	x ₃	x _{1.x₂}	x _{1.x₃}	x _{2.x₃}	x _{1.x_{2.x₃}}
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
3	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
7	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
9	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
19	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
21	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
25	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABELA 49 B – REGRESSÃO MULTILINEAR DO FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A PERDA DE MASSA ACUMULADA (2^a PARTE)

Ensaio	y	x _{0.y}	x _{1.y}	x _{2.y}	x _{3.y}	x _{1.x_{2.y}}
1	12,54	12,5400	-12,5400	-12,5400	-12,5400	12,5400
3	16,85	16,8500	16,8500	-16,8500	-16,8500	-16,8500
7	7,81	7,8100	-7,8100	7,8100	-7,8100	-7,8100
9	9,8549	9,8549	9,8549	9,8549	-9,8549	9,8549
19	12,416	12,4160	-12,4160	-12,4160	12,4160	12,4160
21	9,2642	9,2642	9,2642	-9,2642	9,2642	-9,2642
25	12,976	12,9760	-12,9760	12,9760	12,9760	-12,9760
27	10,611	10,6110	10,6110	10,6110	10,6110	10,6110
---	Total	92,3221	0,8381	-9,8183	-1,7877	-1,4783

TABELA 49 C – REGRESSÃO MULTILINEAR DO FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A PERDA DE MASSA ACUMULADA (3^a PARTE)

Ensaio	x _{1.x_{3.y}}	x _{2.x_{3.y}}	x _{1.x_{2.x_{3.y}}}	yr	dif.	dif2.
1	12,5400	12,5400	-12,5400	13,2443	-0,7043	0,4960
3	-16,8500	16,8500	16,8500	13,2443	3,6058	13,0014
7	7,8100	-7,8100	7,8100	9,8363	-2,0263	4,1058
9	-9,8549	-9,8549	-9,8549	9,8363	0,0186	0,0003
19	-12,4160	-12,4160	12,4160	9,8363	2,5797	6,6550
21	9,2642	-9,2642	-9,2642	9,8363	-0,5721	0,3273
25	-12,9760	12,9760	-12,9760	13,2443	-0,2683	0,0720
27	10,6110	10,6110	10,6110	13,2443	-2,6333	6,9340
Total	-11,8717	13,6319	3,0519	---	---	31,592

A análise e o respectivo teste de significância da regressão, via *Student* pode ser resumido como segue:

a) para a **pré-exponencial para a perda de massa acumulada temos:**

$$b_0 = 11,5402625 \text{ e } b_{23} = 1,7039875.$$

No teste de significância dos parâmetros de regressão temos:

$$t_0 = 28,98245644 \text{ e } 0,001$$

$$t_{23} = 4,279429821 \text{ e } 0,05 \text{ alfa (\%)} \\ t_1 = b_0 + b_{23}.x_2.x_3$$

No teste de significância da regressão: $F_{\text{calc}} = 5,15 < F_{\text{crit}} 19,00$

e convertendo para as variáveis originais:

Fator pré-exponencial da perda de massa acumulada

$$z_1 = 47,54 - 10,95.B - 19,47.C + 2,43.B.C \quad (21)$$

b) para a **exponencial da perda de massa acumulada de massa temos:**

$$b_0 = 0,06465; \quad b_1 = 0,012975$$

$$b_2 = 0,006525 \text{ e } b_{23} = -0,00635$$

No teste de significância dos parâmetros de regressão temos:

$$t_0 = 52,99 \text{ e alfa} = 0,1\%$$

$$t_1 = 10,63 \text{ e alfa} = 0,1\%$$

$$t_2 = 5,35 \text{ e alfa} = 5\%$$

$$t_{23} = -5,20 \text{ e alfa} = 5\%$$

$$z_2 = b_0 + b_1.x_1 + b_2.x_2 + b_{23}.x_2.x_3$$

No teste de significância da regressão: $F_{\text{calc}} = 8,61 < F_{\text{crit}} 19,30$

convertendo para as variáveis originais:

Fator exponencial da perda de massa acumulada:

$$Z_2 = 35,94 + 4,33 \cdot 10^{-5}.A - 10,94.B - 19,47.C + 2,43.B.C \quad (22)$$

Analogamente, para o caso da energia efetiva específica acumulada, temos as Tabelas 50 A a 50 C, respectivamente os seguintes tratamentos de dados:

TABELA 50 A – REGRESSÃO MULTILINEAR DO FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA (1^a PARTE)

Ensaio	A	B	C	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 > x_2$	$x_1.x_3.$	$x_2.x_3$	$x_1.x_2.x_3$
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
3	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
7	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
9	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
19	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
21	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
25	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

TABELA 50 B – REGRESSÃO MULTILINEAR DO FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA (2^a PARTE)

Ensaio	y	$x_0.y$	$x_1.y$	$x_2.y$	$x_3.y$	$x_1.x_2.y$
1	0,0169	0,0169	-0,0169	-0,0169	-0,0169	0,0169
3	0,0105	0,0105	0,0105	-0,0105	-0,0105	-0,0105
7	0,0190	0,0190	-0,0190	0,0190	-0,0190	-0,0190
9	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	-0,0158	0,0158
19	0,0109	0,0109	-0,0109	-0,0109	0,0109	0,0109
21	0,0170	0,0170	0,0170	-0,0170	0,0170	-0,0170
25	0,0283	0,0283	-0,0283	0,0283	0,0283	-0,0283
27	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141
---	$\Sigma =$	0,1324	-0,0177	0,0219	0,0081	-0,0171

TABELA 50 C – REGRESSÃO MULTILINEAR DO FATOR PRÉ-EXPONENCIAL PARA A ENERGIA EFETIVA ESPECÍFICA ACUMULADA (3^a PARTE)

Ensaio	$x_1.x_3.y$	$x_2.x_3.y$	$x_1.x_2.x_3.y$	yr	dif.	dif2.
1	0,0169	0,0169	-0,0169	0,0155	0,0013	0,0000
3	-0,0105	0,0105	0,0105	0,0155	-0,0051	0,0000
7	0,0190	-0,0190	0,0190	0,0155	0,0035	0,0000
9	-0,0158	-0,0158	-0,0158	0,0155	0,0002	0,0000
19	-0,0109	-0,0109	0,0109	0,0176	-0,0067	0,0000
21	0,0170	-0,0170	-0,0170	0,0176	-0,0006	0,0000
25	-0,0283	0,0283	-0,0283	0,0176	0,0107	0,0001
27	0,0141	0,0141	0,0141	0,0176	-0,0035	0,0000
Total	0,0016	0,0070	-0,0234			0,0002

a) para a pré-exponencial da energia efetiva específica acumulada temos:

$$b_0 = 0,0166, b_2 = -0,0027 \text{ e } b_{123} = -0,0029$$

e com o teste de significância dos parâmetros de regressão temos:

$$t_0 = 25,9656 \text{ e alfa} = 0,1\%$$

$$t_2 = 4,3026 \text{ e alfa} = 0,05\%.$$

$$z_3 = b_0 + b_2 \cdot x_2 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

No teste de significância da regressão: $F_{\text{calc}} = 10,82 < F_{\text{crit}} 19,00$

convertendo para as variáveis originais temos:

$$z_3 = 0,0166 + 0,0027 \cdot B - 0,0029 \cdot A \cdot B \cdot C \quad (23)$$

b) para a exponencial da energia efetiva específica acumulada temos:

$$b_0 = 1,4559 \text{ e } b_1 = 0,0881$$

e no teste de significância dos parâmetros de regressão

$$t_0 = 71,0187 \text{ e alfa} = 0,1\%$$

$$t_{13} = 4,2951 \text{ e alfa} = 0,05\%.$$

$$z_4 = b_0 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3$$

No teste de significância da regressão: $F_{\text{calc}} = 8,92 < F_{\text{crit}} 19,00$

convertendo para as variáveis originais temos:

Fator exponencial da energia específica acumulada:

$$z_4 = 1,4559 + 0,0881 \cdot A \cdot C \quad (24)$$

Em suma, após a realização dos ensaios de secagem do lodo residual e da análise estatística dos dados destes ensaios, podemos reescrever as equações empíricas, expressando-as em função de suas variáveis controladas neste estudo:

- para a perda de massa acumulada

$$y = z_1 \cdot e^{(z_2 x)} \text{ (regressão linear empírica)}$$

$$y = (47,54 - 10,95 \cdot B - 19,47 \cdot C + 2,43 \cdot B \cdot C) \cdot e^{(35,94 + 4,33 \cdot 10^{-5} \cdot A - 10,94 \cdot B - 19,47 \cdot C + 2,43 \cdot B \cdot C)x} \quad (25)$$

onde:

y = a perda de massa acumulada;

x = tempo de secagem;

A = potência efetiva específica;

B = vazão do ar, que fixa a velocidade de remoção do vapor de água ao redor da superfície do material na secagem.

C = altura da massa do lodo a secar.

- para a energia específica efetiva acumulada

$$y = z_3 \cdot e^{(z_4 x)} \quad (\text{regressão linear empírica})$$

$$y = (0,0166 + 0,00275 \cdot B - 0,0029 \cdot A \cdot B \cdot C) \cdot e^{(1,4559 + 0,0881 \cdot A \cdot C)x} \quad (26)$$

onde:

y = energia específica efetiva acumulada;

x = tempo de secagem;

A = potência efetiva específica;

C = altura da massa do lodo a secar. B = vazão do ar, que fixa a velocidade de remoção do vapor de água ao redor da superfície do material na secagem.

8. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados na tabela 10 e nas tabelas do anexo 10.2, sumarizadas na tabela 11, mostram que o custo da energia elétrica consumida na secagem com microondas do lodo residual de tratamentos por lodo ativado até níveis de umidade residual da ordem de 11,9 %, é inferior ao custo do descarte terceirizado usualmente praticado, o que indica sua provável viabilidade econômica.

A análise das regressões obtidas a partir das curvas de secagem determinadas e resumidas nas tabelas 12, para a perda de massa acumulada, e na tabela 30, para a energia efetiva específica acumulada, demonstra, em primeira aproximação que a secagem por microondas é um fenômeno diferente da secagem convencional, nos quais a perda de massa acumulada e a energia efetiva específica acumulada podem ser representadas pelas equações:

- Perda de Massa Acumulada (PAM)

$$\text{PAM} = (47,54 - 10,95.B - 19,47.C + 2,43B.C). e^{(35,94+4,33.10^{-5}.A-10,94.B-19,47.C+2,43.B.C)x} \quad (27)$$

- Energia Específica Efetiva Acumulada (EEEA)

$$\text{EEEA} = (0,0166 + 0,00275.B - 0,0029.A.B.C). e^{(1,4559 + 0,0881.A.C)x} \quad (28)$$

onde:

PAM = perda de massa acumulada;

EEEA = energia específica efetiva acumulada;

x = tempo de secagem;

A = potência efetiva específica;

B = vazão do ar, que fixa a velocidade de remoção do vapor de água ao redor da superfície do material na secagem.

C = altura da massa do lodo a secar.

9. REFERÊNCIAS

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 1004 Resíduos Sólidos – Classificação.** Sistema GEDWEB de Normas Eletrônicas Disponível em: <http://www.gedweb.com.br/aplicacao/gedweb/asp/acesso_login_2.asp>. Acesso em: 19.jul.2006.
- [2] ABIQUIM - Associação Brasileira das Indústrias Químicas. **Responsible Care.** Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/conteudo.asp?princ=atu&pag=prog>>. Acesso em: 04.mar.2006.
- [3] IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <http://ibama2.ibama.gov.br/cnia2/renima/download/publicacoes/SERIE_37.PDF>. Acesso em 19.jul.2006.
- [4] FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Casos de Sucesso.** Disponível em: <www.fiesp/casos_de_sucesso/secao2/index.asp>. Acesso em 22.set.2006.
- [5] International Standardization Organization. **ISO 14001. Sistemas da gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso** Sistema GEDWEB de Normas Eletrônicas. Disponível em:<http://www.gedweb.com.br/aplicacao/gedweb/asp/acesso_login_2.asp> Acesso em 19 jul.2006.
- [6] ASSEMAE – **Resolução CONAMA n. 375 .** Disponível em: <<http://www.assemae.org.br/Res.pdf>> Acesso em 22.set.2006.
- [7] BARRETO, C. .O. **Tratamento de efluentes na indústria frigorífica – Parte 3.** Disponível em: <http://www.dipemar.com.br/carne/327/materia_pesquisa_carne.htm>. Acesso em: 18.mar.2006.
- [8] CASAN – Companhia Catarinense de Saneamento – **Lodo Ativado** Disponível em: <<http://www.casan.com.br/index.php?sys=138>>. Acesso em: 18.mar.2006.
- [9] SPERLING M.; e outros, **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbicos por Lodos Ativados.** Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabCarlos/Cap-5.pdf>>. Acesso em: 11.mar.2006.
- [10] VON SPERLING, Marcos **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias** Belo Horizonte, MG: DESA/UFMG, 2002,1 ex(s). 628.35, V92p, 2. ed, v. 4
- [11] NEMEROW N. L.; V. **Aguas Residuales Industriales, Teorías, Aplicaciones y Tratamiento.** Tradução Bascarán G. M. Madrid: H. Blume Ediciones, 1977.

