

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica
e de Materiais.

PPGE-3M

Estimativa do tempo de secagem de meios porosos inertes
à base de argila em um modelo experimental

José Luís Rodrigues de Freitas Iserhard

TESE PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE-3M

**Estimativa do tempo de secagem de meios porosos inertes
à base de argila em um modelo experimental**

José Luís Rodrigues de Freitas Iserhard
Engenheiro Civil

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE-3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Porto Alegre
2009

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dra. Juliane Vicenzi

Prof. Dr. Felipe Amorim Berutti

Prof. Dr. Wilson Acchar

PROFESSOR ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

PROFESSORA CO-ORIENTADORA: Prof. Dra. Margarete R. F. Gonçalves

AGRADECIMENTO

“O rio segue seu curso contornando obstáculos” (autor desconhecido). Assim vejo a vida ao longo do tempo. É preciso contornar Vários obstáculos para seguir em frente e para tanto contamos com muitas pessoas para que isso se torne uma realidade. Nesse enfoque, suas atuações sejam elas direta ou indiretamente participaram para a realização desse trabalho.

Sinto a cada pesquisa realizada que “Todo o meu saber consiste em saber que nada sei.” (Sócrates, filósofo grego).

Agradeço em primeiro lugar a oportunidade a mim concedida, para atuação nessa área de Engenharia de Materiais, eficientemente coordenada por essa figura ilustre, que tem sido além de um orientador um companheiro e amigo. Graças ao Doutor Carlos Pérez Bergmann, que com maestria e sapiência consegue aglutinar essa equipe maravilhosa que compõe o nosso Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), preparando seus pupilos tanto para a carreira acadêmica quanto para a Sociedade.

Minha amiga Tânia, que desde o primeiro dia em que comecei no LACER, recebeu-me com carinho e de braços abertos, sempre dedicada e fiel escudeira desse laboratório, orientando e organizando essa galera.

Meus amigos Annelise e Felipe, ela por seu potencial de objetividade e organização e ele por se grande companheiro tanto no dia a dia da pesquisa, principalmente com sua contribuição na microinformática (automatização) quanto também grande parceiro nas peladas de futebol.

Antônio Takimi, grande suporte para tudo e para todos, dedicando-se incansavelmente a tarefas tanto de co-orientação quanto de pesquisa e repasse de conhecimentos, mais que um colega, um amigo.

Margarete, grande “Marga” que incansável com essas idas e vindas entre Porto Alegre e Pelotas, além de co-orientar esse trabalho sempre foi uma incentivadora, soube cobrar de forma coesa e sensata os resultados alcançados nesse trabalho.

Registro ainda a Juliane (Ju), que se dividia entre seu trabalho de Tese e ao suporte que um grande laboratório como o LACER exige.

Aos amigos bolsistas: Felipe e Fernando que pegaram juntos e se dedicaram muito na execução experimental desse trabalho.

Colegas e amigos entre eles Saulo, Rubens, Álvaro, Zimmer, Cissa, Ricardo, Andréa, Cassiano, Hugo, Inocêncio, Rafael, Alice, Chambão, Camila entre outros.

Simone Abreu, obrigado por ter se aproximado nessa reta final de trabalho.

Em especial a minha família: Meu Pai Antônio (*in memoriam*), minha mãe Maria Helena, minha irmã Maria Antônia, meu irmão Antônio Maria, meus queridos sobrinhos, Tatio (Antônio) e Tucum (Marcelinho) e demais familiares.

A todos os demais colegas e amigos do LACER que de uma forma ou de outra contribuíram para que houvesse êxito nessa empreitada.

Aos colegas e amigos do Serviço Federal de Processamento de Dados (SERPRO), pelo incentivo.

“A vida que não passamos em revista não vale a pena viver.” (Sócrates, sábio grego)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	IV
SUMÁRIO	VI
ÍNDICE DE TABELAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
RESUMO	XVIII
ABSTRACT	XIX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
4.1 MEIOS POROSOS ARGILOSOS	6
4.1.1 Argilas.....	6
4.1.2 Chamota.....	7
4.2 FORMULAÇÃO DO MATERIAL CERÂMICO	8
4.2.1 Composição e Mistura	8
4.2.2 Plasticidade.....	9
4.2.3 Conformação e Compactabilidade pelo processo de extrusão	10
4.2.4 Porosidade e Mecanismos de fixação da água em materiais cerâmicos.....	10
4.2.4.1 Porosidade	10
4.2.4.2 Mecanismos de fixação de água.....	12
4.3 PSICROMETRIA	20
4.3.1 Carta ou Gráfico Psicrométrico.....	21
4.4 FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	24
4.4.1 Transferência de Calor por Condução.....	24
4.4.2 Transferência de Calor por Convecção.....	26
4.4.3 Transferência de Calor por Radiação.....	26
4.4.4 Pressão de Vapor.....	27
4.5 FENÔMENOS DE SECAGEM	28
4.5.1 Condição de equilíbrio de um sólido úmido com o ar de secagem.....	28
4.5.2 Princípios de secagem.....	29
4.5.3 Taxas e Fases de Secagem.....	32
4.5.3.1 Estágio I - Primeiro período: taxa constante	32
4.5.3.2 Estágio II - Segundo Período: taxa decrescente	35
4.5.4 Caracterização de alguns parâmetros de secagem.....	36
4.5.4.1 Umidade Residual após secagem	36
4.5.4.2 Perdas de água, retrações, tensões internas e tempos de secagem.....	37
4.5.4.3 A curva de Bigot	37
4.6 ESTIMATIVA E PREVISÃO DO TEMPO DE SECAGEM EM MATERIAIS CERÂMICOS.....	39
5 MATERIAIS E MÉTODOS	43
5.1 METODOLOGIA	43
5.2 APARATO EXPERIMENTAL.....	44
5.2.1 Projeto do secador.....	44
5.2.2 Princípio geral de funcionamento.....	46
5.2.2.1 Descrição do sistema de secagem.....	48
5.2.3 Avaliação da eficiência e funcionalidade do secador.....	52
5.3 MATERIAIS	52

5.3.1	<i>Massa cerâmica (Argila sem chamota)</i>	52
5.3.1.1	Composição química.....	53
5.3.1.2	Composição mineralógica.....	54
5.3.1.3	Propriedades físicas.....	56
5.3.2	<i>Chamota</i>	59
5.3.2.1	Composição mineralógica.....	60
5.3.2.2	Propriedades físicas.....	62
5.4	PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	63
5.4.1	<i>Formulação</i>	63
5.4.2	<i>Caracterização</i>	65
5.4.3	<i>Conformação dos corpos-de-prova</i>	66
5.5	ENSAIOS DE SECAGEM.....	67
5.5.1	<i>Aquisição dos dados experimentais</i>	67
5.5.1.1	Perdas de Massas.....	67
5.5.1.2	Temperaturas.....	67
5.5.1.3	Dimensões dos Corpos-de-prova.....	67
5.5.2	<i>Aquisição dos dados experimentais</i>	67
5.5.3	<i>Determinação da resistência mecânica</i>	69
5.5.3.1	Tratamento Estatístico dos Resultados de Resistência Mecânica.....	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
6.1	SECAGEM DA MASSA CERÂMICA SEM CHAMOTA.....	72
6.1.1	<i>Secagem nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C</i>	72
6.1.2	<i>Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C</i>	81
6.2	SECAGEM DA MASSA CERÂMICA COM 5% DE CHAMOTA.....	84
6.2.1	<i>Secagem a 40°C</i>	84
6.2.2	<i>Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C</i>	93
6.3	SECAGEM DA MASSA CERÂMICA COM 8% DE CHAMOTA.....	96
6.3.1	<i>Secagem a 40°C</i>	96
6.3.2	<i>Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C</i>	106
6.4	SECAGEM DA MASSA CERÂMICA COM 10% DE CHAMOTA.....	108
6.4.1	<i>Secagem a 40°C</i>	108
6.4.2	<i>Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C</i>	117
6.5	EFEITO DA TEMPERATURA DE SECAGEM.....	119
6.6	AVALIAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM.....	121
6.6.1	<i>Perda de massa em função do tempo de secagem</i>	121
6.6.2	<i>Análise das curvas de Bigot</i>	125
6.6.3	<i>Resistência Mecânica: Tratamento Estatístico</i>	126
7	CONCLUSÕES	129
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
	GLOSSÁRIO	150

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Parâmetros comparativos da adsorção física e da adsorção química (RUTHVEN, 1997).	15
Tabela 4.2 – Tensão superficial da água (Tsup) em função da temperatura (T) (REED, 1988).	19
Tabela 4.3 Composição média do ar seco (BROSNAN, 2003).	21
Tabela 5.1 Composição química da argila.	53
Tabela 5.2 Limite de plasticidade da argila (NBR 7180/84).	56
Tabela 5.3 Análise granulométrica da massa cerâmica industrial.	57
Tabela 5.4 Formulações dos corpos-de-prova investigados.	65
Tabela 5.5 Área superficial e porosidade dos corpos-de-prova investigados.	65
Tabela 6.1 – Equações da velocidade de secagem em função do tempo de acordo com a temperatura e a composição de chamota (fase II).	123
Tabela 6.2 – Relação do Fator estatístico de Weibull (m) e da resistência média para diversas composições analisadas.	127
Tabela G.1 – Tabela com calor específico para a água, ar e argila.	144
Tabela G.2 – Modelo utilizado para avaliação do rendimento do sistema de secagem em seus vários ambientes.	146
Tabela H.1 – Modelo de planilha que representa as perdas de massa quando da secagem dos corpos cerâmicos, registradas em função da data e do tempo. .	147
Tabela I.1 Modelo de planilha que representa a captação das Temperaturas, quando da secagem dos corpos cerâmicos.	148
Tabela J.1 – Modelo de planilha contendo as dimensões e peso dos corpos-de-prova quando úmidos e secos. No caso estão expostos parte dos dados coletados para 5% de chamota 40°C com 40% de umidade relativa.	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Tipos de porosidade fechada, não-transpassante e transpassante.(COSTA, 2001)	11
Figura 4.2 Representação esquemática dos grânulos com suas partículas (QUINTERO, 2003).....	12
Figura 4.3 Fixação da umidade em meios porosos: a) adsorção física com moléculas de vapor aderindo à superfície. b) condensação capilar, onde a fase líquida se faz presente preenchendo os poros (MENDES, 1997).	16
Figura 4.4 Mecanismos de transferência de umidade em um meio poroso (BUENO <i>et al.</i> , 2003).	17
Figura 4.5 Representação esquemática de um líquido em um cilindro de pequeno raio (r) (MENDES, 1997).....	18
Figura 4.6 Ângulo de contato entre líquido e meio poroso; a) ângulo menor que 90° haverá subida do líquido (capilaridade); b) ângulo maior que 90° haverá descida do líquido (REED, 1988).	18
Figura 4.7 Coluna de líquido: a) Forças exercidas sobre o líquido em um capilar; b) Resultante das forças em um ponto P sobre a superfície e suas componentes verticais (ROUQUENOL, F., ROUQUENOL, J., 1999).....	19
Figura 4.8 Gráfico psicrométrico: pressão de 760mmHg (SOUZA e SILVA, 2000)...	22
Figura 4.9 Diagrama ilustrativo da aplicação do gráfico psicrométrico.....	24
Figura 4.10 Transferência de calor por condução em regime permanente em paredes em paralelo com analogia à resistência elétrica (HOLMAN, 1063).....	25
Figura 4.11 Pressão de vapor da água em regiões de baixa temperatura (BROSANAN, 2003).....	28
Figura 4.12 Fenômenos de transporte de calor e massa. (BARBA, 1977).....	31
Figura 4.13 Secagem de material cerâmico em função do tempo (BARBA. 1977)...	32
Figura 4.14 Fissuras superficiais devido a alta taxa de secagem.	33
Figura 4.15 Fissuras devido a não homogeneidade na distribuição das partículas na matriz.	34
Figura 4.16 Fissura na face com menor umidade residual.....	34
Figura 4.17 Detalhes da curva de Bigot e representação esquemática do sistema argila – água.	38
Figura 4.18 Perda de umidade em função do tempo de secagem.....	39
Figura 4.19 Velocidade de secagem de um corpo cerâmico: a) Convencional b) Experimental.	41
A Figura 5.1 Fluxograma representativo da metodologia adotada no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.	43