[12] ROBERTSON, J. H. **Water pollution control**. New York: McGraw-Hill Chemical Engineering. 30.Jun.1980, Vol. 87, pp. 102 – 109.

[13] Medição da vazão – **Calha Parshall**. Disponível em <www.cprh.pe.gov.br>. Acesso em 19.set.2006.

[14] GRUTSH, J.F.; MALLART, R.C. **Optimize the effluent system, part 1: Activated sludge process**, 1976.

[15] **Universidade da Água** Disponível em:
<www.uniagua.org.Br/website/default.asp%3D3%26pag%3Dtratamento.htm>
Acesso em 19.set.2006.

[16] **Geração de lodos residuais**. Revista Engenharia 391.?

[17] WOODS, D. R. **Process Design and Engineering Practice**. New Jersey: Practice Hall, 1995, 5-78.

[18] BEWICK M. W. M. (Ed.). **Handbook of Organic Waste Conversion**. New York: Litton Educational Publishing, 1980. Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series.

[19] CORDEIRO, J.S. **Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de água**. São Carlos, SP. 155p. Mestrado. 1981. 1 ex(s)
Orientador : HESPAÑHOL, Ivanildo .

[20] **Lodo residual**, lixiviado, com alta porcentagem de água é encaminhado para incineração - Informações recebidas pelo Sr. José de Faria.

[21] PERRY R. H.; CHILTON, C.H. (Eds). **Chemical Engineer's Handbook**. 5. ed. Tokyo: McGraw-Hill, Kogakusha, 1973, pp. 9-8

[22] PERRY R. H.; J. H. (Eds). **Chemical Engineer's Handbook**. 3 ed, USA, MacGraw-Hill, 1950, Cap. 13.

[23] McCABE W. L.; SMITH J. C.; HARRIOT P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7ed. Boston: McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 2005, seções I e IV.

[24] VIAN A., OCÓN J.; et al. **Elementos de Ingeniería Química (Operaciones Básicas)**, 2. ed. Madrid: Aguilar, 1957, Cap.17.

[25] LEONHARDT, G.F; TORLONI M. **Secagem**. São Caetano do Sul: Escola de Engenharia Mauá. [ca. 1984]. Vol. 1, Cap 2.

- [26] LEONHARDT, G. F. **Contribuição ao Estudo da Secagem de Fermento Prensado em Forno Microondas, Influência da Granulometria, Espessura e Potência**, 1978. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Or. Borzani W., Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- [27] SENISE, J. T. Principais **Estudos Sobre Radiações Não Ionizantes, à Luz das Recomendações da Organização Mundial da Saúde**, IMT, palestra proferida em evento organizado pela Prefeitura de Belo Horizonte, 18.nov.2004, p. 3.
- [28] KINGSTON, H. M., **Sample Preparation: Introduction to Microwave Radiation**, disponível em <<http://science.duq.edu/sampleprep/dir/theory>>, acessado em 01.out.2000.
- [29] SILVERSTEIN, R. M., *et al.* **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. trad. Alencastro, R. B. De, 5 ed, Brasil, Guanabara Koogan, 1991, Cap. 3.
- [30] FINI, A. and BRECCIA, A. **Chemistry by Microwaves. Pure Appl. Chem.** 1999, 71 (4) 573-579.
- [31] LOUPY, A. ed. **Microwaves in Organic Chemistry**. Germany, Wiley-VCH Verlag, 2003, Cap.1.
- [32] LYALIKOV. L. **Physicochemical Analysis**. Moscow, Mir Publishers, 1968, p. 100.
- [33] HARRIS, D. C. **Exploring Chemical Analysis**. Ed. W. H. Freeman and Company. USA, p. 367.
- [34] WHITTAKER, G. **Microwave Heating Mechanisms**, disponível em <<http://www.ed.ac.uk/~ah05/ch1a.html>>, acessado em 01.ago.2000.
- [35] SENISE, J. T. **Utilização de Rádiofrequência e Microondas na Eletrônica Industrial**. Engenharia Química [1984], pp. 51-61.
- [36] SENISE, J. T.; JERMOLOVICIUS L. A., **Microwave Chemistry – A Fertile field for scientific research and industrial applications**. Journal of Microwaves and Optoelectronics, vol. 3 N. 05.jul.2004 *in* <www.jmo.ene.unb.br>.
- [37] LIDSTRÖM, P., *et al.* **Microwave Assisted Organic Synthesis – a Review**. Tetrahedron 2001, 53, pp. 9225-9283.
- [38] MELGAARD, H. L. **Understanding Microwave Heating. Process Heating**, March 1997.

- [39] METAXAS, A. C. and Meredith, R. J. **Industrial Microwave Heating**, Peter Peregrinus, 1992.
- [40] METAXAS, A. C. **Foundations of electroheat; an unified approach**, Chichester, John Wiley, 1996
- [41] NEAS & COLLINS. **Theoretical Concepts and Equipment Design Introduction to Microwave Sample Preparation**. American Chemical Society Washington D.C.: Ed. Kingston H. M. and Lois; Jassie B., dec.1988.
- [42] KINGSTON H. M.; HASHELL S. J. (Eds.) **Microwave-Enhanced Chemistry Fundamentals, Sample Preparation and Applications**. Washington, DC: American Chemical Society, 1997.
- [43] READER H.C. **Understanding Microwave Heating Systems: A perspective on State-of-the-Art**, pp. 22-23, Plenary Lecture (56) 7th International Conference on Microwave and High Frequency Heating, 3rd – 7th September.2001, Bayreuth, Germany
- [44] SCHNEIDERMAN, B. **Técnicas de Estatística**. Várzea Paulista-SP: Produtos Químicos ELEKEIROZ. [1992].
- [45] ARA, A.B.; MUSSETTI A.V.; SCHNEIDERMAN, B. **Introdução à Estatística**, São Paulo, Edgard Blücher, 2003.
- [46] ROZENBERG, I. M., **O Sistema Internacional de Unidades**, 2. ed., São Paulo, Instituto Mauá de Tecnologia, 2002.

10.1. ANEXO

RESULTADOS DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 a 27

TABELA 51 – RESULTADOS DO ENSAIO 2

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3550	28,0	971	0
7	3450	28,5	871	100
14	3250	28,5	671	200
21	3000	28,5	421	250
28	2800	28,5	221	200
35	2770	30,0	191	30
38	1111	28,7	174	17

Outros dados do ensaio 2: temperatura de bulbo seco = 22,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,5 °C; umidade do ar ambiente = 55%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 213 °C.

TABELA 52 – RESULTADOS DO ENSAIO 3

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3750	30,5	1181	0
7	3650	30,5	1081	100
14	3450	30,5	881	200
21	3250	30,0	681	200
28	3000	30,0	431	250
35	2850	30,5	281	150
42	2800	32,0	231	50
50	2750	34,0	181	50
53	1102	31,0	173	58

Outros dados do ensaio 3: temperatura de bulbo seco = 22,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,0 °C; umidade do ar ambiente = 64%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 294 °C.

TABELA 53 – RESULTADOS DO ENSAIO 4

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3400	28,0	971	0
7	3300	28,5	871	100
14	3100	28,5	671	200
21	2900	28,5	471	200
28	2750	28,5	321	150
35	2700	30,0	271	50
42	1053	28,7	116	155

Outros dados do ensaio 4: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,5 °C; umidade do ar ambiente = 64%; temperatura inicial da amostra = 19 °C; temperatura final da amostra = 243 °C.

TABELA 54 – RESULTADOS DO ENSAIO 5

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3450	22,0	939	0
9	3300	24,0	789	150
16	3100	24,0	589	200
23	2900	24,0	389	200
29	2750	25,0	239	150
34	2700	26,0	189	50
37	1081	24,2	182	7

Outros dados do ensaio 5: temperatura de bulbo seco = 19,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 16,0 °C; umidade do ar ambiente = 74%; temperatura inicial da amostra = 18 °C; temperatura final da amostra = 185 °C.

TABELA 55 – RESULTADOS DO ENSAIO 6

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3750	28,0	1217	0
5	3700	29,0	1167	50
13	3500	28,0	967	200
21	3250	28,0	717	250
28	3050	28,0	517	200
35	2850	28,5	317	200
42	2800	29,5	267	50
47	1136	28,4	199	68

Outros dados do ensaio 6: temperatura de bulbo seco = 22,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,5 °C; umidade do ar ambiente = 61%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 257 °C.

TABELA 56 – RESULTADOS DO ENSAIO 7

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3400	22,0	909	0
5	3350	23,0	859	50
15	3100	24,0	609	250
23	2800	24,0	309	300
31	2700	25,0	209	100
39	2675	27,0	184	25
41	1062	24,2	163	21

Outros dados do ensaio 7: temperatura de bulbo seco = 19,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 16,0 °C; umidade do ar ambiente = 74%; temperatura inicial da amostra = 18 °C; temperatura final da amostra = 219 °C.

TABELA 57 – RESULTADOS DO ENSAIO 8

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3450	26,0	931	0
8	3300	26,0	781	150
14	3100	26,0	581	200
21	2900	26,5	381	200
30	2750	27,0	231	150
35	2700	28,0	181	50
41	1062	26,6	163	18

Outros dados do ensaio 8: temperatura de bulbo seco = 21,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,0 °C; umidade do ar ambiente = 67%; temperatura inicial da amostra = 19 °C; temperatura final da amostra = 227 °C.

TABELA 58 – RESULTADOS DO ENSAIO 9

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3750	27,0	1218	0
5	3650	27,0	1118	100
10	3450	26,5	918	200
15	3250	26,0	718	200
28	3050	26,0	518	200
35	2850	26,0	318	200
42	2800	27,0	268	50
48	1102	26,5	203	65

Outros dados do ensaio 9: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C ; temperatura de bulbo úmido = 18,5 °C; umidade do ar ambiente = 72%; temperatura inicial da amostra = 22 °C; temperatura final da amostra = 269 °C.

TABELA 59 – RESULTADOS DO ENSAIO 10

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3400	26,0	898	0
5	3200	27,0	698	200
15	3000	28,0	498	200
21	2800	28,0	298	200
25	2700	29,0	198	100
30	1106	27,6	169	29

Outros dados do ensaio 10: temperatura de bulbo seco = 20,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 16,0 °C; umidade do ar ambiente = 66%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 226 °C.

TABELA 60 – RESULTADOS DO ENSAIO 11

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3500	30,0	934	0
5	3400	30,0	834	100
10	3250	30,0	684	150
15	3100	29,5	534	150
20	2900	29,5	334	200
25	2800	30,0	234	100
30	2750	31,0	184	50
35	1081	30,0	152	32

Outros dados do ensaio 11: temperatura de bulbo seco = 22,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,5 °C; umidade do ar ambiente = 68%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 284 °C.

TABELA 61 – RESULTADOS DO ENSAIO 12

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3800	29,0	1210	0
5	3750	30,0	1160	50
10	3600	30,0	1010	150
15	3400	30,0	810	200
20	3200	30,0	610	200
25	3050	30,0	460	150
30	2900	30,5	310	150
35	2800	32,0	210	100
40	1133	30,2	196	114

Outros dados do ensaio 12: temperatura de bulbo seco = 21,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,0 °C; umidade do ar ambiente = 54%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 266 °C.

TABELA 62 – RESULTADOS DO ENSAIO 13

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3400	22,0	905	0
7	3300	22,0	805	100
14	3100	22,0	605	200
23	2800	24,0	305	300
29	2700	25,0	205	100
35	1103	23,3	166	39

Outros dados do ensaio 13: temperatura de bulbo seco = 18,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 16,0 °C; umidade do ar ambiente = 82%; temperatura inicial da amostra = 17 °C; temperatura final da amostra = 199 °C.

TABELA 63 – RESULTADOS DO ENSAIO 14

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3500	27,0	1029	0
5	3400	27,0	929	100
13	3200	27,0	729	200
24	2800	27,0	329	400
31	2700	28,0	229	100
37	1058	27,2	159	70

Outros dados do ensaio 14: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,0 °C; umidade do ar ambiente = 61%; temperatura inicial da amostra = 18 °C; temperatura final da amostra = 272 °C.

TABELA 64 – RESULTADOS DO ENSAIO 15

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3750	26,0	1210	0
5	3700	26,5	1160	50
10	3550	26,5	1010	150
15	3350	26,5	810	200
20	3200	26,5	660	150
25	3000	26,5	460	200
30	2850	27,0	310	150
35	2800	28,0	260	50
40	2750	29,5	210	50
42	1115	27,0	178	32

Outros dados do ensaio 15: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,5 °C; umidade do ar ambiente = 72%; temperatura inicial da amostra = 17 °C; temperatura final da amostra = 551 °C.

TABELA 65 – RESULTADOS DO ENSAIO 16

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3400	30,0	911	0
5	3350	30,0	861	50
10	3200	30,0	711	150
15	3000	29,5	511	200
20	2800	29,5	311	200
25	2700	30,0	211	100
30	2650	31,0	161	50
35	1053	30,0	154	7

Outros dados do ensaio 16: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,5 °C; umidade do ar ambiente = 64%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 251 °C.