Figura 5.2 Algoritmo de Keey: Classificação de secadores segundo o modo de operação (KEEY, 1978). Em negrito encontra-se o sistema aqui adotado.	44
Figura 5.3 Algoritmo de Keey: projeto de funcionamento de um secador (KEEY, 1978).....	45
Figura 5.4 Bancada de teste experimental utilizada neste trabalho.	46
Figura 5.5 Esquema geral de funcionamento do aparato experimental.	47
Figura 5.6 Difratoograma da massa cerâmica obtido pelo método da amostra não orientada.	55
Figura 5.7 Difratoogramas da massa cerâmica, fração argila, obtidos pelo método da amostra orientada: argila natural, glicolada e calcinada (2 horas a 500°C).	55
Figura 5.8 Distribuição granulométrica da massa cerâmica utilizada nos ensaios de secagem.....	57
Figura 5.9 Curva termodilatométrica da massa cerâmica industrial à temperatura máxima de 950°C e taxas de aquecimento e resfriamento de 150°C/h.	58
Figura 5.10 Lajota extrudada, antes da queima, após extrusão em maromba industrial.....	59
Figura 5.11 Detalhes dos filetes de chamota queimados, antes da moagem para serem adicionados na formulação dos corpos-de-prova investigados.....	60
Figura 5.12 Difratoograma da chamota utilizando-se o método da amostra não orientada.	61
Figura 5.13 Difratoogramas da chamota, fração argila, obtido pelo método da amostra orientada: chamota natural e calcinada (2 horas a 500°C).	61
Figura 5.14 Distribuição granulométrica da chamota.	62
Figura 5.15 Curva termodilatométrica da massa cerâmica a temperatura máxima de 900°C e taxas de aquecimento e resfriamento de 150° C/h.	63
Figura 5.16 Diagrama de Winkler, caracterizando as zonas com as granulometrias mais apropriadas quando da fabricação de diversos produtos cerâmicos.	64
Figura 5.17 Corpos-de-prova, após extrusão.	66
Figura 5.18 Modelo de planilha eletrônica (Microsoft® Excel), onde foram registrados os valores das perdas de massa dos 30 corpos-de-prova ensaiados para a formulação 5.40 (massa cerâmica com 5% de chamota e temperatura de secagem de 40°C).	68
Figura 5.19 Detalhe do corpo-de-prova submetido ao ensaio de flexão a quatro pontos, cujas dimensões fazem parte da fórmula representada na Equação 5.1.	69
Figura 6.1 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica sem chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.....	73
Figura 6.2 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica sem chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.....	74
Figura 6.3 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica sem chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.....	75

Figura 6.4 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica sem chamota e suas respectivas equações de regressão linear.	76
Figura 6.5 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica sem chamota e suas respectivas equações de regressão linear.	76
Figura 6.6 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica sem chamota e suas respectivas equações de regressão linear.	77
Figura 6.7 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica sem chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).	78
Figura 6.8 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica sem chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).	79
Figura 6.9 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica sem chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).	80
Figura 6.10 Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas sem chamota, submetidas à secagem a 40°C, 50°C e 60°C.	82
Figura 6.11 Comparação entre as velocidades de perdas de massa “instantânea” em função do tempo de secagem para argila com 0% de chamota nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.	83
Figura 6.12 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 5% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	85
Figura 6.13 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 5% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	86
Figura 6.14 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 5% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	87
Figura 6.15 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica com 5% de chamota e suas equações de regressão linear.	88
Figura 6.16 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica com 5% de chamota e suas equações de regressão linear.	88
Figura 6.17 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica com 5% de chamota e suas equações de regressão linear.	89
Figura 6.18 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 5% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).	90
Figura 6.19 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 5% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).	91
Figura 6.20 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 5% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).	92

Figura 6.21 Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas com 5% de chamota, submetidas à secagem a 40°C, 50°C e 60°C.	94
Figura 6.22 Comparação entre as velocidades “instantânea” de perdas de massa em função do tempo de secagem para argila com 5% de chamota e 95% de argila nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.	95
Figura 6.23 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 8% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	97
Figura 6.24 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 8% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	98
Figura 6.25 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 8% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	99
Figura 6.26 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica com 8% de chamota e suas equações de regressão linear.	100
Figura 6.27 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica com 8% de chamota e suas equações de regressão linear.	100
Figura 6.28 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica com 8% de chamota e suas equações de regressão linear.	101
Figura 6.29 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 8% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).....	102
Figura 6.30 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 8% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).....	103
Figura 6.31 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 8% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).....	104
Figura 6.32 Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas com 8% de chamota, submetidas à secagem a 40°C, 50°C e 60°C.	106
Figura 6.33 Comparação entre as velocidades de perdas de massa em função do tempo de secagem para argila com 8% de chamota e 92% de argila nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.	107
Figura 6.34 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 10% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	109
Figura 6.35 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 10% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	110
Figura 6.36 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 10% de chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.	111
Figura 6.37 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica com 10% de chamota e suas respectivas equações de regressão linear.	112

Figura 6.38 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica com 10% de chamota e suas respectivas equações de regressão linear.	112
Figura 6.39 Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica com 10% de chamota e suas respectivas equações de regressão linear.	113
Figura 6.40 Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 10% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).....	114
Figura 6.41 Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 10% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).....	115
Figura 6.42 Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 10% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).....	116
Figura 6.43 Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas com 10% de chamota, submetidas a secagem a 40°C, 50°C e 60°C.	118
Figura 6.44 comparação entre as velocidades “instantânea” de perdas de massa em função do tempo de secagem para argila com 10% de chamota e 90% de argila nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.....	119
Figura 6.45 Comparação entre as velocidades de secagem em função do tempo de secagem à temperatura de 40°C para as massas cerâmicas com 0%, 5%, 8% e 10% de chamota em sua formulação.	120
Figura 6.46 Comparação entre as velocidades de secagem em função do tempo de secagem à temperatura de 50°C para as massas cerâmicas com 0%, 5%, 8% e 10% de chamota em sua formulação.	120
Figura 6.47 Comparação entre as velocidades de secagem em função do tempo de secagem à temperatura de 60°C para as massas cerâmicas com 0%, 5%, 8% e 10% de chamota em sua formulação.	121
Figura 6.48 Tempo crítico de secagem na fase de perda de massa constante (fase II), para os diferentes teores na massas cerâmicas em função da temperatura de secagem.....	122
Figura 6.49 Vista em superfície do tempo de secagem em função da percentagem de chamota e da temperatura de secagem.....	123
Figura 6.50 Velocidade média de secagem em função da temperatura e do teor de chamota na massa cerâmica.	124
Figura 6.51 Curva de Bigot para a temperatura de secagem de 40°C.....	125
Figura 6.52 Curva de Bigot para a temperatura de secagem de 50°C.....	126
Figura 6.53 Curva de Bigot para a temperatura de secagem de 60°C.....	126
Figura 6.54 – Gráfico da resistência mecânica segundo a distribuição de Weibull.	127
Figura 6.55 Micrografia por microscopia óptica da massa cerâmica com 10% de chamota, após secagem (VICENZI e BERGMANN, 2009).	128

Figura A.1. Vaporização da água tipo gravidade, aplicada sobre um anteparo.	135
Figura A.2. Taxa de evaporação da água em função da pressão manométrica.	136
Figura B.1. Rendimento da câmara de aquecimento.	137
Figura B.2. Modelo de carta psicrométrica utilizada para avaliação do desempenho do secador.	138
Figura C.1 a) Adsorção e Dessorção. b) Adsorção BET	139
Figura C.2 Porosidade e área superficial.	139
Figura D.1 a) Adsorção e Dessorção.b) Adsorção BET	140
Figura D.2 Porosidade e área superficial.	140
Figura E.1a) Adsorção e Dessorção. b) Adsorção BET.....	141
Figura E.2 Porosidade e área superficial.	141
Figura F.1 a) Resistência 0% 40°C b) Resistência 5% 40°C	142
Figura F.2 – a) Resistência 10% 40°C b) Resistência 0% 60°C	142
Figura F.3 – a) Resistência 5% 60°C b) Resistência 10% 60°C	142
Figura F.4 Detalhe da prensa hidráulica utilizada no corpo-de-prova submetido à flexão a quatro pontos.....	143

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	= Constante de Stefan-Boltzmann.
Ω	= Taxa de evaporação d'água.
∂T	- Variação da temperatura
∂x	= Variação da espessura
ν	= Viscosidade cinemática.
μ	= Viscosidade dinâmica.
ΔH	= Calor de adsorção
$\Delta h, \Delta h_v$	Entalpia, entalpia de vapor
ΔT	= Diferença entre temperaturas.
Δp	= Diferença de pressão, Tensão capilar.
$\Delta \mu m$	= Variação da umidade do ar.
ρ	= densidade.
θ	= ângulo de molhagem.
σ	= Tensão superficial.
σ_0	= Tensão à 63,2% de probabilidade em Weibull
ϕ_1	= Potencial de energia do líquido.
ϕ_2	= Potencial de energia do vapor.
ρ_{ar}	= Massa específica do ar.
μ_{esp}	= Volume específico do ar de secagem.
Δm_{H_2O}	= Massa líquida que evapora.
γ_{sem}	= Massa específica aparente do meio poroso.
A	= Área exposta à secagem
B	= Largura do corpo de prova
c	= Calor específico.
C	= Número de componentes do sistema
c_m	= Velocidade média do fluido
C_{max}	= Carga Máxima na prensa
cs	= Contração do meio poroso.
D	= Dimensão característica (diâmetro hidráulico).
dW	= Variação da perda de massa
dx	= Espessura da camada.

dt = Variação do tempo
 F = Vetor forças resultantes e Número de fases do sistema
 F_j = Probabilidade de fratura
 f_L = força entre líquido e ar.
 f_{Ls} = força entre sólido e líquido.
 f_s = força entre sólido e ar.
 g = gravidade.
 h = Entalpia, altura da coluna de água.
 h_c = Coeficiente de convecção.
 k = Coeficiente de condutividade térmica.
 K_{D1} = Coeficiente de proporcionalidade.
 L = Calor latente de vaporização.
 L_2 e L_1 = Comprimento do corpo de prova e comprimento atuadores da prensa
 m = massa.
 m = Coeficiente adimensional de Weibull
 M = Massa molecular.
 M_{bs} = Massa do meio poroso em base seca.
 M_f = Grau de umidade final.
 mf_{H_2O} = Massa final de água.
 m_{H_2O} = Massa de água contida no meio poroso.
 mi_{H_2O} = Massa inicial de água.
 m_{ms} = Massa de matéria seca.
 M_o = Grau de umidade inicial.
 $mmhg$ = Milímetros de mercúrio
 m_t = Massa total de meio poroso.
 N = Número total de corpos de prova na distribuição de Weibull
 P = Pressão atmosférica local.
 p = Quantidade de poros.
 P_∞ = Pressão parcial de vapor.
 P_1 = Forças de Tensão.
 P_c = Pressão no poro.
 P_o = Forças de pressão.
 P_S = Probabilidade de sobrevivência
 P_{Sat} = Pressão de saturação.
 P_v = Pressão de vapor d'água no ar.