TABELA 66 – RESULTADOS DO ENSAIO 17

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3450	25,0	934	0
7	3300	25,0	784	150
15	3050	25,0	534	250
23	2800	26,0	284	250
30	2700	28,0	184	100
33	1098	25,8	161	23

Outros dados do ensaio 17: temperatura de bulbo seco = 20,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,0 °C; umidade do ar ambiente = 74%; temperatura inicial da amostra = 19 °C; temperatura final da amostra = 236 °C.

TABELA 67 – RESULTADOS DO ENSAIO 18

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3750	25,5	1217	0
5	3700	25,5	1167	50
10	3550	25,5	1017	150
15	3350	26,0	817	200
20	3150	26,0	617	200
25	3000	26,0	467	150
30	2850	26,5	317	150
35	2800	28,0	267	50
40	1136	26,1	199	118

Outros dados do ensaio 18: temperatura de bulbo seco = 21,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,0 °C; umidade do ar ambiente = 64%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 266 °C.

TABELA 68 – RESULTADOS DO ENSAIO 19

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3400	27,0	908	0
9	3200	28,0	708	200
14	3000	28,0	508	200
22	2700	28,5	208	300
32	1060	27,9	123	85

Outros dados do ensaio 19: temperatura de bulbo seco = 20,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 15,0 °C; umidade do ar ambiente = 59%; temperatura inicial da amostra = 17 °C; temperatura final da amostra = 531 °C.

TABELA 69 – RESULTADOS DO ENSAIO 20

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3450	29,5	928	0
5	3350	30,5	828	100
10	3150	31,0	628	200
15	2950	31,0	428	200
20	2800	31,0	278	150
25	2700	32,0	178	100
29	1050	30,8	151	27

Outros dados do ensaio 20: temperatura de bulbo seco = 23,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,0 °C; umidade do ar ambiente = 62%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 261 °C.

TABELA 70 – RESULTADOS DO ENSAIO 21

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3750	29,0	1182	0
5	3650	29,5	1082	100
11	3400	30,0	832	250
16	3200	30,0	632	200
23	2900	30,0	332	300
32	1116	29,7	179	153

Outros dados do ensaio 21: temperatura de bulbo seco = 22,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,0 °C; umidade do ar ambiente = 64%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 209 °C.

TABELA 71 – RESULTADOS DO ENSAIO 22

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3400	27,0	881	0
5	3300	28,0	781	100
11	3100	28,0	581	200
16	2850	28,5	331	250
24	2700	30,0	181	150
30	1069	28,3	132	49

Outros dados do ensaio 22: temperatura de bulbo seco = 22,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,0 °C; umidade do ar ambiente = 64%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 336 °C.

TABELA 72 – RESULTADOS DO ENSAIO 23

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3500	28,0	929	0
5	3350	28,5	779	150
10	3150	28,5	579	200
15	2950	28,0	379	200
20	2800	28,5	229	150
25	2750	30,0	179	50
30	2725	31,5	154	25
32	1029	25,4	131	23

Outros dados do ensaio 23: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,5 °C; umidade do ar ambiente = 64%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 558 °C.

TABELA 73 – RESULTADOS DO ENSAIO 24

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3700	28,0	1212	0
5	3500	27,0	1012	200
12	3200	27,0	712	300
20	3000	28,0	512	200
28	2800	28,0	312	200
30	1080	27,6	182	130

Outros dados do ensaio 24: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,0 °C; umidade do ar ambiente = 61%; temperatura inicial da amostra = 19 °C; temperatura final da amostra = 279 °C.

TABELA 74 – RESULTADOS DO ENSAIO 25

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3450	21,5	912	0
5	3350	23,0	812	100
10	3150	23,0	612	200
15	2950	23,5	412	200
20	2800	24,5	262	150
25	1114	23,1	177	85

Outros dados do ensaio 25: temperatura de bulbo seco = 20,5 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,0 °C; umidade do ar ambiente = 71%; temperatura inicial da amostra = 20 °C; temperatura final da amostra = 223 °C.

TABELA 75 – RESULTADOS DO ENSAIO 26

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3450	24,0	933	0
5	3350	24,5	833	100
10	3150	24,5	633	200
15	2950	24,5	433	200
20	2750	25,0	233	200
25	1079	24,5	180	53

Outros dados do ensaio 26: temperatura de bulbo seco = 19,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 17,0 °C; umidade do ar ambiente = 82%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 162 °C.

TABELA 76 – RESULTADOS DO ENSAIO 27

Tempo (min)	Leitura Dinamômetro (g)	Temperatura Exaustor (°C)	Massa Líquida (g)	Perda de Massa no intervalo (g)
0	3750	24,0	1182	0
7	3600	26,0	1032	150
14	3200	27,0	632	400
20	3000	27,0	432	200
25	2800	27,5	232	200
30	1124	26,3	187	45

Outros dados do ensaio 27: temperatura de bulbo seco = 22,0 °C; temperatura de bulbo úmido = 18,0 °C; umidade do ar ambiente = 68%; temperatura inicial da amostra = 21 °C; temperatura final da amostra = 176 °C.

10.2. ANEXO

**TRATAMENTO DOS RESULTADOS
DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 a 27**

TABELA 77 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 2

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1611,79	-	-	-	-	-
7	100	100	10,3	1593,71	0,1859	0,2135	0,2135	0,3202	38,42
14	200	300	30,9	1563,70	0,1824	0,2719	0,4854	0,7280	87,36
21	250	550	56,6	1533,65	0,1789	0,4250	0,9104	1,3655	163,86
28	200	750	77,2	1452,15	0,1694	0,7666	1,6769	2,5154	301,85
35	30	780	80,3	1334,77	0,1557	0,8153	2,4923	3,7384	448,61
38	17	797	82,1	1334,77	0,0667	0,3836	2,8758	4,3137	517,64

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 2 teve 28 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 77,2% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,51 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 301,85/ton.

TABELA 78 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 3

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1589,51	-	-	-	-	-
7	100	100	8,5	1602,18	0,1869	0,1729	0,1729	0,2594	31,12
14	200	300	25,4	1567,24	0,1828	0,2075	0,3805	0,5707	68,48
21	200	500	42,3	1550,45	0,1809	0,2656	0,6461	0,9691	116,29
28	250	750	63,5	1525,41	0,1780	0,4129	1,0590	1,5885	190,62
35	150	900	76,2	1443,28	0,1684	0,5992	1,6582	2,4873	298,48
42	50	950	80,4	1384,68	0,1615	0,6993	2,3575	3,5363	424,36
50	50	1000	84,7	1347,44	0,1797	0,9926	3,3501	5,0252	603,02
53	58	1008	85,4	1347,44	0,0674	0,3894	3,7396	5,6094	673,12

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 3 teve 35 minutos de duração, com 6 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 76,2% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,49 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 298,48/ton.

TABELA 79 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 4

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1620,26	-	-	-	-	-
7	100	100	10,3	1588,69	0,1853	0,2128	0,2128	0,3192	38,30
14	200	300	30,9	1568,00	0,1829	0,2726	0,4854	0,7281	87,38
21	200	500	51,5	1529,12	0,1784	0,3788	0,8642	1,2963	155,55
28	150	650	66,9	1397,81	0,1631	0,5080	1,3722	2,0583	247,00
35	50	700	72,1	1340,57	0,1564	0,5771	1,9493	2,9240	350,88
42	155	855	88,1	1340,57	0,1564	1,3483	3,2976	4,9464	593,57

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 4 teve 35 minutos de duração, com 6 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 72,1% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,92 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 350,88/ton.

TABELA 80 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 5

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1632,85	-	-	-	-	-
9	150	150	16,0	1573,48	0,2360	0,2991	0,2991	0,4487	53,84
16	200	350	37,3	1572,88	0,1835	0,3115	0,6107	0,9160	109,92
23	200	550	58,6	1560,52	0,1821	0,4680	1,0787	1,6181	194,17
29	150	700	74,6	1386,04	0,1386	0,5799	1,6586	2,4880	298,56
34	50	750	79,9	1327,89	0,1107	0,5855	2,2441	3,3662	403,94
37	7	757	80,6	1327,89	0,0664	0,3648	2,6089	3,9134	469,61

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 5 teve 29 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 74,6% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,49 kWh/kg e com considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 298,56/ton.

TABELA 81 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 6

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1615,98	0,1077	-	-	-	-
5	50	50	4,1	1596,26	0,1330	0,1140	0,1140	0,1710	20,52
13	200	250	20,5	1589,51	0,1590	0,1644	0,2784	0,4175	50,11
21	250	500	41,1	1571,36	0,2095	0,2922	0,5706	0,8559	102,70
28	200	700	57,5	1529,53	0,1784	0,3452	0,9157	1,3736	164,83
35	200	900	74,0	1489,40	0,1738	0,5481	1,4639	2,1958	263,50
42	50	950	78,1	1372,93	0,1602	0,5999	2,0638	3,0957	371,48
47	68	1018	83,7	1372,93	0,1144	0,5749	2,6387	3,9581	474,97

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 6 teve 42 minutos de duração, com 7 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 78,1% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 3,10 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 371,48/ton.

TABELA 82 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 7

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1638,34	-	-	-	-	-
5	50	50	5,5	1646,73	0,1372	0,1598	0,1598	0,2396	28,76
15	250	300	33,0	1572,28	0,2620	0,4303	0,5900	0,8851	106,21
23	300	600	66,0	1668,53	0,2225	0,7200	1,3100	1,9650	235,80
31	100	700	77,0	1568,64	0,2092	1,0007	2,3107	3,4661	415,93
39	25	725	79,8	1348,71	0,1798	0,9773	3,2881	4,9321	591,85
41	21	746	82,1	1349,41	0,0450	0,2760	3,5640	5,3460	641,52

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 7 teve 23 minutos de duração, com 4 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 66,0% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 1,96 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 235,80/ton.

TABELA 83 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 8

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1615,31	-	-	-	-	-
8	150	150	16,1	1583,87	0,2112	0,2704	0,2704	0,4056	48,67
14	200	350	37,6	1550,52	0,1551	0,2669	0,5373	0,8059	96,71
21	200	550	59,1	1533,97	0,1790	0,4697	1,0070	1,5105	181,26
30	150	700	75,2	1343,01	0,2015	0,8721	1,8791	2,8186	338,23
35	50	750	80,6	1344,69	0,1121	0,6191	2,4982	3,7473	449,67
41	18	768	82,5	1344,69	0,1345	0,8250	3,3231	4,9847	598,16

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 8 teve 30 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 75,2% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,82 kWh/kg considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 338,23/ton.

TABELA 84 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 9

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1577,76	-	-	-	-	-
5	100	100	8,2	1572,13	0,1310	0,1172	0,1172	0,1758	21,09
10	200	300	24,6	1554,57	0,1295	0,1411	0,2583	0,3875	46,49
15	200	500	41,1	1547,58	0,1290	0,1796	0,4379	0,6569	78,83
28	200	700	57,5	1533,81	0,3323	0,6416	1,0795	1,6192	194,31
35	200	900	73,9	1471,45	0,1717	0,5398	1,6193	2,4290	291,48
42	50	950	78,0	1351,25	0,1576	0,5882	2,2075	3,3113	397,36
48	65	1015	83,3	1351,25	0,1351	0,6656	2,8732	4,3098	517,17

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 9 teve 42 minutos de duração, com 7 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 78,0% em relação à

massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 3,31 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 397,36/ton.

TABELA 85 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 10

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1868,12	-	-	-	-	-
5	200	200	22,2	1828,30	0,1524	0,2183	0,2183	0,3274	39,29
15	200	400	44,5	1781,76	0,2970	0,5963	0,8146	1,2219	146,63
21	200	600	66,8	1723,76	0,1724	0,5784	1,3930	2,0895	250,74
25	100	700	78,0	1646,96	0,1098	0,5545	1,9476	2,9213	350,56
30	29	729	81,2	1646,96	0,1372	0,8121	2,7597	4,1395	496,74

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 10 teve 25 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 78,0% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,92 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 350,56/ton.

TABELA 86 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 11

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1823,64	-	-	-	-	-
5	100	100	10,7	1797,84	0,1498	0,1796	0,1796	0,2695	32,34
10	150	250	26,8	1788,93	0,1491	0,2179	0,3976	0,5964	71,57
15	150	400	42,8	1776,33	0,1480	0,2772	0,6748	1,0122	121,46
20	200	600	64,2	1729,31	0,1441	0,4315	1,1063	1,6594	199,13
25	100	700	75,0	1609,57	0,1341	0,5732	1,6795	2,5192	302,30
30	50	750	80,3	1512,59	0,1260	0,6850	2,3645	3,5468	425,61
35	32	782	83,7	1512,59	0,1260	0,8293	3,1938	4,7907	574,88

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 11 teve 25 minutos de duração, com 6 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 75,0% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,52 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 302,30/ton.

TABELA 87 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 12

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1745,64	-	-	-	-	-
5	50	50	4,1	1755,08	0,1463	0,1261	0,1261	0,1891	22,70
10	150	200	16,5	1693,75	0,1411	0,1397	0,2658	0,3987	47,85
15	200	400	33,1	1776,57	0,1480	0,1828	0,4486	0,6729	80,75
20	200	600	49,6	1593,35	0,1328	0,2177	0,6663	0,9994	119,93
25	150	750	62,0	1759,54	0,1466	0,3188	0,9850	1,4776	177,31
30	150	900	74,4	1706,41	0,1422	0,4587	1,4437	2,1656	259,87
35	100	1000	82,6	1576,22	0,1314	0,6255	2,0692	3,1038	372,46
40	114	1014	83,8	1576,22	0,1314	0,6702	2,7394	4,1091	493,09

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 12 teve 35 minutos de duração, com 8 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 82,6% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 3,10 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 372,46/ton.