P_{vs} = Pressão de vapor saturado.
 P_{ws} = Pressão de saturação da água
 P_{w373K} = Pressão de vapor a 373 kelvin.
 P_{vsm} = Pressão máxima de vapor à temperatura de bulbo molhado.
 q = Taxa de transferência de calor.
 Q = Quantidade de calor.
 Q_{Lpor} = Calor latente da semente.
 Q_{sar} = Quantidade de calor para evaporação da água.
 r = raio.
 R = Constante para gases perfeitos.
 RM = Resistência mecânica
 $r1$ e $r2$ = Raios de curvatura entre líquido e o ar.
 RM = Razão de mistura.
 $RM_{máx}$ = Razão de mistura máxima.
 S = Área da superfície.
 T = Temperatura do ar.
 T^{∞} = Temperatura do fluido ou ar na convecção.
 T_1 = Menor temperatura atuante na superfície.
 T_2 = Maior temperatura atuante na superfície.
 T_m = Temperatura de bulbo molhado.
 T_{po} = Temperatura do ponto de orvalho.
 T_w = Temperatura da superfície na convecção.
 t_2 e t_1 = Tempos de secagem final e inicial
 UR = Umidade relativa.
 V = volume e variância do sistema e Velocidade de secagem
 V_{ar} = Volume do ar de secagem.
 V_{az} = Vazão ou fluxo fornecido pelo ventilador.
 V_{OL} = Volume de matéria seca.
 V_T = Volume total.
 V_V = Volume de vazios.
 w = Espessura do corpo de prova
 W = Umidade do sistema
 W_d = Umidade do sólido
 W_r = Umidade relativa
 w_2 e w_1 = Umidades final e inicial

RESUMO

Este trabalho investigou a previsão do tempo de secagem de uma massa cerâmica à base de argila vermelha, proveniente de uma indústria situada na região de Gravataí-RS. O material foi misturado nas composições de 0%, 5%, 8% e 10% em peso em relação à argila de sua chamota (queima a 950°C), e caracterizado quanto à composição química, mineralógica e granulométrica. À massa cerâmica foi adicionada água até o limite de plasticidade mais 3% (base seca), sendo, então, homogeneizada, conformada por extrusão (a vácuo) e submetida à secagem por convecção em uma atmosfera psicrometricamente controlada. As condições praticadas são as típicas de processos de secagem industrial: temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, umidade relativa de 40% e velocidade do ar de 1,5 m/s. Para tanto, foi desenvolvido um aparato experimental de bancada que controlou, monitorou e registrou as perdas de massa (água) em tempo real. Foram elaboradas curvas de perda de massa pelo tempo e determinada a umidade crítica, através das diferenciais da perda de massa pelo tempo baseando-se nas curvas de Bigot e calculada a velocidade de perda de massa instantânea. Foram determinadas curvas de regressão linear, e a estimativa do tempo de secagem, em função da temperatura do ar de secagem e da quantidade de chamota. Os corpos-de-prova foram ainda caracterizados em função de sua resistência mecânica, cuja variação foi quantizada pela estatística de Weibull. Foram realizados 30 ensaios para cada conformação, sendo que para cada batelada foram utilizados três corpos-de-prova por ciclo de secagem. Os resultados mostraram que à medida que se aumenta a proporção de chamota e a temperatura de secagem, aumenta a velocidade de secagem, tendo como consequência a diminuição do tempo de secagem. Esses fenômenos foram equacionados de acordo com cada formulação, servindo de base para um modelo de estimativa do tempo de secagem de argilas, nas mesmas condições aqui retratadas. Isso permite uma previsão de maneira otimizada, do tempo que o material fica submetido à secagem, antes do início do processo de queima, tendo como consequência economia de energia e tempo quando de sua utilização no processo industrial.

Palavras-chaves: Secagem, massas cerâmicas, tempo, psicrometria e argila.

ABSTRACT

This study investigated the prediction of the drying time of a ceramic-based red clay, from an industry located in the region of Gravataí-RS .. The material was mixed in the compositions of 0% 5% 8% and 10% by weight in relation to its chamotte clay (firing at 950 ° C), and characterized for chemical composition, mineralogical and particle size. In the ceramic body water was added to the plastic limit plus 3% (dry basis), and then homogenized, formed by extrusion (vacuum) and subjected to convective drying in a controlled environment psychrometric conditions applied are the typical industrial drying processes: temperatures of 40 ° C, 50 ° C and 60 ° C, relative humidity of 40% and air velocity of 1.5 m / s. To this end, we developed an experimental apparatus who managed, monitored and recorded losses of mass (water) in real time. They have been drawn curves of mass loss over time and determined the critical moisture through the differential mass loss by the time in the Bigot curves and calculated the speed of instant weight loss. We determined linear regression curves and the estimation of drying time, depending on the temperature of the drying air and the amount of chamotte. The samples were further characterized according to their strength, whose variation was quantized by the statistical Weibull. 30 tests were performed for each conformation, and for each batch were used three bodies of test by drying cycle. The results showed that as increasing the proportion of chamotte and the drying temperature increases the drying rate, resulting in the decrease of drying time. These phenomena were equated according to each formulation serving of base for a model to estimate the drying time of clay under the same conditions depicted here, with an estimated optimally, the time that the material is subjected to drying before the beginning of the burning process of firing process, resulting in savings and time when its use in industrial process.

Keywords: Drying, ceramic, time, psicrometry and clay.

1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma etapa bastante delicada no processo de fabricação de produtos cerâmicos. Constitui-se em uma etapa do processamento de meios porosos que tem por finalidade retirar a água adicionada com a função de fornecer a plasticidade necessária à conformação da massa cerâmica. A compreensão de seus mecanismos permite um melhor entendimento de alguns defeitos bem como a forma de evitá-los.

A secagem consiste em remover água (livre ou da plasticidade) desses materiais conformados em seu estágio ainda verde. Em síntese geral, seu princípio caracteriza-se pela utilização de uma fonte energética que transfere energia aos meios úmidos, tendo como consequência o transporte de massa (a retirada de água) na superfície da massa cerâmica.

Várias são as fontes energéticas, que podem agir no processo de secagem, entre as quais, cita-se, além da secagem térmica por calor gerado por combustão e/ou radiação, a secagem por pulsos; a secagem dielétrica; a secagem por frequência de rádio e a secagem por microondas. O ambiente pode ser preparado de forma direta, como é o caso da utilização de raios infravermelhos, por indução através da utilização de altíssima frequência e por autoclave aplicada a um ambiente fechado. O ambiente pode ainda ser preparado de forma indireta, como é o caso da transmissão de calor por convecção, que pode se manifestar de duas formas, quais sejam, através do ar natural aquecido em ambiente aberto ou através do controle do ar atmosférico em ambiente fechado (FANCICANI, 1993).

O presente trabalho limita-se à secagem térmica, por convecção onde a eficiência e o rendimento dependem das características psicrométricas do ar de secagem, do tipo de secador a ser utilizado e das características da massa cerâmica a ser submetida ao processo de secagem. A combinação desses elementos influencia diretamente a transferência de calor e massa (umidade) entre o produto a ser secado e o ar de secagem, definindo-se uma curva característica de secagem para o elemento analisado. O conhecimento desta curva auxilia no estabelecimento do ciclo de secagem o que permite entre outros fatores, otimizar o tempo de

secagem de forma que as peças não permaneçam secando por tempos demasiadamente longos, ocasionando elevados custos.

Torna-se condição necessária, a criação de um ambiente de secagem no qual são superadas as condições de equilíbrio entre tensão do líquido a ser retirado e a capacidade do ambiente em absorvê-lo. Esse balanço de massa entre a massa cerâmica e o meio ambiente depende, dentre outros fatores, principalmente da temperatura e do conteúdo de umidade no meio poroso, produzindo gradientes em seu interior. Isso leva a uma solução simultânea devido as suas variações ao longo do tempo, acoplada às equações universais de conservação de energia e massa. Esses processos acontecem em regime transitório, onde a concentração de líquido se diferencia entre os pontos vizinhos no interior do material poroso, criando dificuldades à solução matemática. Assim sendo, se enquadram como função das equações diferenciais da difusão da massa e da energia, que têm sido resolvida para sistemas unidirecionais e bidirecionais, sujeitas a simplificações e sob determinadas condições de contorno, que levam a valores aquém dos esperados (MENDES, 1997).

Ainda, o tamanho de partícula, a sua distribuição granulométrica e o seu grau de empacotamento durante o processamento determinam a quantidade e o formato dos poros da estrutura, influenciando a permeabilidade de água e sua eliminação durante o processo de secagem (INNOCENTINI, 2001).

O processo de fabricação de materiais cerâmicos, principalmente os tradicionais, leva em consideração as propriedades presentes em seus elementos constituintes, como é o caso dos plásticos (argilas), fundentes e inertes (chamota), cuja variação de suas quantidades podem levar a resultados os mais variados possíveis.

As matérias primas empregadas no processo, que são compostas por diferentes espécies mineralógicas, são combinadas em determinadas proporções, estabelecendo a formulação específica ao fim a que se destina o material cerâmico. O conhecimento das relações físico-químicas de seus constituintes permite conhecer o comportamento frente as diferentes etapas do processo de fabricação até a obtenção do produto final (BARBA, 1977).

A chamota pode ser obtida por descarte de produtos cerâmicos após queima; constitui-se num dos materiais não plásticos que pode ser eventualmente

incorporado em massas cerâmicas quando de sua formulação, podendo ter reflexos positivos sobre todo o processo produtivo. Por apresentar uma granulometria mais grosseira do que a argila pode melhorar o grau de empacotamento. Além disso, devido à morfologia das partículas, contribui significativamente para facilitar a etapa de secagem. sendo que o teor de adição e a granulometria são fatores determinantes para a otimização do processo (BELTRAN *et. al*, 1995)

Esse aspecto é relevante com vista à qualidade do processo de fabricação de produtos cerâmicos, pois concorre para evitar fissuras, em decorrência das taxas de retração, permeabilidade e perda de massa do material cerâmico, produzindo objetos sem aceitabilidade no mercado. O processo de secagem constitui-se na maior fonte de defeitos na maioria dos produtos cerâmicos, atuando diretamente na redução das propriedades físicas como a resistência, consequentes do processo de queima (QUINTERO *et al*, 2003).

Os trabalhos até então desenvolvidos quanto à transferência de calor e massa, possuem algumas limitações como é o caso da desconsideração da fase líquida; da adoção de coeficientes de transporte como constantes, da adoção de um modelo de transferência de calor e umidade, da falta de informações sobre propriedades higrotérmicas e de suas variações com a umidade e a temperatura, levando, portando, à instabilidade das soluções (QUINTERO *et al.*, 2003).

Em função dessas dificuldades, e tentando fazer uma verificação mais precisa dos fenômenos que ocorrem na transferência de calor e umidade, parte-se para uma avaliação experimental, com simulações e avaliações práticas realizadas em um ambiente fechado e controlado, utilizando-se a convecção como forma de secagem em um sistema fechado com controle das propriedades psicrométricas do ar de secagem, bem como do registro em tempo real das perdas de massa ocorrentes em função do tempo. Nesse contexto, é proposta uma contribuição ao estudo do fenômeno da secagem em materiais cerâmicos definindo-se parâmetros que possibilitem a previsão de forma otimizada do tempo de secagem para o material cerâmico analisado, visando assim evitar gastos desnecessários de energia e tempo, pois se é determinado o momento em que a fonte de secagem pode ser desativada, o que não acontece quando se utiliza somente das curvas de Bigot que se baseiam na retração da peça, nem sempre passível de monitoração.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta tese foi obter equações que estimem de forma otimizada a previsão do tempo de secagem no processo de secagem à convecção com atmosfera controlada para diversas composições de massas cerâmicas à base de argila, utilizando-se de uma metodologia e de modelos experimentais.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a obtenção desse objetivo, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

i) Caracterização da massa cerâmica e de chamota quanto à composição química e mineralógica e distribuição granulométrica;

ii) Projeto, construção e posta-em-marcha de um aparato experimental para a realização dos ensaios de secagem dos meios porosos cerâmicos;

iii) Elaboração de curvas de secagem (perda de massa pelo tempo) para a massa cerâmica com 0%, 5%, 8% e 10% em peso de chamota;

iv) Determinação da umidade crítica, através das diferenciais da perda de massa pelo tempo de secagem, baseando-se nas curvas de Bigot, para as massas cerâmicas investigadas;

v) Análise do período de perda de massa constante (fase II) através do cálculo da velocidade de perda de massa instantânea e suas curvas de regressão linear para as massas cerâmicas investigadas;

vi) Estimativa do tempo de secagem, utilizando-se dessas curvas de regressão linear (Fase II) para as massas cerâmicas investigadas, em função da temperatura do ar de secagem e da quantidade de chamota adicionada à argila.

3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os valores numéricos do trabalho experimental aqui desenvolvido resultam de um modelo para a estimativa do tempo de secagem de massas cerâmicas com as características da jazida da região de Gravataí na Grande Porto Alegre. Da mesma forma, deve-se considerar as características construtivas do secador utilizado para os experimentos. Eventuais diferenças em secadores industriais podem levar a comportamentos diferentes dos aqui verificados.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados aspectos referentes à porosidade e seus mecanismos, à psicrometria do ar, aos fundamentos de transferência de calor e massa e aos fenômenos de fixação de umidade que ocorrem no interior do meio poroso cerâmico durante o processo de secagem.

4.1 MEIOS POROSOS ARGILOSOS

Os materiais produzidos à base de argilas são de natureza heterogênea, geralmente constituídos de matérias-primas plásticas e não-plásticas. O estudo do comportamento de massas para sua utilização na indústria de produtos cerâmicos acabados requer conhecimentos aprofundados desde a seleção de matérias-primas até seu processamento final quando do tratamento térmico. No caso da utilização da massa cerâmica vermelha, sua base de formação é a argila que pode sofrer a adição em quantidades adequada de água, visando à obtenção de uma plasticidade indispensável ao processo de conformação.

A umidade no meio poroso passa por processos de mudança de fase, migrando do interior ao exterior através de mecanismos que modificam suas características termofísicas, que interage no balanço térmico, como o calor latente (de evaporação e de condensação da água), alterando principalmente, as propriedades como capacidade e condutividade térmicas específicas que se encontram diretamente ligadas à porosidade. Tais fatores influenciam na velocidade de secagem que se torna característica de cada meio poroso considerado. A massa cerâmica aqui considerada compõe-se basicamente de dois elementos constituintes: a argila, como elemento plástico e a chamota como elemento não-plástico.

4.1.1 Argilas

Segundo Pinto (1997), a argila pode ser definida como um sedimento com tamanho de partícula inferior a $4\mu\text{m}$, constituída em grande parte por argilominerais, podendo conter impurezas. Desenvolve plasticidade com a adição de uma

quantidade conveniente de água, perdendo-a após a secagem. Após queima a uma temperatura superior a 1000°C, adquire alta resistência mecânica.

As argilas são formadas essencialmente por:

i) argilominerais, cuja composição é variável, podendo assim apresentar diferenças importantes na morfologia e na estrutura das partículas. Muitos são os grupos de argilominerais, como caolinitas, montmorilonitas, illitas, cloritas, poligorsquita, entre outros.

ii) Carbonatos, com diversos tamanhos de partículas e em vários graus de dispersão;

iii) Sílica livre, de tamanho grande (maior que 10µm);

iv) Feldspatos e micas;

v) Sais solúveis;

vi) Matéria orgânica e resíduos carbonosos.

Segundo Barba (1997), as argilas podem dividir-se em três grupos:

i) Caolins, que são depósitos de caolinita, possuindo quantidade elevada de partículas finas;

ii) Argilas de cor de queima branca, subdivididas em: *ball clays* (caolinítico-ilíticas); *fire clays* (refratárias) e *flint clays* (duras, maciças e pouco plásticas);

iii) Argilas de cor de queima vermelha, subdividida em: argilas refratárias (fases com elevada refratariedade na queima) e argilas fundentes, (comportamento fundente, com baixo, médio ou alto conteúdo de carbonato).

4.1.2 Chamota

Segundo Santos (1975), para facilitar o processamento cerâmico, são introduzidos na massa cerâmica outros materiais com função desplastificante, objetivando a diminuição do alto grau de compactação da mesma e com posterior redução de sua plasticidade.

Ao adicionar não-plásticos nas argilas, há uma redução de sua interação com a água, causando pontos de descontinuidade nas forças de coesão entre as

partículas que, por sua vez, produzem poros, facilitando a passagem da água do interior até a superfície da peça. Isso favorece o processo de secagem da massa cerâmica. Quando da queima, a chamota reage, formando novos compostos (PRACIDELLI, 1997).

Vários são os materiais que podem ser utilizados como chamota, entre os quais se destaca (FACINCANI, 1992):

- i) Areias, sem carbonatos, com granulometria de 50 μm a 500 μm ;
- ii) Chamotas (cerâmica queimada), com granulometria de 80 μm a 800 μm ;
- iii) Cinzas volantes;
- iv) Materiais argilosos magros;

A utilização desses materiais pode prevenir a contração excessiva; formação de fissuras na secagem como escamações e inchamentos na queima. Porém, seu emprego pode acarretar alguns inconvenientes, como principalmente a diminuição da resistência mecânica, devido à descontinuidade dos elementos aglomerados; contrações do material no forno durante o esfriamento, bem como fissuras quando do emprego de material silicoso (FACINCANI, 1992).

4.2 FORMULAÇÃO DO MATERIAL CERÂMICO

Segundo Pracidelli (1997), alguns cuidados devem ser tomados quando da adição de chamota ao material argiloso, como é o caso, por exemplo, do tamanho mínimo de partícula (60 μm). Randal (1991), alerta para as distribuições granulométricas, fazendo uso do diagrama ternário de Winkler, conforme apresentado por Santos (1975), para definir a zona ótima de granulometria para determinado produto. Isso torna necessário um controle adequado entre argila (plástico) e chamota (não-plástico), evitando problemas no processamento e produto final.

4.2.1 Composição e Mistura

A composição e a mistura das massas cerâmicas (proporção entre argila e chamota) devem ser realizadas de acordo com as características das peças a serem obtidas e também do processo de fabricação a ser empregado. A relação deve ser

tal que confira plasticidade para sua moldagem bem como resistência mecânica a verde quando de sua secagem. Ainda, apresentar uma adequada composição química e mineralógica, prevendo as reações físico-químicas, quando do processo de queima.

4.2.2 Plasticidade

Segundo Santos (1975), a plasticidade constitui uma propriedade que o material possui de deformar e manter a deformação após a retirada de uma força aplicada. Seu comportamento plástico depende da relação entre a água e a argila, sendo que sua capacidade de deformação está diretamente ligada às relações físico-químicas do material. É essencialmente resultante das forças de atração entre as partículas de argilominerais e a ação lubrificante entre as mesmas. Muito importante, tanto na modelagem, quanto na prensagem ou conformação do material cerâmico. Quando da aplicação de uma pressão, as partículas fluem devido à plasticidade e se empacotam de forma estável com a forma desejada e a resistência mecânica torna-se suficiente para a manipulação da peça à verde. Sua inadequada preparação pode acarretar em defeitos durante as etapas posteriores, como é o caso da gretagem, trincas de secagem, rupturas no transporte e manipulação de peças não sinterizadas.

Alguns fatores influem diretamente sobre a plasticidade:

- i) Presença de minerais finamente moídos;
- ii) Presença de minerais com clivagens definidas;
- iii) Presença de argilominerais com morfologia lamelar;
- iv) Características físicas da água;
- v) Distribuição do tamanho e superfície específica das partículas;
- vi) Relação entre material plástico e não-plástico;
- vii) Temperatura da massa;
- viii) Presença de íons trocáveis, devido à defloculação.

4.2.3 Conformação e Compactabilidade pelo processo de extrusão

O processo de conformação pode ocorrer mediante extrusão. O sistema de extrusão permite obter peças de formato e em 2 dimensões previamente definidas. A compactabilidade constitui-se numa importante propriedade que se destaca durante a extrusão da massa cerâmica, pois influencia as propriedades da peça verde (resistência mecânica, permeabilidade) e também sobre o material sinterizado (absorção de água, tamanho e resistência da peça). Segundo Pracidelli (1997), quanto maior a compactabilidade, mais dificuldade se encontra na secagem, pois o coeficiente de difusão efetivo decresce com a redução da porosidade. Pode-se afirmar ainda que a compactabilidade é função da distribuição de tamanhos de partículas. Assim, as argilas, por apresentarem elevada proporção de partículas de tamanho pequeno, favorecem a obtenção de elevada compactação. A adição de material não-plástico com maior granulometria leva a valores da compactabilidade até determinados limites. Após, começa a decrescer (BARBA 1997).