TABELA 88 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 13

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1878,93	-	-	-	-	-
7	100	100	11,1	1843,47	0,2151	0,2672	0,2672	0,4008	48,09
14	200	300	33,2	1830,87	0,2136	0,3531	0,6202	0,9303	111,64
23	300	600	66,3	1668,54	0,2503	0,8206	1,4408	2,1612	259,35
29	100	700	77,4	1573,03	0,1573	0,7673	2,2082	3,3122	397,47
35	39	739	81,7	1573,03	0,1573	0,9476	3,1558	4,7336	568,04

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 13 teve 29 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 77,4% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 3,31 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 397,47/ton.

TABELA 89 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 14

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1856,43	-	-	-	-	-
5	100	100	9,7	1838,27	0,1532	0,1649	0,1649	0,2473	29,68
13	200	300	29,2	1816,76	0,2422	0,3323	0,4972	0,7458	89,49
24	400	700	68,0	1695,56	0,2543	0,7731	1,2702	1,9053	228,64
31	100	800	77,8	1571,16	0,1833	0,8004	2,0707	3,1060	372,72
37	70	870	84,6	1571,16	0,1571	0,9882	3,0588	4,5882	550,59

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 14 teve 31 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 77,8% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 3,11 kWh/kg e

considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 372,72/ton.

TABELA 90 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 15

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1823,15	-	-	-	-	-
5	50	50	4,1	1813,40	0,1511	0,1303	0,1303	0,1954	23,45
10	150	200	16,5	1799,36	0,1499	0,1485	0,2787	0,4181	50,17
15	200	400	33,1	1791,04	0,1493	0,1843	0,4630	0,6945	83,34
20	150	550	45,4	1770,21	0,1475	0,2235	0,6865	1,0298	123,57
25	200	750	62,0	1770,13	0,1475	0,3207	1,0072	1,5108	181,29
30	150	900	74,4	1670,45	0,1392	0,4490	1,4562	2,1843	262,12
35	50	950	78,5	1552,84	0,1294	0,4977	1,9539	2,9309	351,71
40	50	1000	82,6	1562,77	0,1302	0,6201	2,5741	3,8611	463,33
42	32	1032	85,3	1562,77	0,0521	0,2927	2,8667	4,3001	516,01

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 15 teve 35 minutos de duração, com 8 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 78,5% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,93 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 351,71/ton.

TABELA 91 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 16

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1869,70	-	-	-	-	-
5	50	50	5,5	1835,39	0,1529	0,1776	0,1776	0,2665	31,98
10	150	200	22,0	1810,36	0,1509	0,2122	0,3898	0,5847	70,17
15	200	400	43,9	1810,36	0,1509	0,2952	0,6851	1,0276	123,31
20	200	600	65,9	1746,41	0,1455	0,4680	1,1530	1,7295	207,54
25	100	700	76,8	1550,59	0,1292	0,6124	1,7654	2,6481	317,77
30	50	750	82,3	1525,70	0,1271	0,7897	2,5551	3,8327	459,92
35	7	757	83,1	1525,70	0,1271	0,8256	3,3807	5,0711	608,53

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 16 teve 25 minutos de duração, com 6 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 76,8% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,65 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 317,77/ton.

TABELA 92 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 17

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1851,55	-	-	-	-	-
7	150	150	16,1	1842,55	0,2150	0,2742	0,2742	0,4113	49,35
15	250	400	42,8	1813,32	0,2418	0,4528	0,7270	1,0904	130,85
23	250	650	69,6	1730,51	0,2307	0,8124	1,5394	2,3091	277,09
30	100	750	80,3	1564,28	0,1825	0,9918	2,5312	3,7969	455,62
33	23	773	82,8	1564,28	0,0782	0,4858	3,0170	4,5256	543,07

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 17 teve 23 minutos de duração, com 4 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 69,6% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,31 kWh/kg considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 277,09/ton.

TABELA 93 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 18

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	1910,12	-	-	-	-	-
5	50	50	4,1	1835,24	0,1529	0,1311	0,1311	0,1966	23,59
10	150	200	16,4	1824,24	0,1520	0,1495	0,2805	0,4208	50,50
15	200	400	32,9	1816,76	0,1514	0,1853	0,4658	0,6988	83,85
20	200	600	49,3	1800,13	0,1500	0,2431	0,7090	1,0635	127,61
25	150	750	61,6	1801,96	0,1502	0,3215	1,0305	1,5458	185,49
30	150	900	74,0	1687,02	0,1406	0,4435	1,4740	2,2110	265,32
35	50	950	78,1	1587,50	0,1323	0,4955	1,9695	2,9542	354,51
40	118	1018	83,7	1587,50	0,1323	0,6648	2,6343	3,9514	474,17

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 18 teve 35 minutos de duração, com 8 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 78,1% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,95 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 354,51/ton.

TABELA 94 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 19

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2155,22	-	-	-	-	-
9	200	200	22,0	2127,29	0,3191	0,4507	0,4507	0,6760	81,13
14	200	400	44,1	2089,97	0,1742	0,3428	0,7935	1,1903	142,84
22	300	700	77,1	1857,50	0,2477	1,1907	1,9842	2,9764	357,16
32	85	785	86,4	1857,50	0,3096	2,5169	4,5012	6,7518	810,21

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 19 teve 22 minutos de duração, com 4 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 77,1% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,98 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 357,16/ton.

TABELA 95 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 20

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2113,95	-	-	-	-	-
5	100	100	10,8	2060,91	0,1717	0,2074	0,2074	0,3111	24,89
10	200	300	32,3	2021,85	0,1685	0,2683	0,4757	0,7136	57,09
15	200	500	53,9	2005,06	0,1671	0,3904	0,8661	1,2992	103,93
20	150	650	70,0	1856,47	0,1547	0,5565	1,4226	2,1339	170,71
25	100	750	80,8	1773,35	0,1478	0,8302	2,2528	3,3792	270,34
29	27	777	83,7	1773,35	0,1182	0,7829	3,0358	4,5536	364,29

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 20 teve 29 minutos de duração, com 7 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 83,7% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 4,55 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 364,29/ton.

TABELA 96 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 21

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2087,38	-	-	-	-	-
5	100	100	8,5	2108,31	0,1757	0,1624	0,1624	0,2436	29,23
11	250	350	29,6	2068,55	0,2069	0,2486	0,4110	0,6165	73,98
16	200	550	46,5	2055,95	0,1713	0,2711	0,6821	1,0231	122,78
23	300	850	71,9	2035,72	0,2375	0,7154	1,3975	2,0962	251,54
32	153	1003	84,9	2035,72	0,3054	1,7059	3,1034	4,6550	558,61

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 21 teve 23 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 71,9% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,10 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 251,54/ton.

TABELA 97 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 22

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2111,52	-	-	-	-	-
5	100	100	11,4	2075,97	0,1730	0,2215	0,2215	0,3323	26,58
11	200	300	34,1	2055,98	0,2056	0,3539	0,5754	0,8631	69,05
16	250	550	62,4	2009,41	0,1675	0,5059	1,0813	1,6219	129,75
24	150	700	79,5	1815,57	0,2421	1,3374	2,4187	3,6281	290,24
30	49	749	85,0	1815,57	0,1816	1,3754	3,7941	5,6912	455,30

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 22 teve 24 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 79,5% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 3,63 kWh/kg e

considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 290,24/ton.

TABELA 98 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 23

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2057,49	-	-	-	-	-
5	150	150	16,2	2052,61	0,1711	0,2196	0,2196	0,3294	39,52
10	200	350	37,7	2027,87	0,1690	0,2919	0,5114	0,7672	92,06
15	200	550	59,2	1967,80	0,1640	0,4327	0,9441	1,4162	169,94
20	150	700	75,4	1843,42	0,1536	0,6708	1,6149	2,4224	290,69
25	50	750	80,7	1741,51	0,1451	0,8108	2,4257	3,6385	436,63
30	25	775	83,4	1698,48	0,1415	0,9191	3,3448	5,0172	602,06
32	23	798	85,9	1698,48	0,0566	0,4322	3,7770	5,6655	679,85

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 23 teve 20 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 75,4% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,42 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 290,69/ton.

TABELA 99 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 24

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2125,52	-	-	-	-	-
5	200	200	16,5	2085,84	0,1738	0,1718	0,1718	0,2576	30,92
12	300	500	41,2	2064,48	0,2409	0,3383	0,5100	0,7651	91,81
20	200	700	57,8	1992,89	0,2657	0,5190	1,0290	1,5435	185,22
28	200	900	74,3	1780,63	0,2374	0,7610	1,7900	2,6850	322,20
30	130	1030	85,0	1780,63	0,0594	0,3261	2,1161	3,1741	380,90

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 24 teve 30 minutos de duração, com 6 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 85,0% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 3,17 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 380,90/ton.

TABELA 100 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 25

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2210,93	-	-	-	-	-
5	100	100	11,0	2162,16	0,1771	0,2194	0,2194	0,3291	39,49
10	200	300	32,9	2094,30	0,1735	0,2858	0,5052	0,7578	90,94
15	200	500	54,8	2347,60	0,1700	0,4177	0,9229	1,3843	166,12
20	150	650	71,3	1856,65	0,1550	0,6031	1,5260	2,2890	274,68
25	85	735	80,6	1856,65	0,1550	0,8857	2,4117	3,6176	434,11

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 25 teve 20 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 71,3% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,29 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 274,68/ton.

TABELA 101 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 26

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2133,82	-	-	-	-	-
5	100	100	10,7	2094,30	0,1745	0,2095	0,2095	0,3143	37,71
10	200	300	32,2	2069,32	0,1724	0,2724	0,4819	0,7229	86,75
15	200	500	53,6	2047,51	0,1706	0,3941	0,8760	1,3140	157,68
20	200	700	75,0	1839,99	0,1533	0,6581	1,5341	2,3011	276,13
25	53	753	80,7	1839,99	0,1533	0,8518	2,3859	3,5789	429,47

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 26 teve 20 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 75,0% em relação à massa inicial e à energia efetiva específica acumulada corrigida de 2,30 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 276,13/ton.

TABELA 102 - TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO ENSAIO 27

Minuto	Perda (g)	Perda Acum. (g)	Perda Acum. (%)	Potência Efetiva (W)	Energia Efetiva Intervalo (kWh)	Energia Efetiva Específica Intervalo (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada (kWh/kg)	Energia Efetiva Específica Acumulada Corrigida (kWh/Kg)	Custo Específico Tratamento (R\$/ton)
0	-	-	-	2154,65	-	-	-	-	-
7	150	150	12,7	2123,15	0,2477	0,2400	0,2400	0,3600	43,20
14	400	550	46,5	2106,53	0,2458	0,3889	0,6289	0,9433	113,20
20	200	750	63,4	2056,65	0,2057	0,4761	1,1050	1,6574	198,89
25	200	950	80,4	1910,56	0,1592	0,6863	1,7912	2,6868	322,42
30	45	995	84,2	1910,56	0,1592	0,8514	2,6426	3,9639	475,67

Para valores abaixo de R\$ 400, 00, o ensaio 27 teve 25 minutos de duração, com 5 leituras de perda de massa e com uma perda de massa acumulada de 80,4% em relação à massa inicial e à energia específica acumulada corrigida de 2,69 kWh/kg e considerando o custo de energia elétrica, obteve-se o custo de energia elétrica consumida, R\$ 322,42/ton.