4.2.4 Porosidade e Mecanismos de fixação da água em materiais cerâmicos

Os mecanismos de fixação de água e a porosidade presente na massa cerâmica encontram-se diretamente interligados, dependendo de suas características físicas e químicas.

4.2.4.1 Porosidade

Os materiais cerâmicos, uma vez conformados, apresentam vazios que são conhecidos como poros, sendo que se denomina de porosidade a quantidade de poros (P) definida como a razão entre o volume de vazios (V_V) e o volume de material (V_T) (MENDES, 1997). A Equação 4.1 expressa essa relação.

$$P = \frac{V_V}{V_T} * 100 \quad \text{Equação 4.1}$$

Existem alguns tipos de porosidade bem caracterizadas, conforme Figura 4.1, como:

- i) Porosidade fechada;

- ii) Poros não-transpassantes;
- iii) Porosidade transpassantes;

Segundo regras da IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada), os poros podem ser classificados em três categorias, quanto às suas dimensões:

- i) Microporos: $< 20 \text{ \AA}$;
- ii) Mesoporoso: entre 20 a 500 \AA ;
- iii) Macroporos: $> 500 \text{ \AA}$.

Nos microporos, as moléculas encontram-se adsorvidas, tendo em vista ficam submetidas ao campo de força da superfície sólida. Já nos meso e macroporos, as moléculas no centro do poro não sofrem a ação desse campo de força. Dessa forma, tem-se duas fases no material cerâmico: a fase adsorvida em sua superfície e a fase fluida no interior do poro. A existência de poros implica na retenção de água, nem sempre fácil de ser removida, caracterizando a permeabilidade como a maior ou menor facilidade com que a água se move no interior do meio poroso (COSTA, 2001).

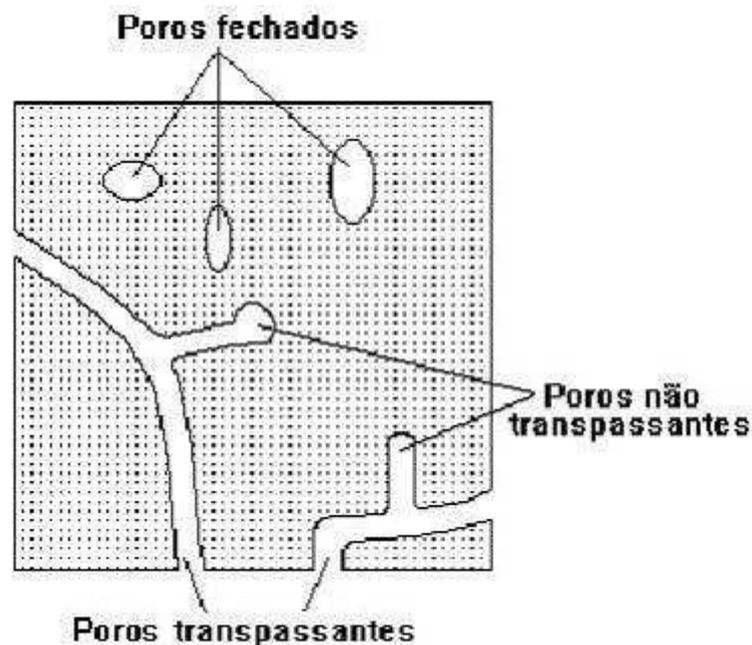


Figura 4.1 - Tipos de porosidade fechada, não-transpassante e transpassante.(COSTA, 2001)

A permeabilidade depende do tamanho, forma e número de poros, bem como dos elementos sólidos componentes do meio cerâmico. A distribuição granulométrica

também se constitui num fator de fundamental importância agindo na porosidade aparente e conseqüentemente na secagem. A Figura 4.2 apresenta esquematicamente grânulos e suas partículas com seus poros inter- e intragranulares. O teor de partículas superfinas combinado com a superfície específica influencia diretamente o grau de empacotamento da massa cerâmica (INNOCENTINI, 2001).

Os materiais cerâmicos, quanto à adsorção, ficam geralmente bem caracterizados por propriedades como sua área superficial total, e sua polaridade. Assim, uma massa cerâmica com grande área superficial possui grande capacidade de adsorção. O tamanho dos poros determina a acessibilidade das moléculas de água ao interior do cerâmico, sendo que sua distribuição é também de fundamental importância para caracterizar sua propriedade de adsorção (BROSNAN, 2003).

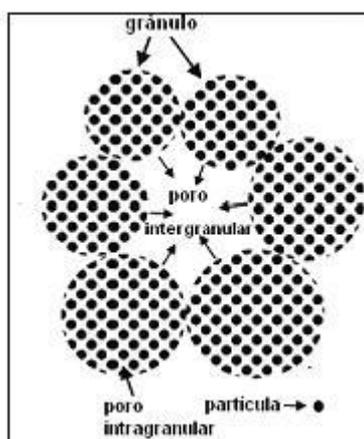


Figura 4.2 - Representação esquemática dos grânulos com suas partículas (QUINTERO, 2003).

4.2.4.2 Mecanismos de fixação de água

Segundo Brosnan (2003), logo que a água é adicionada à massa cerâmica seca, uma porção cobrirá a superfície das partículas cerâmicas, formando o que chamamos de água higroscópica ou água superficial, cuja intensidade de adsorção dependerá da polaridade da superfície da molécula da água. Na verdade, existe uma força entre o líquido e o sólido, resultando em uma ligação na interface, ou seja, a água se liga à nuvem de cargas negativas na superfície cerâmica, devido à atração que essa superfície exerce sobre o lado positivo da molécula de água. Dependendo do material cerâmico, esse fenômeno da adsorção que se encontra ligado diretamente às características das partículas (área superficial, granulometria e

morfologia das partículas), ocasiona uma cobertura da superfície material em finas camadas de água.

Em um segundo instante, a água acrescentada contribui para o preenchimento dos vazios existentes entre as partículas cerâmicas, fenômeno conhecido como capilaridade (vazios ou poros presentes na maior parte das composições cerâmicas). Ao mesmo tempo, filmes de água de forma contínua são criados em torno das partículas, dando início a uma atração entre si, constituindo esse fenômeno a base da teoria da plasticidade de Norton (BROSNAN, 2003).

As massas cerâmicas possuem poros maiores (geralmente de 50 μm a 100 μm) que serão gradualmente preenchidos pela água. Em conformações hidroplásticas, a água de plasticidade deve chegar a esses poros, de tal forma que uma água em excesso separe as partículas dentro da massa cerâmica, promovendo sua plasticidade. Assim, ao acrescentar água à massa cerâmica seca, o primeiro passo será a cobertura superficial das partículas. Após, serão preenchidos os capilares entre as partículas; em seguida, são preenchidos os macroporos e por último a água de plasticidade que separa as partículas. Quando da secagem, o processo de remoção da água da massa cerâmica se processa de forma inversa a essa sequência.

Dessa forma, a água se constitui em um elemento de fundamental importância no processamento cerâmico. Sua adição à argila torna a massa cerâmica plástica, permitindo operações de processamento como moldagem, conformação e extrusão. Sua quantidade deve ser controlada, sendo de grande importância o conhecimento de seus princípios físicos e químicos quando em contato com o material cerâmico. Quando da fabricação de peças cerâmicas, a água deve ser removida (processo de secagem) antes que sofra os processos de sinterização. Caso contrário, poderão ocorrer fissuras e aprisionamento de vapor, podendo até mesmo causar explosões.

A proximidade das moléculas de água, que possuem uma forte ligação covalente entre hidrogênio e oxigênio, forma as chamadas pontes de hidrogênio, responsáveis por muitas propriedades, como por exemplo, o elevado ponto de fusão e ebulição da água. A água pode encontrar também uma superfície hidrofóbica na argila, onde a superfície adsorvente é não polar, ou seja, não possui afinidade com a água. É o caso dos constituintes carbonáceos.

Segundo Ruthven (1997), a fixação da umidade em meios porosos pode ser por adsorção química ou adsorção física. Na adsorção química, há formação de uma união entre a molécula do adsorvido e a superfície do adsorvente, conduzindo à formação de um composto químico de superfície, como uma camada de substância adsorvida na superfície do adsorvente. Na adsorção física, não há formação de ligações químicas; o fenômeno é devido somente a forças inter-moleculares relativamente fracas, podendo haver várias camadas de moléculas adsorvidas. A Tabela 4.1 compara esses dois tipos de adsorções.

A resultante de forças que tendem a equilibrar as moléculas que se encontram instáveis na superfície de um sólido é responsável pelo fenômeno da adsorção entre essas moléculas e a superfície dos argilominerais. Essas forças de adsorção dependem diretamente da natureza do sólido e das moléculas do elemento a ser adsorvido. São classificadas em três tipos (RUTHVEN, 1997):

- i) forças van der Waals (dispersão e repulsão);
- ii) forças eletrostáticas (polarização e as interações dipolo e quadrupolo);
- iii) forças de interação entre adsorvente e adsorvido.

A contribuição de forças tipo van der Waals está sempre presente, enquanto as contribuições eletrostáticas e de interação entre as moléculas do elemento a ser adsorvido dependerão do sistema a ser formado com o adsorvente.

As forças de van de Waals são geralmente muito fracas. Estão baseadas na teoria da mecânica quântica, resultando de uma polarização momentânea induzida por flutuações rápidas na densidade eletrônica das moléculas vizinhas.

Tabela 4.1 - Parâmetros comparativos da adsorção física e da adsorção química (RUTHVEN, 1997).

Parâmetro	Adsorção Física	Adsorção Química
Calor de adsorção (ΔH)	Baixo, menor que 1 – 5 vezes o calor latente de vaporização.	Alto, maior que 1 – 5 vezes o calor latente de vaporização.
Especificidade	Não específico.	Altamente específico.
Natureza da fase adsorvida	Monocamada ou multicamada; sem dissociação das espécies adsorvidas.	Somente monocamada; pode ocorrer dissociação das espécies adsorvidas.
Faixa de temperatura	Significante somente a temperaturas relativamente baixas.	Possível em uma gama extensa de temperaturas.
Forças de adsorção	Sem transferência de elétrons, embora possa ocorrer a polarização do sorbato.	Com transferência de elétrons e formação de ligações químicas entre o sorbato e a superfície.
Reversibilidade	Rápida, não ativada, reversível.	Ativada, pode ser lenta e irreversível.

As forças eletrostáticas atuam na presença de adsorventes que possuam estrutura iônica. Suas interações eletrostáticas, representadas pela polarização, campo dipolo e campo quadrupolo, geram contribuições adicionais à energia de adsorção, devido ao campo elétrico que é promovido na superfície dos adsorventes iônicos.

Segundo Mendes (1997), outra forma de fixação da umidade, além da adsorção (química ou física), se constitui na condensação capilar, que pode ser vista como o mecanismo onde a fase líquida preenche alguns poros. A Figura 4.3 apresenta comparações entre adsorção física e condensação capilar. No fenômeno da condensação capilar, formam-se duas superfícies curvas, que separam as partes líquida e gasosa, onde há a formação de um menisco (pescoço com raios r_1 e r_2) que pode causar a migração de líquido entre poros de tamanhos diferentes, partindo de uma região de maior concentração de umidade para outra de menor concentração. Esses raios de curvatura, juntamente com a tensão superficial entre o ar e a água, relacionam-se com a pressão capilar.

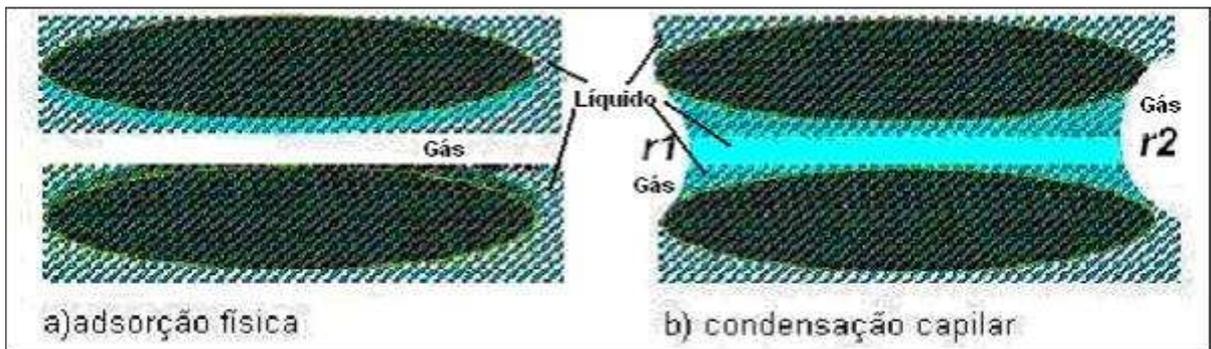


Figura 4.3 - Fixação da umidade em meios porosos: a) adsorção física com moléculas de vapor aderindo à superfície. b) condensação capilar, onde a fase líquida se faz presente preenchendo os poros (MENDES, 1997).

Os poros existentes podem, ou não, estarem preenchidos por água, dependendo da quantidade de água. Em poros preenchidos com água, as principais trocas são realizadas pelo ciclo condensação, migração capilar e evaporação, enquanto que nos poros não preenchidos por água, as trocas acontecem principalmente pela difusão. A Figura 4.4 ilustra esses processos de fixação e transferência de umidade através de um meio poroso e seus detalhes de difusão (item “a”) bem como o detalhe da migração capilar (item “b”).

Uma analogia de uma representação esquemática de um líquido em um cilindro de pequena dimensão encontra-se na Figura 4.5, que relaciona as forças de pressão (p_0) com as forças de tensão (p_1). Esse fenômeno pode ser equacionado e dimensionado através da lei de Laplace (REED, 1988).

As forças de tensão se definem como a energia por unidade de área, ou a força por unidade de comprimento que um líquido exerce sobre um corpo com o qual esteja em contato. Essa energia depende tanto de suas propriedades quanto do meio que está em contato. Em um líquido em contato com o ar, ou até mesmo com seu próprio vapor ou outro gás a baixa pressão, as forças de ligação entre suas moléculas com esse outro meio são sempre muito menores do que as forças de coesão entre suas próprias moléculas. A situação muda quando o outro meio vizinho é um outro líquido ou um sólido ou um gás à pressão elevada.

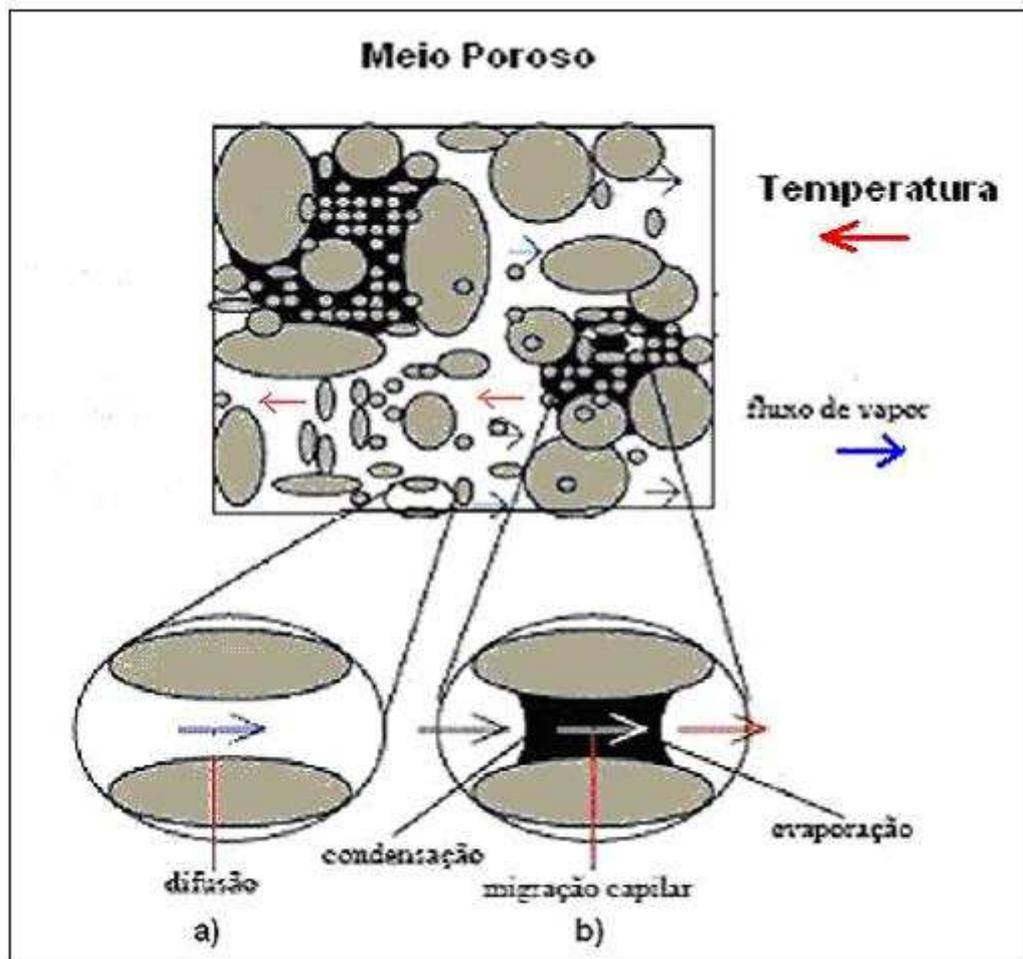


Figura 4.4 - Mecanismos de transferência de umidade em um meio poroso (BUENO *et al.*, 2003).

Quando a superfície de um líquido entra em contato com a superfície de um sólido, forma entre si um ângulo designado como ângulo de contato, cujo valor depende da competição das forças de coesão no próprio líquido e as forças de adesão entre líquido e sólido. A Figura 4.6 ilustra a situação de um líquido contido em um recipiente de paredes verticais, onde seu ângulo de contato pode ser inferior a 90° (molhável), ou superior a 90° (não molhável).

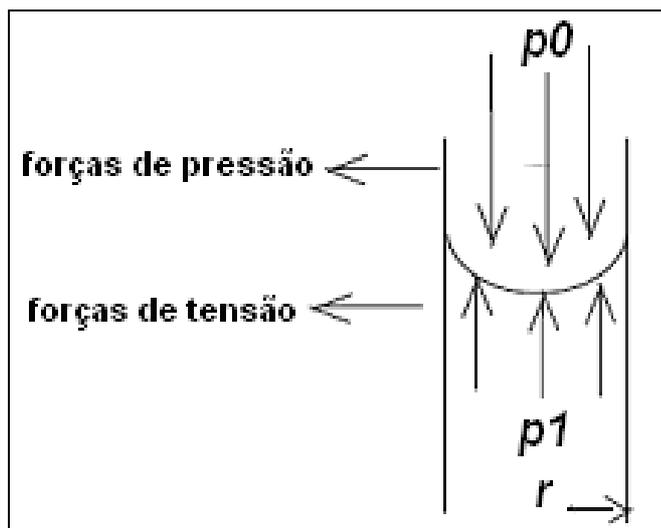


Figura 4.5 - Representação esquemática de um líquido em um cilindro de pequeno raio (r) (MENDES, 1997).

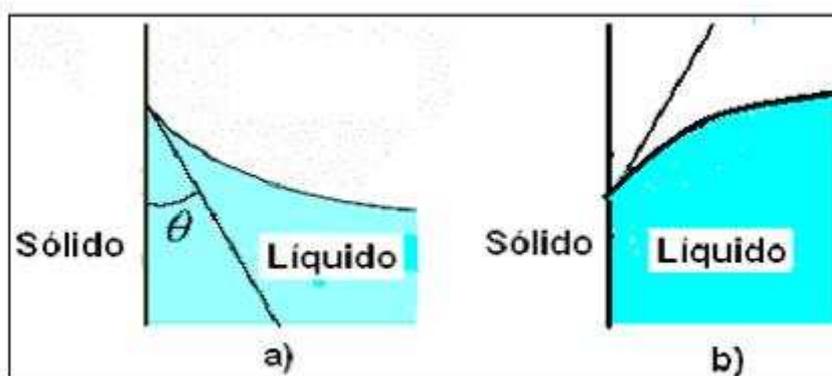


Figura 4.6 - Ângulo de contato entre líquido e meio poroso; a) ângulo menor que 90° haverá subida do líquido (capilaridade); b) ângulo maior que 90° haverá descida do líquido (REED, 1988).

A Tabela 4.2 apresenta a tensão superficial para a água em função da temperatura. Nota-se que, com o aumento da temperatura, a tensão superficial diminui, o que é devido à quebra das pontes de hidrogênio, fazendo com que a água evapore com maior facilidade. Ainda, essa relação entre tensão superficial e temperatura pode estar ligada ao fenômeno da capilaridade e a interação da água com a superfície que encontra. Com a presença de líquido no interior do poro, entram em ação as pontes de hidrogênio, atraindo as moléculas de água para sua superfície, criando dessa forma uma força de sucção que contribui para o preenchimento de vazios no poro. A água atinge uma elevação, formando um menisco (nível da água) que define o ângulo de contato, função do equilíbrio entre as forças de sucção e de gravidade, atuantes na direção vertical. Assim, o equilíbrio da coluna de líquido é devido ao anulamento das duas forças iguais e opostas: uma

é o peso da própria coluna de líquido e a outra é a força que a parede do tubo exerce na superfície do líquido, conforme a Figura 4.7.

O fenômeno da capilaridade pode ser representado através da Equação 4.2.

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde:

- r = o raio do capilar;
- σ = tensão superficial da água contra o capilar;
- θ = ângulo de contato;
- h = altura de água dentro do capilar;
- ρ = densidade da água;
- g = constante gravitacional.

Tabela 4.2 - Tensão superficial da água (T_{sup}) em função da temperatura (T) (REED, 1988).