10.3. ANEXO

GRÁFICOS DA PERDA DE MASSA ACUMULADA DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 a 27

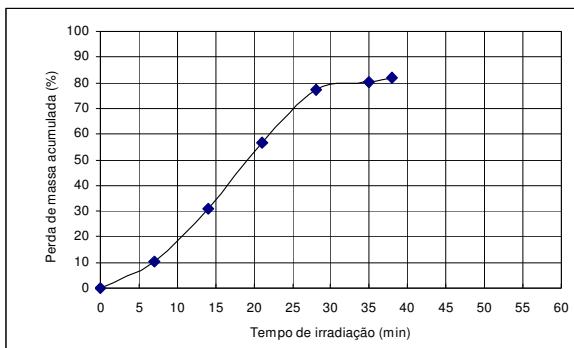


FIGURA 24: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 2

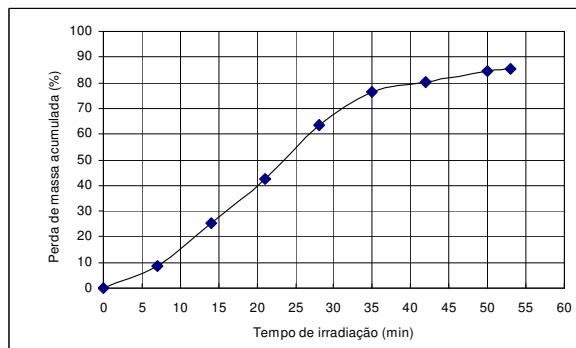


FIGURA 25: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 3

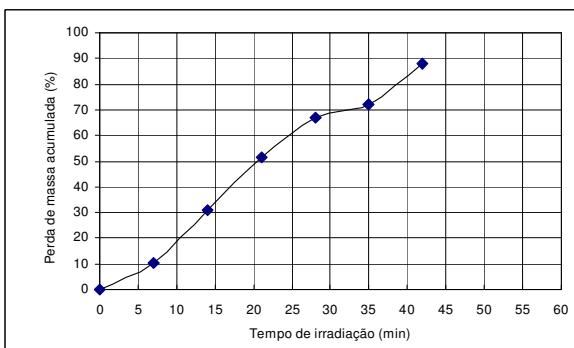


FIGURA 26: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 4

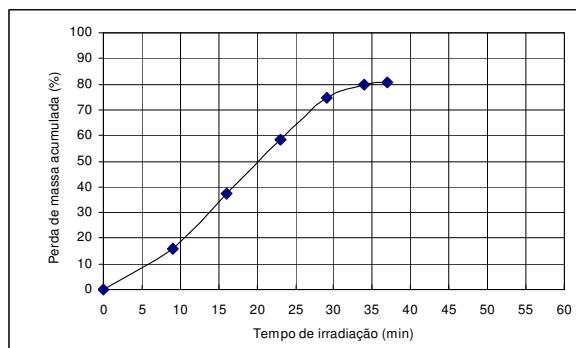


FIGURA 27: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 5

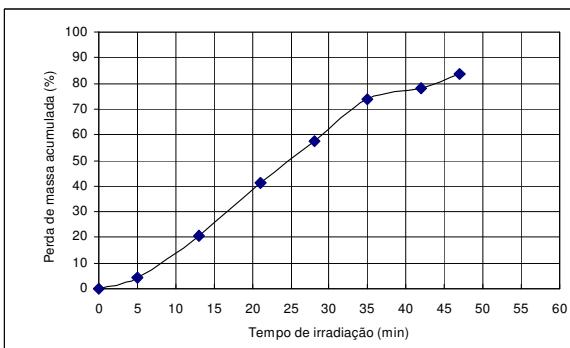


FIGURA 28: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 6

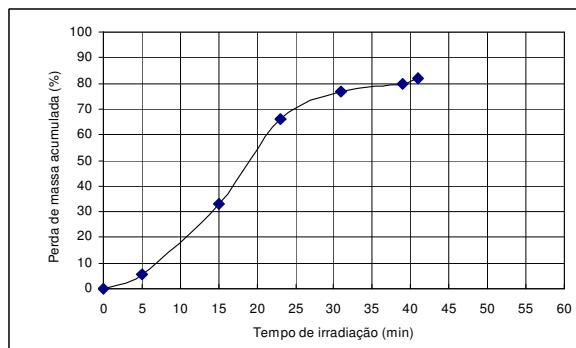


FIGURA 29: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 7

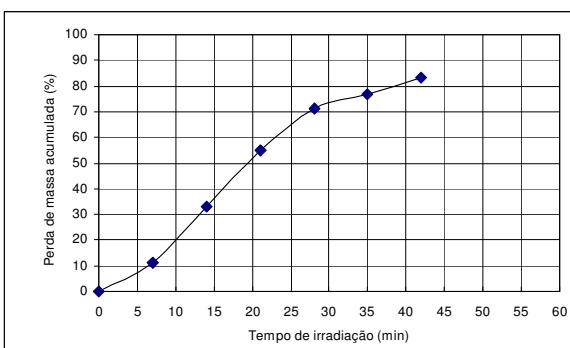


FIGURA 30: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 8

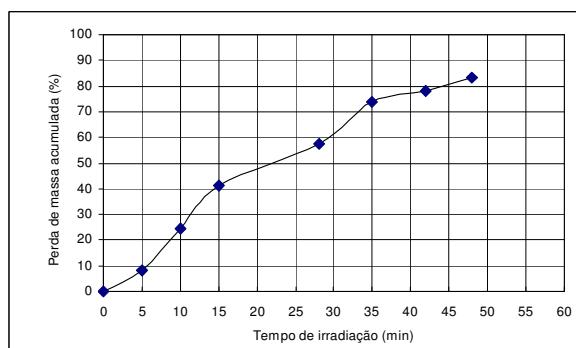


FIGURA 31: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 9

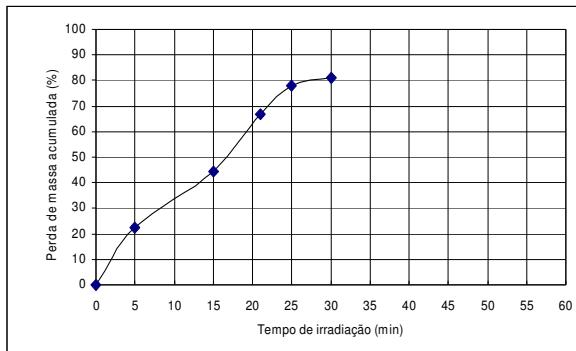


FIGURA 32: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 10

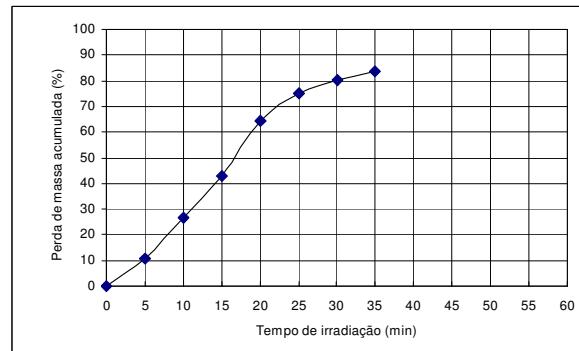


FIGURA 33: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 11

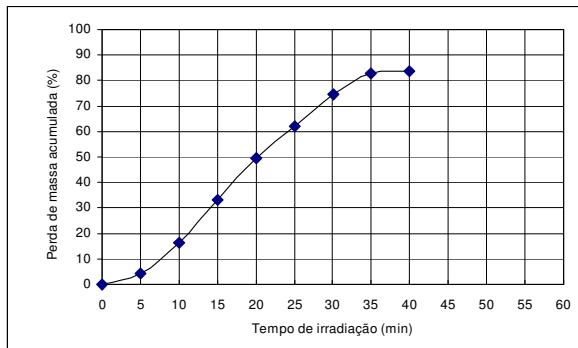


FIGURA 34: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 12

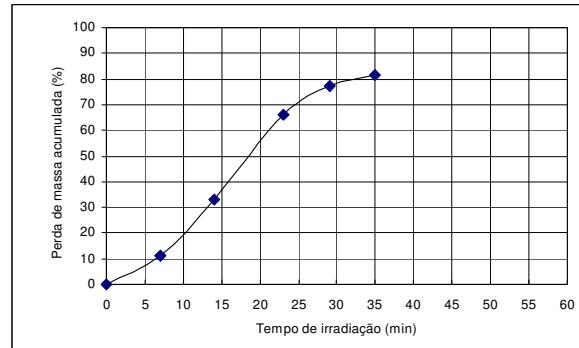


FIGURA 35: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 13

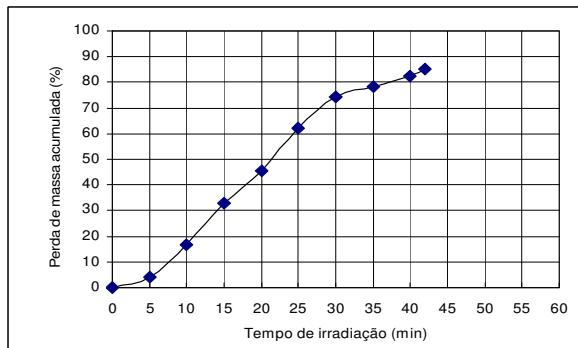


FIGURA 36: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 14

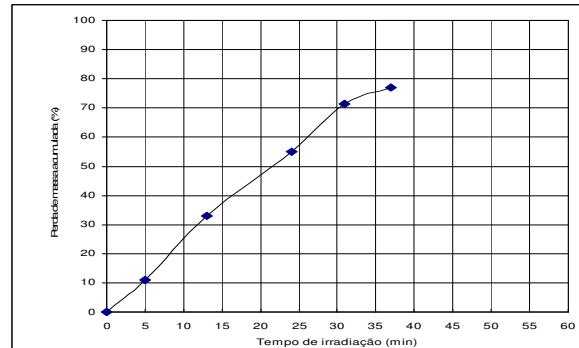


FIGURA 37: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 15

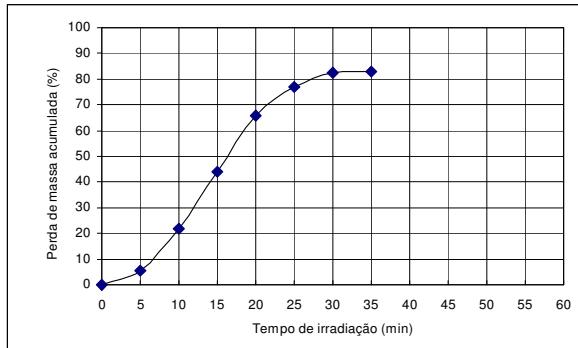


FIGURA 38: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 16

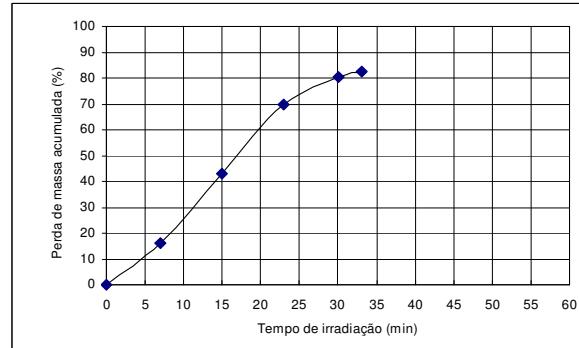


FIGURA 39: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 17

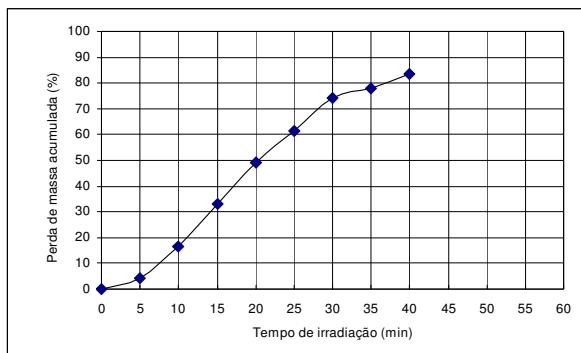


FIGURA 40: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 18

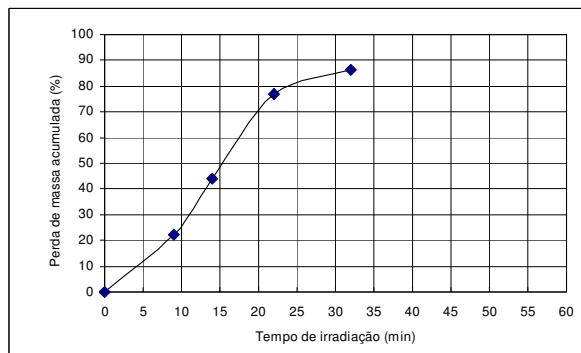


FIGURA 41: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 19

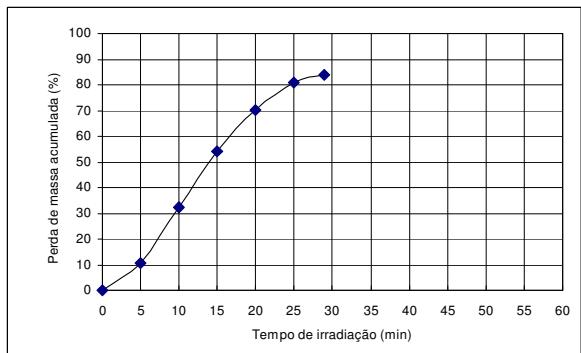


FIGURA 42: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 20