$T(^{\circ}\text{C})$	0 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	60 $^{\circ}\text{C}$	80 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$
$T_{sup} (10^{-3}\text{N/m})$	75,6	72,8	69,6	66,2	62,6	58,9

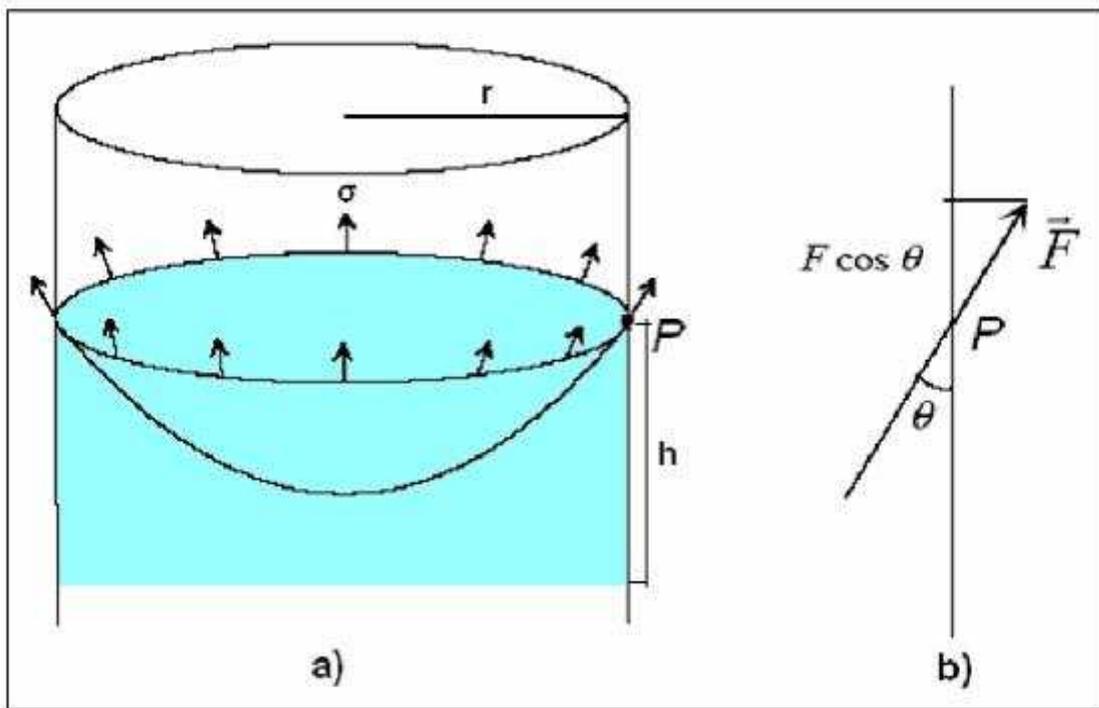


Figura 4.7 - Coluna de líquido: a) Forças exercidas sobre o líquido em um capilar; b) Resultante das forças em um ponto P sobre a superfície e suas componentes verticais (ROUQUENOL, F., ROUQUENOL, J., 1999).

Apesar das dificuldades de ordem prática para determinar a tensão superficial, o conceito teórico de tensão de contacto continua a ser muito útil. O que

explica através de seu mecanismo o movimento da umidade como consequência das resultantes das forças entre a pressão hidrostática e os efeitos da tensão superficial.

4.3 PSICROMETRIA

Psicrometria estuda as propriedades do ar, tais como temperatura, umidade e ponto de orvalho. Consiste no estudo das características quando da mistura de ar seco com vapor de água ou ar úmido, a partir de determinados parâmetros específicos (SOUZA e SILVA, 2000). O conhecimento dos princípios psicrométricos é aplicado em muitos setores da atividade humana como conforto ambiental, conservação de produtos, secagem de meios porosos inertes (materiais de Engenharia como tijolos, telhas, cerâmicos em geral) e também de meios porosos biológicos como é o caso de grãos e sementes (arroz, soja, milho), entre outros. O ar atmosférico é constituído de uma mistura de gases, vapor d'água e contaminantes como fumaça, poeira e outros poluentes.

Pesquisas mostram que a composição do ar seco (Tabela 4.3) é relativamente constante, tendo pequenas variações nas quantidades de seus componentes, devidos principalmente às condições climáticas e altitude (BROSNAN, 2003).

A mistura entre o ar seco e o vapor d'água, definida como ar úmido, pode variar de zero até um valor correspondente à condição de saturação, que é a quantidade máxima de vapor que o ar pode conter em determinada temperatura e pressão. Essa composição é utilizada em Engenharia Térmica para muitas aplicações, principalmente no processo de secagem, quando as propriedades do ar úmido estão diretamente relacionadas com a temperatura, quantidade de vapor d'água, volume ocupado e entalpia (energia) nele contida. As características psicrométricas do ar são determinadas através das equações ou pela utilização de gráficos psicrométricos, que facilitam a visualização dos fenômenos.

Tabela 4.3 - Composição média do ar seco (BROSNAN, 2003).

Componente	Fórmula	% em peso
Nitrogênio	N ₂	78,04
Oxigênio	O ₂	20,99
Argônio	Ar	0,94
Monóxido de carbono	CO	0,01
Dióxido de carbono	CO ₂	0,023-0,050
Ozônio	O ₃	0,02
Hidrogênio	H ₂	0,01
Neônio	Ne	0,0015
Dióxido de enxofre	SO ₂	0,002
Dióxido de nitrogênio	NO ₂	0,001
Hélio	He	0,0005

4.3.1 Carta ou Gráfico Psicrométrico

O gráfico psicrométrico é utilizado para representar as características do ar a ser utilizado quando de sua aplicação em um processo na Engenharia Térmica. A Figura 4.8 mostra um gráfico (ou carta psicrométrica) utilizado na pressão atmosférica. Através de sua utilização, pode-se obter as características psicrométricas do ar, ou seja, pode-se a entalpia, a umidade relativa, a temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido, quantidade de umidade contida no ar e pressão de vapor (SOUZA e SILVA, 2000). Esse gráfico pode ser aplicado para misturas cuja umidade do ar que não esteja saturado. Em termos práticos, a aplicação dessa carta psicrométrica se torna uma ferramenta fundamental para aplicações como aquecimento, resfriamento, secagem e umedecimento.

Uma forma prática de sua aplicação pode ser vista da seguinte forma: Quando do fornecimento de calor ao ar (sem acréscimo de umidade), a temperatura do mesmo aumenta, enquanto a razão de mistura permanece constante (não houve alteração na quantidade de umidade). Logo, o ponto sobre o gráfico move-se horizontalmente para a direita e paralelo ao eixo das abcissas, que é o eixo que contém as temperaturas de bulbo seco, tendo-se como conseqüência um aumento na entalpia (linhas inclinadas localizadas à esquerda do gráfico).

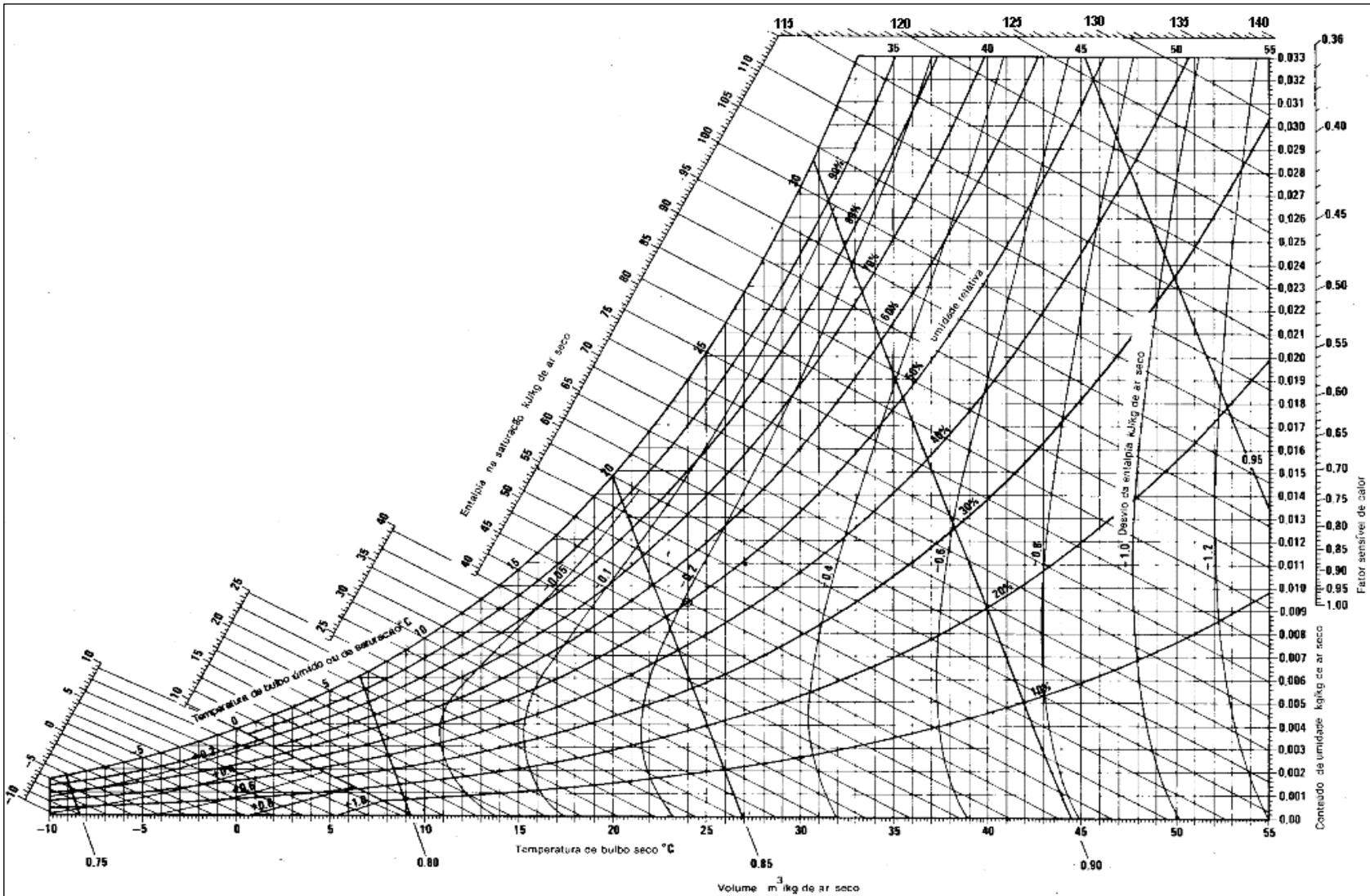


Figura 4.8 - Gráfico psicrométrico: pressão de 760mmHg (SOUZA e SILVA, 2000).

Quando do resfriamento, constata-se que ao retirar somente calor e mantendo-se constante a umidade do ar a temperatura e a entalpia diminuem, que dependendo de sua intensidade poderá atingir a curva de saturação (100% de umidade relativa), atingindo-se assim o ponto de orvalho. Caso continue a resfriar, é atingida a condensação, fazendo com que haja alteração na razão de mistura (massa de água por volume de ar seco).