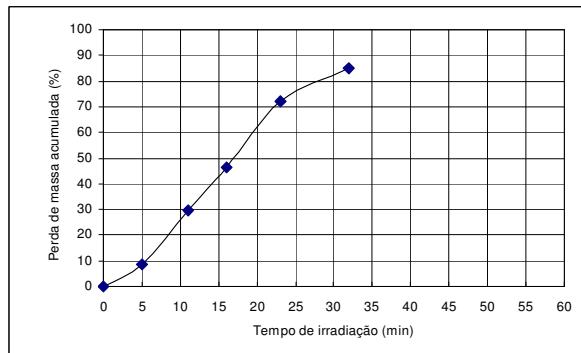


FIGURA 43: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 21

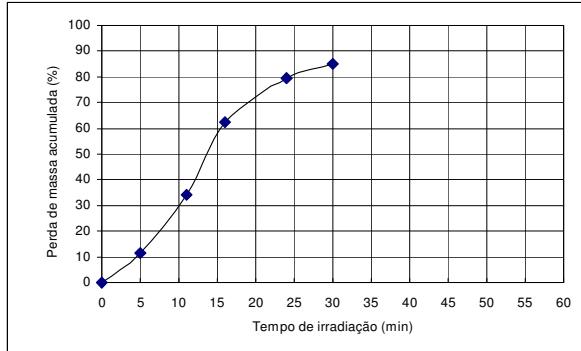


FIGURA 44: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 22

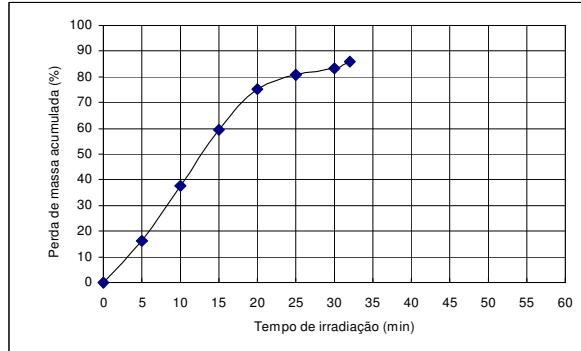


FIGURA 45: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 23

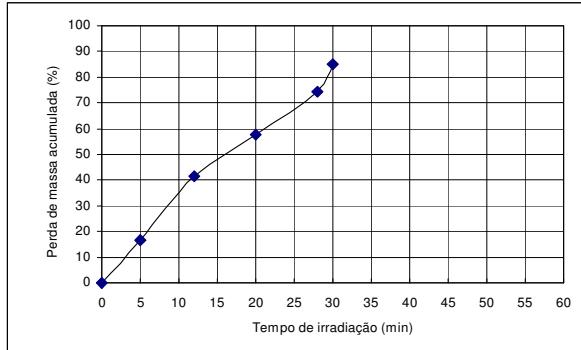


FIGURA 46: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 24

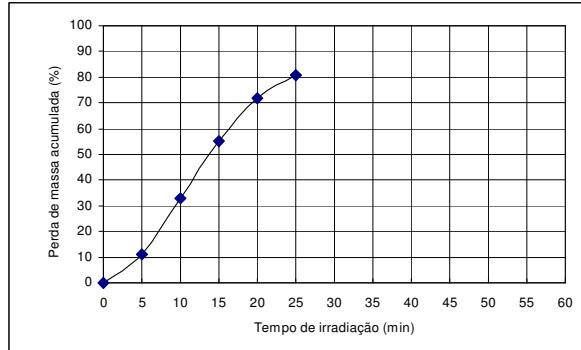


FIGURA 47: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 25

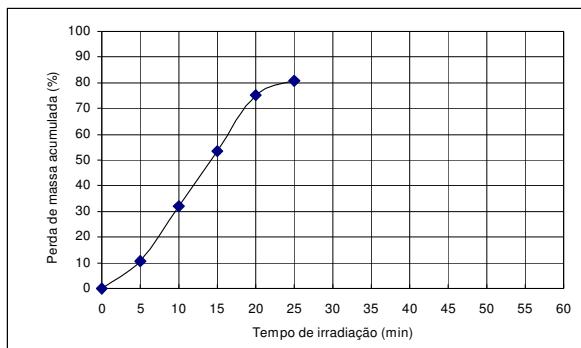


FIGURA 48: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 26

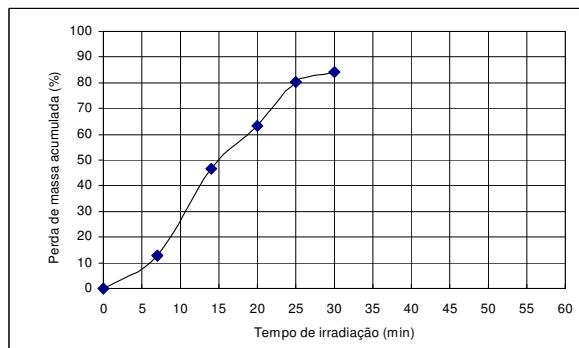


FIGURA 49: PERDA DE MASSA ACUMULADA DO ENSAIO 27

10.4. ANEXO

**GRÁFICOS DA ENERGIA ESPECÍFICA ACUMULADA CORRIGIDA
DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 a 27**

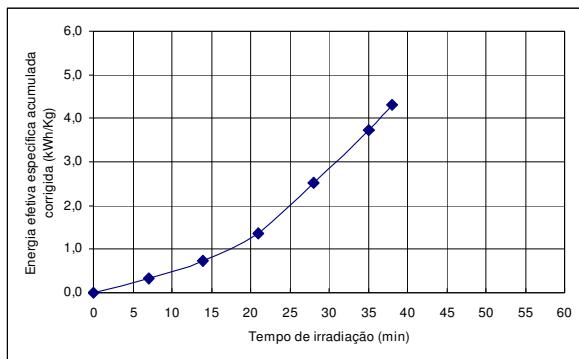


FIGURA 50: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 2

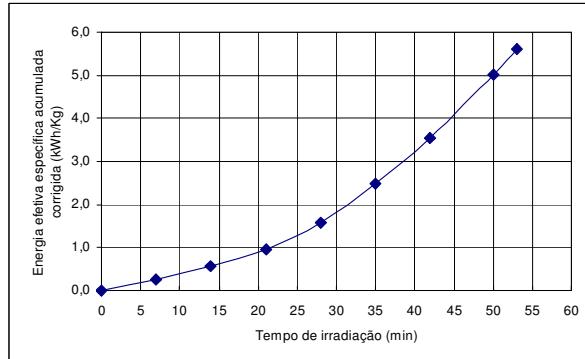


FIGURA 51: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 3

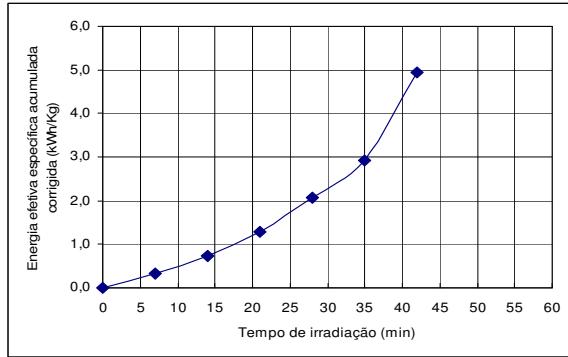


FIGURA 52: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 4

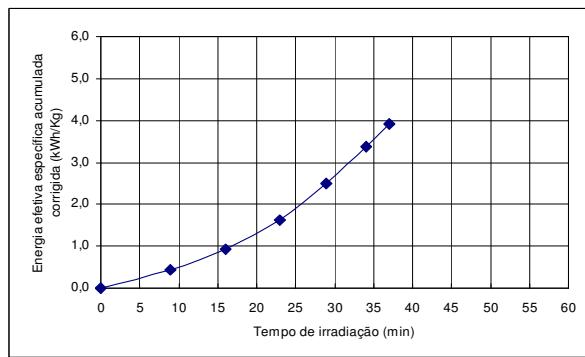


FIGURA 53: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 5

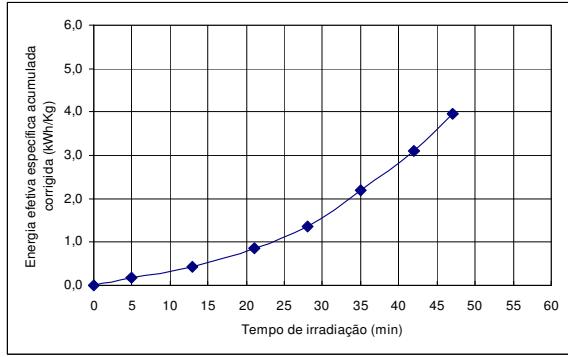


FIGURA 54: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 6

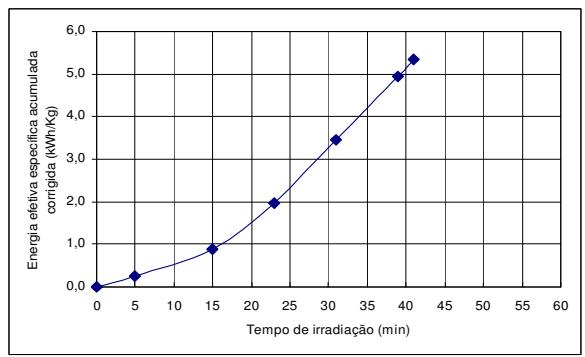


FIGURA 55: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 7

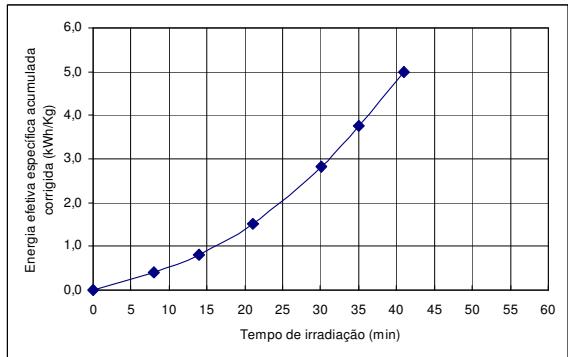


FIGURA 56: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 8

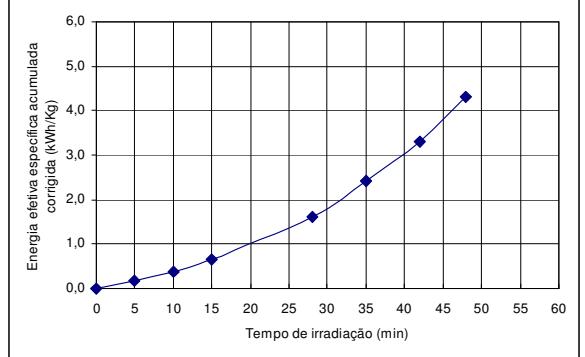


FIGURA 57: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 9

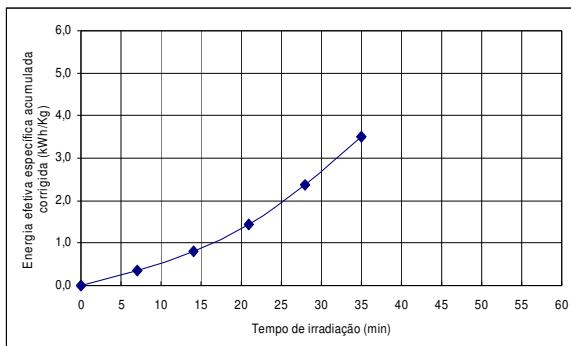


FIGURA 58: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 10

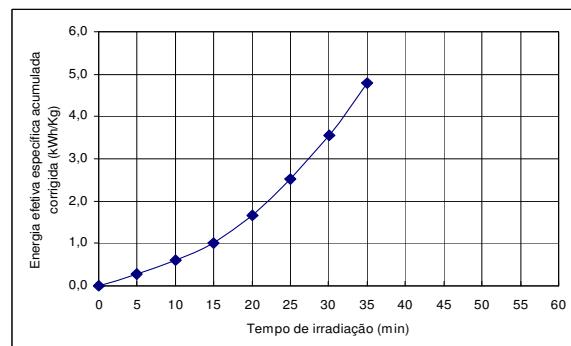


FIGURA 59: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 11

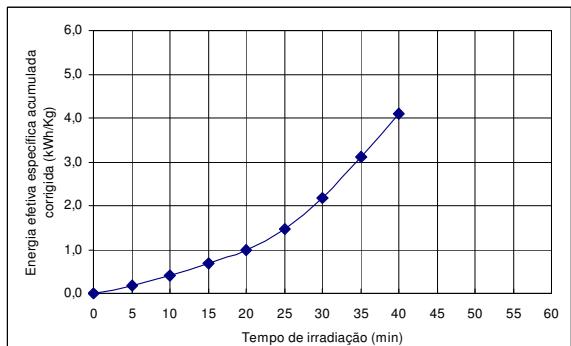


FIGURA 60: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 12

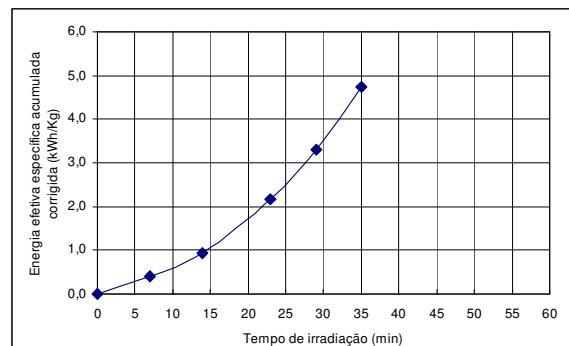


FIGURA 61: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 13

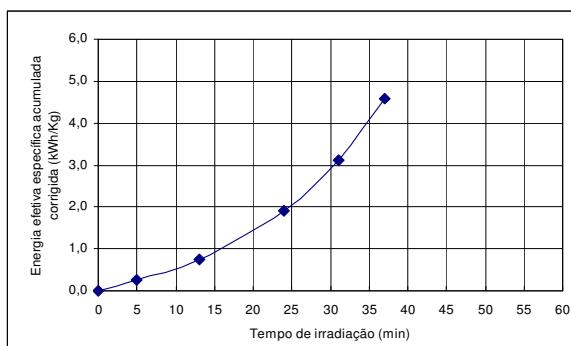


FIGURA 62: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 14

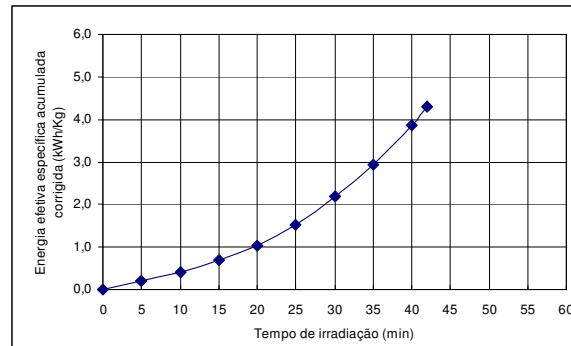


FIGURA 63: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 15

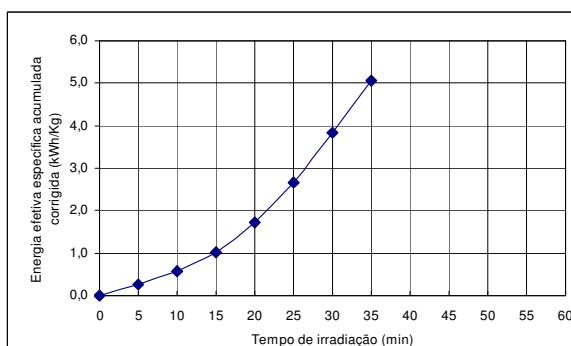


FIGURA 64: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 16

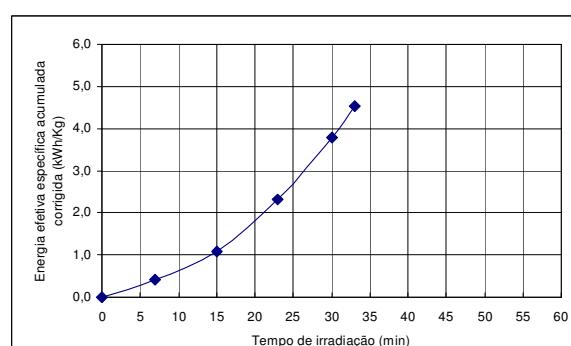


FIGURA 65: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 17



FIGURA 66: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 18

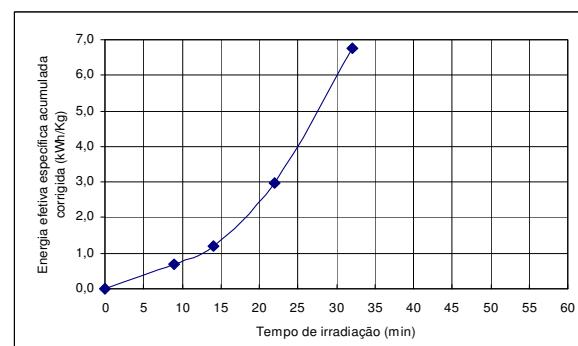


FIGURA 67: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 19

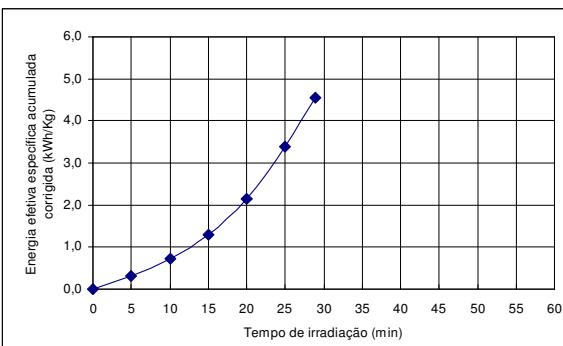


FIGURA 68: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 20



FIGURA 69: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 21

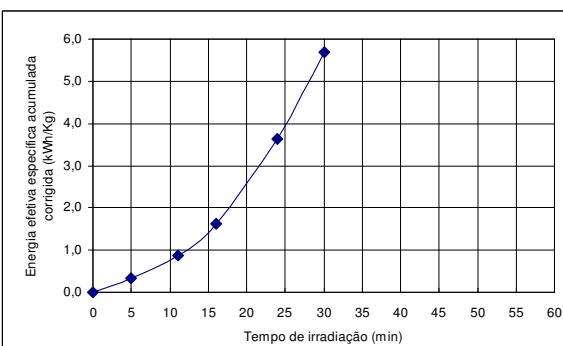


FIGURA 70: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 22

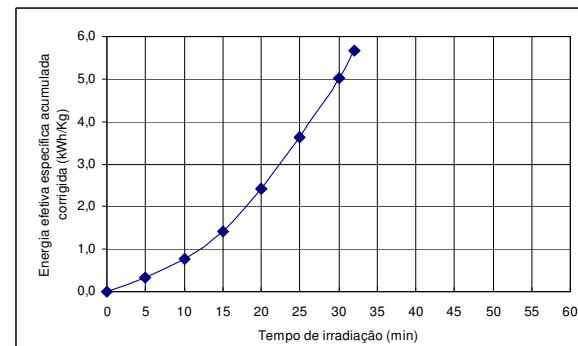


FIGURA 71: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 23

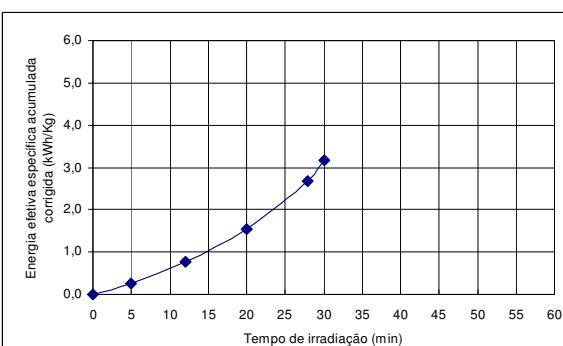


FIGURA 72: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 24

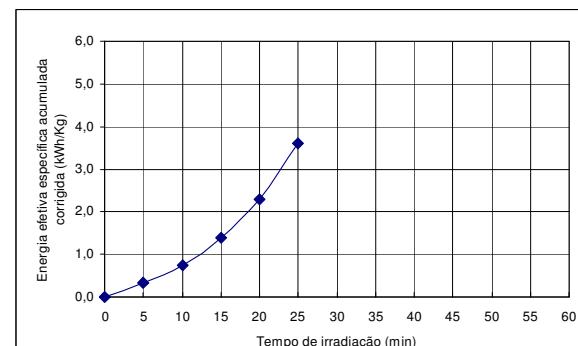


FIGURA 73: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 25

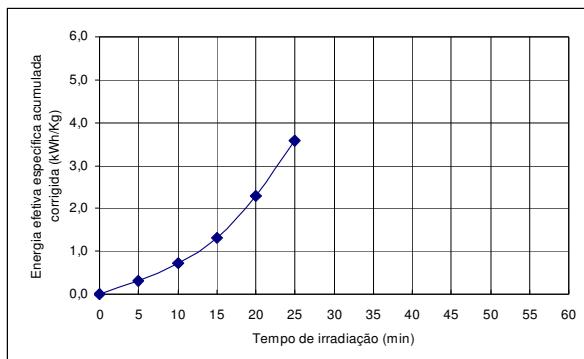


FIGURA 74: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 26

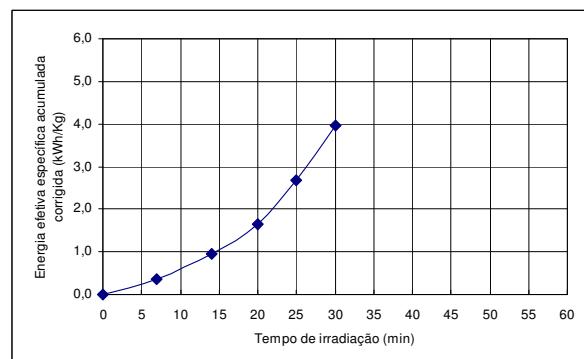


FIGURA 75: ENERGIA ESPEC. ACUMUL CORRIGIDA ENSAIO 27

10.5. ANEXO

GRÁFICOS DA VELOCIDADE DE SECAGEM DOS ENSAIOS EFETIVOS NÚMEROS 2 a 27

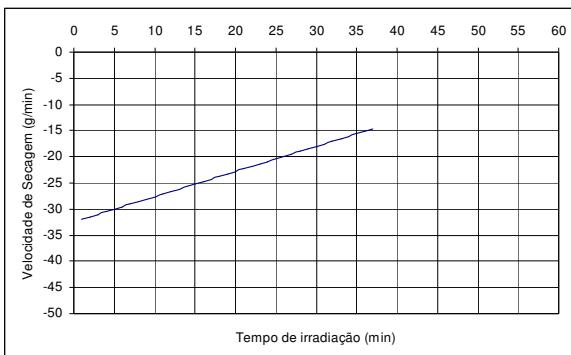


FIGURA 76: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 2

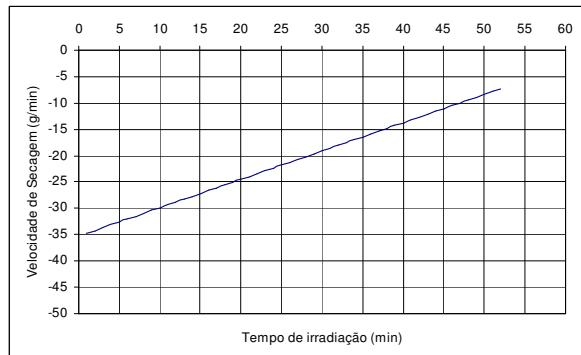


FIGURA 77: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 3

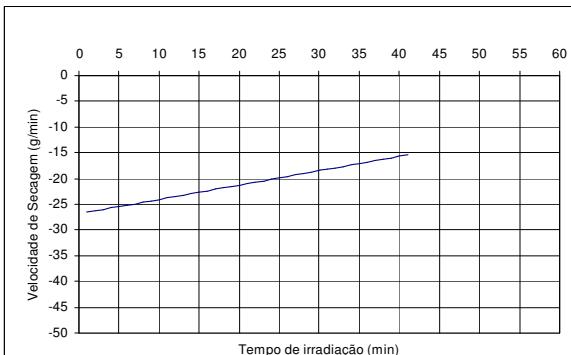


FIGURA 78: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 4

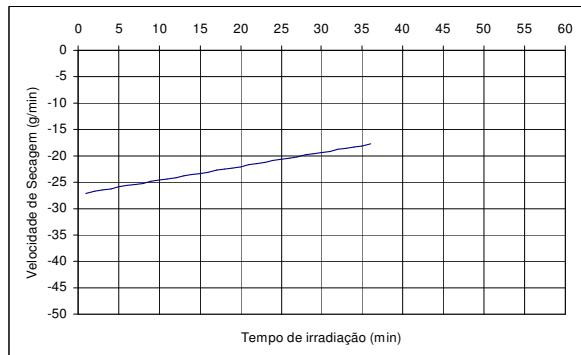


FIGURA 79: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 5

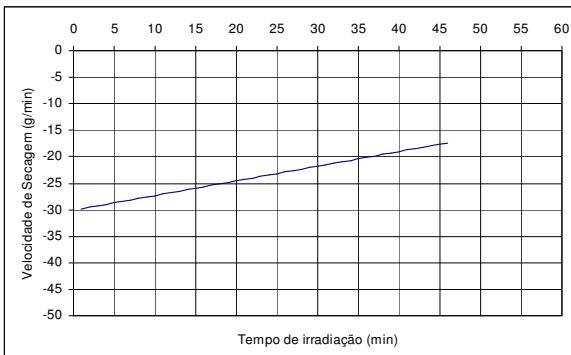


FIGURA 80: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 6

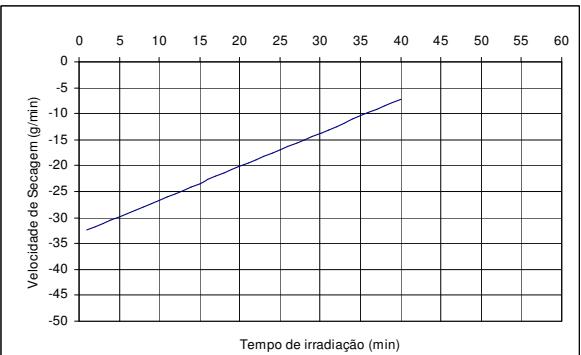


FIGURA 81: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 7

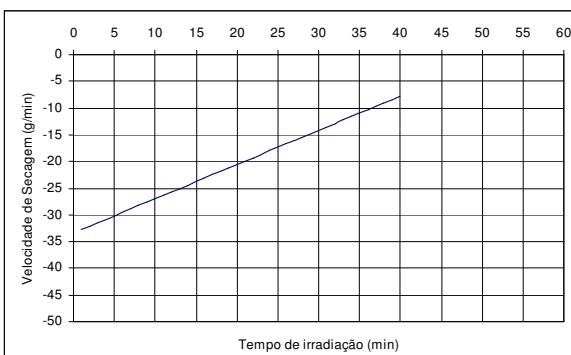


FIGURA 82: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 8

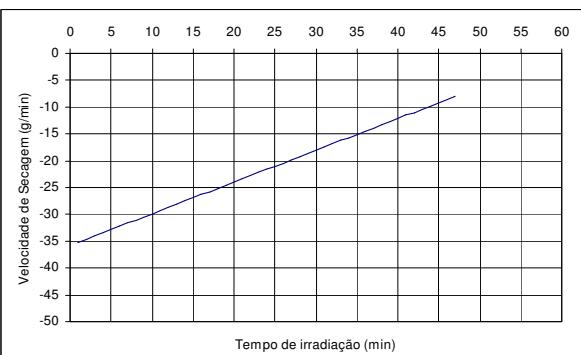


FIGURA 83: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 9

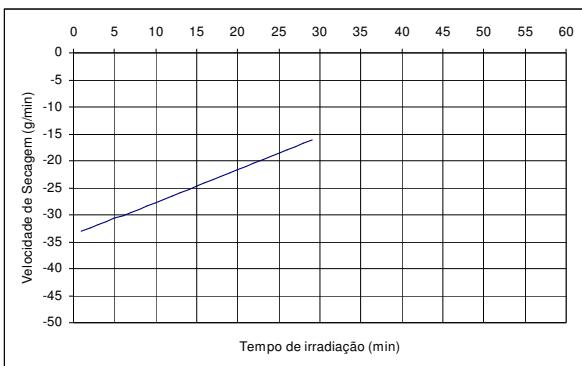


FIGURA 84: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 10

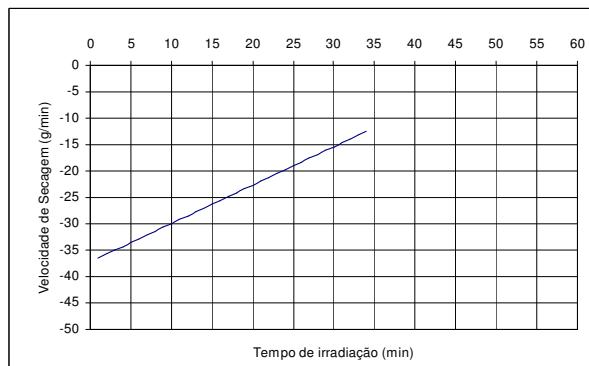


FIGURA 85: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 11

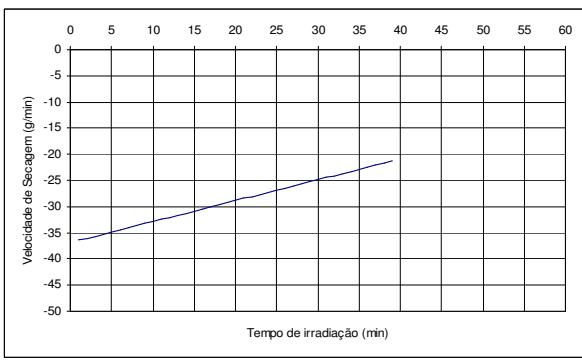


FIGURA 86: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 12

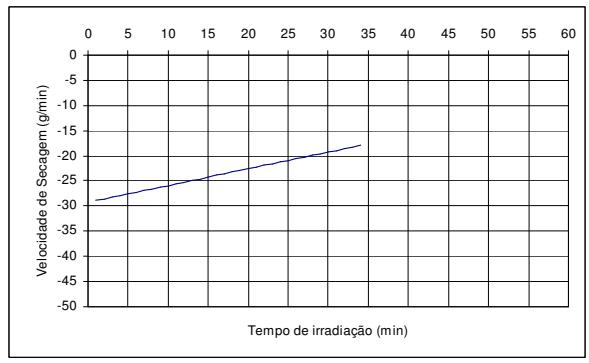


FIGURA 87: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 13

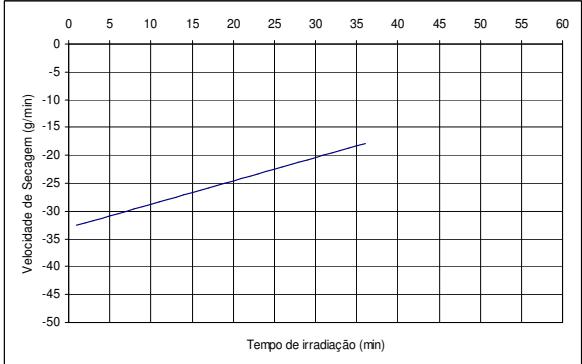


FIGURA 88: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 14

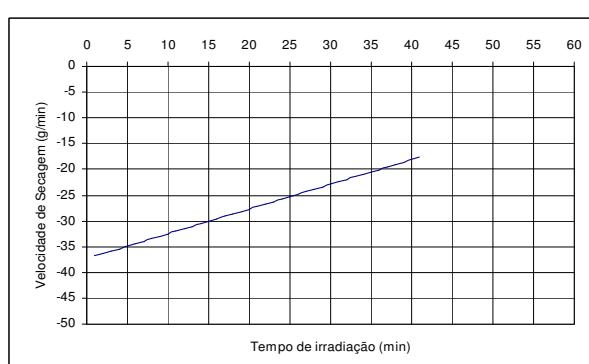


FIGURA 89: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 15

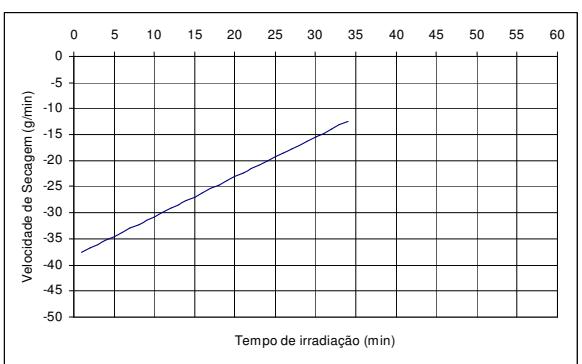


FIGURA 90: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 16

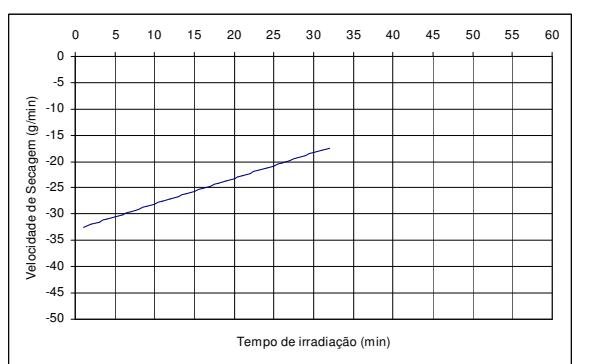


FIGURA 91: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 17

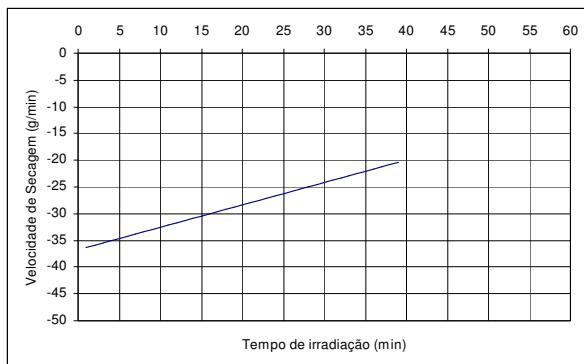


FIGURA 92: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 18

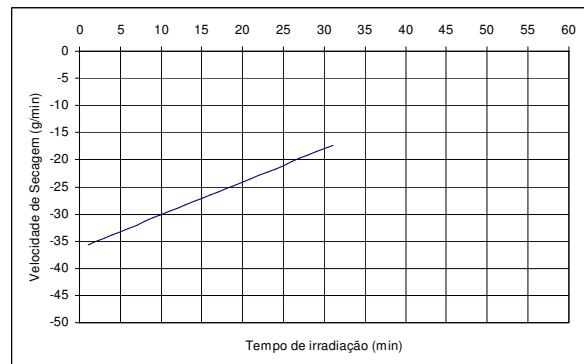


FIGURA 93: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 19

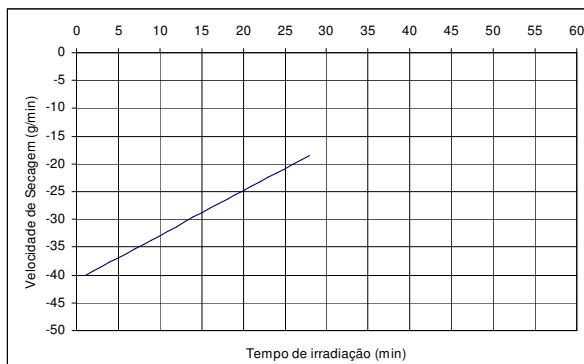


FIGURA 94: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 20

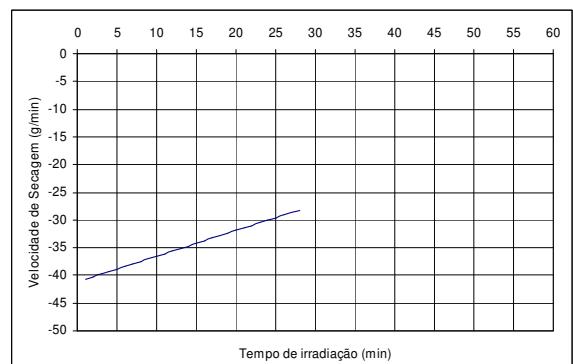


FIGURA 95: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 21

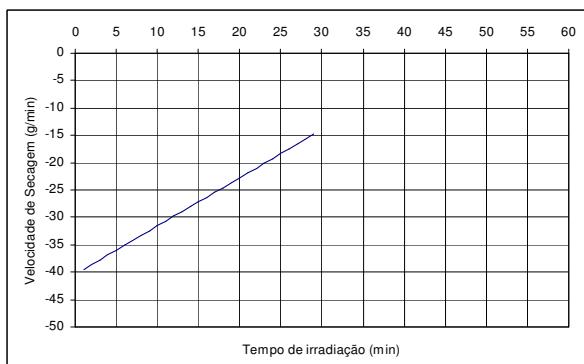


FIGURA 96: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 22

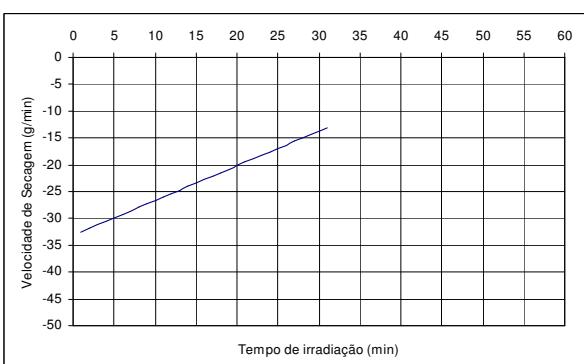


FIGURA 97: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 23

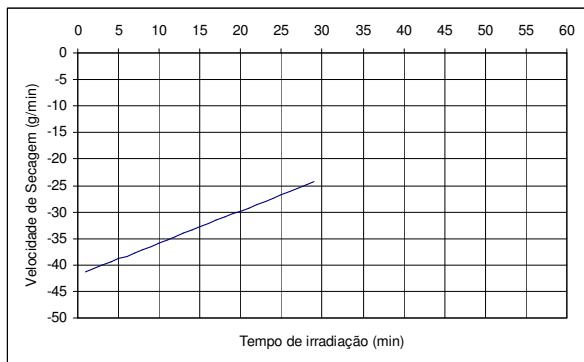


FIGURA 98: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 24

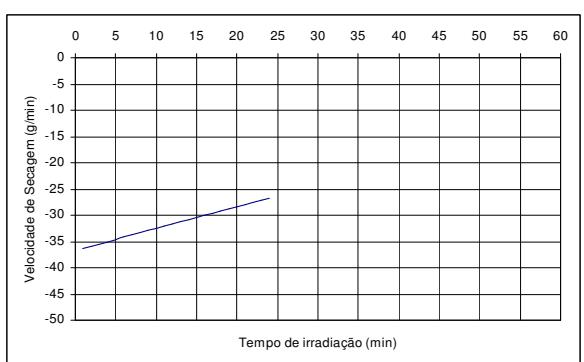


FIGURA 99: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 25

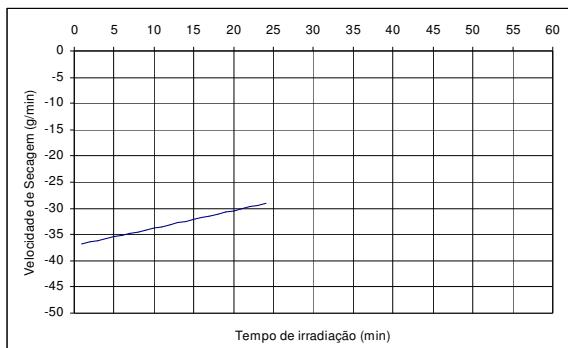


FIGURA 100: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 26

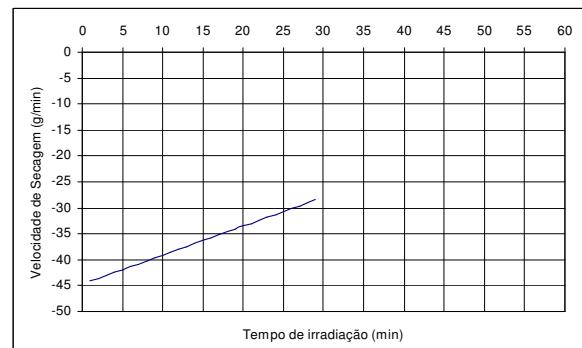


FIGURA 101: VELOCIDADE DE SECAGEM DO ENSAIO 27