A adição ou retirada somente de umidade ao ar (sem adicionar ou retirar calor) leva ao deslocamento no gráfico sobre uma entalpia constante. Dessa forma, o aumento da quantidade de umidade, faz com que o ar mude suas condições psicrométricas para uma nova situação, deslocando-se no gráfico ao mesmo tempo para cima e para a esquerda. Assim haverá um aumento da razão de mistura e diminuição da temperatura em relação à situação inicial; ao passo que, com a retirada de umidade, o deslocamento é ao contrário do acima citado, ou seja, move-se ao mesmo tempo para baixo e para a direita, diminuindo a razão de mistura e aumentando a temperatura. A Figura 4.9 contém um exemplo aplicativo que descreve com mais facilidade a utilização do gráfico psicrométrico. Nota-se que o ar deslocou-se do ponto de entrada E da Figura 4.9 para o ponto de saída S, devido à adição de temperatura (ΔT) e umidade ao ar (Δum) ao mesmo tempo, tendo-se como consequência o aumento de entalpia (Δh) e o aumento da umidade absoluta (eixo das ordenadas, lado direito).

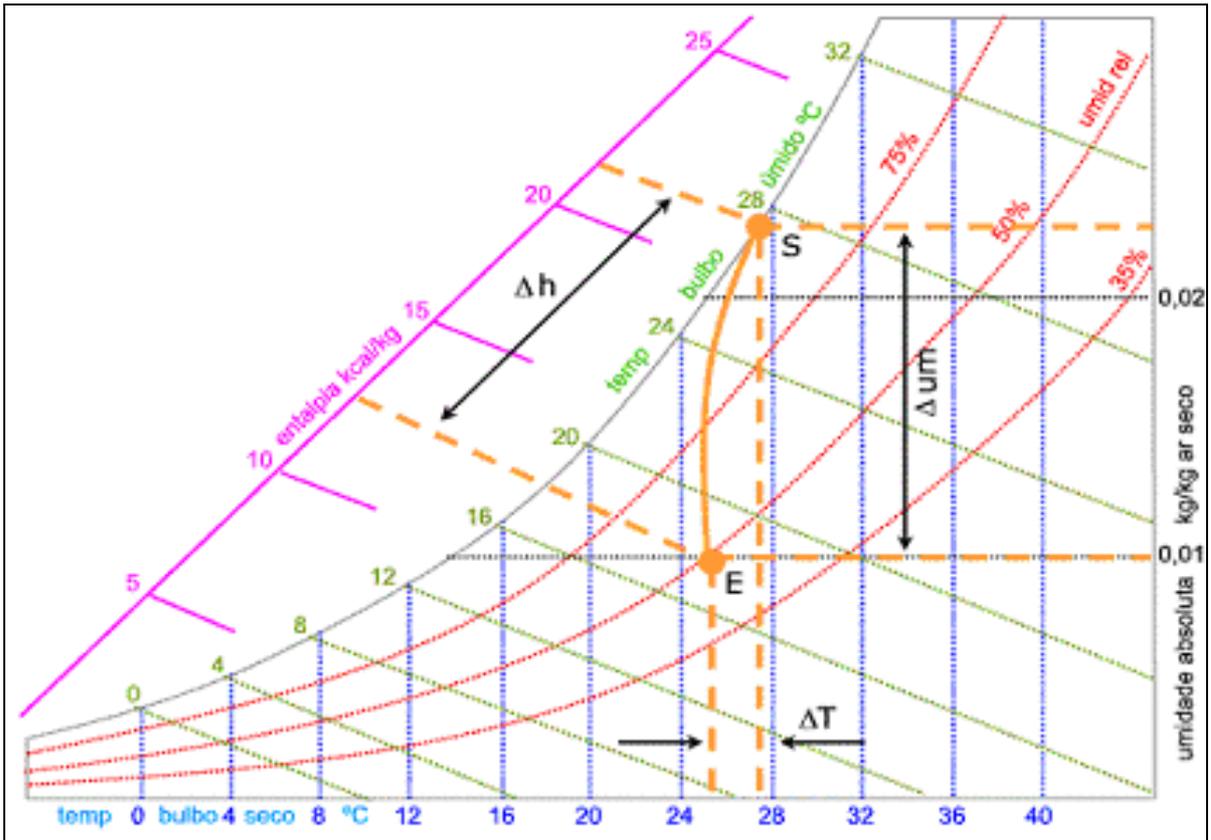


Figura 4.9 - Diagrama ilustrativo da aplicação do gráfico psicrométrico.

O anexo B2 apresenta mais informações em relação à utilização da carta psicrométrica.

4.4 FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor estuda a transferência de energia, como resultado da diferença de temperatura entre os corpos. A Termodinâmica ensina que essa transferência de energia é definida como calor, e explica como ocorre o processo de transferência de calor, e a previsão da velocidade de transferência de calor, sob certas condições específicas. Teoricamente, a transmissão de calor pode ocorrer isoladamente por condução, convecção ou radiação, mas na prática ocorrem simultaneamente, ficando a critério o estudo da possibilidade de serem desprezadas uma ou duas das formas em presença das demais (HOLMAN, 1963).

4.4.1 Transferência de Calor por Condução

Quando da existência de um gradiente de temperatura em um corpo, há uma transferência de energia (calor) da região de maior temperatura para a região de

menor temperatura, sem variação apreciável da posição relativa dos elementos do sistema ou dos sistemas. Diz-se, então, que a energia é transferida por condução e que a velocidade de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura (DUFFIE, 1980). O tratamento analítico de transferência de calor por condução segue a lei de Fourier, conforme Equação 4.3, que define a condutividade térmica para os corpos sólidos.

$$q = -k.S.\frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde:

- q = taxa de transferência de calor;
- S = área da superfície;
- k = condutividade térmica do material;
- ∂T = variação da temperatura;
- ∂x = espessura da camada.

Entre a temperatura mais alta e a mais baixa, há várias temperaturas intermediárias que dependerão diretamente do sistema em estudo. Assim, é de muita importância o comportamento deste perfil de temperaturas intermediárias, que dependem das coordenadas do elemento e também do instante de tempo considerado. No caso da temperatura ser constante ao longo do tempo, dependerá das coordenadas dos elementos componentes. Este é o caso de transmissão de calor por condução em regime permanente. Por outro lado, se a função temperatura varia com o tempo e de elemento para elemento, tem-se a transmissão de calor por condução em regime variável ou transitório (HOLMAN, 1963). A Figura 4.10 apresenta o fluxo de calor (q) partindo de uma face (1) que possui maior temperatura (T_1), perdendo carga térmica à medida que atravessa outros materiais (A, B, e C), chegando finalmente à última face (4) com temperatura final (T_2).

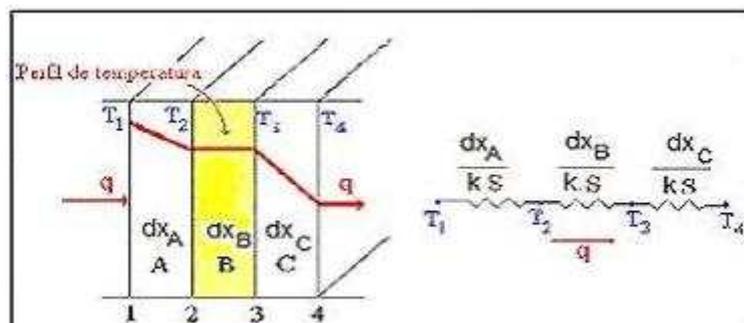


Figura 4.10 - Transferência de calor por condução em regime permanente em paredes em paralelo com analogia à resistência elétrica (HOLMAN, 1963).

4.4.2 Transferência de Calor por Convecção

A transferência de calor por convecção envolve necessariamente um fluido. Devido ao ganho ou perda de calor do fluido em contato com uma superfície, haverá uma variação em sua densidade, o que implica em movimentação convectiva caracterizada como de forma natural ou livre. Constitui-se na forma de transmissão de calor pela mistura entre elementos de maior energia térmica com os de menor energia térmica, formando as correntes de convecção no interior do sistema, trazendo como consequência a transferência de calor com transporte de massa.

Quando ocorre circulação de ar com auxílio de meios externos, como é o caso da injeção de ar comprimido e aquecido, tem-se uma ventilação forçada e, como consequência, uma convecção forçada.

O efeito convectivo pode ser expresso através da lei de resfriamento de Newton (HOLMAN, 1963) dado pela Equação 4.4.

$$q = h_c S (T_w - T^\infty) \quad \text{Equação 4.4}$$

onde:

q = fluxo de calor transferido por convecção

S = área da superfície;

T_w = temperatura da superfície;

T^∞ = temperatura do fluido;

h_c = coeficiente de convecção.

A transferência de calor por convecção age junto às paredes sólidas cuja velocidade e transferência de energia dependem das propriedades térmicas do fluido como coeficiente de condução, calor específico, massa específica, viscosidade dinâmica, velocidade média, densidade, tipo de escoamento (DUFFIE, 1980).

4.4.3 Transferência de Calor por Radiação

A radiação eletromagnética não necessita de um meio para se propagar, como é o caso da condução ou convecção, podendo até mesmo se propagar no vácuo perfeito. Seu espectro envolve várias faixas de comprimento de onda, entre as quais se destaca a radiação térmica que consiste na passagem da energia através de ondas eletromagnéticas, levando assim ao aumento da energia interna do

sistema (DUFFIE, 1980). Considerações termodinâmicas mostram que um corpo emitirá energia em uma velocidade proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo, conforme apresenta a Equação 4.5 (HOLMAN, 1963):

$$q = \delta \cdot S(T_2^4 - T_1^4) \quad \text{Equação 4.5}$$

δ = constante de Stefann-Boltzmann;

S = área da superfície;

T_2 = temperatura maior de um corpo;

T_1 = Temperatura menor de outro corpo.

4.4.4 Pressão de Vapor

Evaporação é o processo de troca de estado de um líquido para um gás, através da aplicação de energia térmica e pressão. No caso específico da água, o gás produzido por evaporação é chamado de vapor d'água. O vapor gerado pela evaporação da água exerce uma pressão contra as paredes de qualquer confinamento enclausurado, aumentando ao longo do tempo, até atingir um valor máximo, ou seja, atingindo a pressão de saturação da água para aquela temperatura em particular. Aumentando a temperatura resultaria em um rearranjo da pressão, até que uma nova pressão máxima seja atingida. A Equação 4.6 pode ser utilizada para o cálculo da pressão de saturação da água (P_{ws}) em função da entalpia (Δh_v), da temperatura (T), da pressão de vapor a 373 °K ($P_{w,373k}$) (BROSNAN, 2003).

$$P_{ws} = P_{w,373K} \exp \left(\frac{-\Delta h_v}{\frac{1}{T} - \frac{1}{373K}} \right) \quad \text{Equação 4.6}$$

A aplicação da Equação 4.6 para a água submetida a várias temperaturas permite construir o gráfico de pressão de vapor apresentado na Figura 4.11.

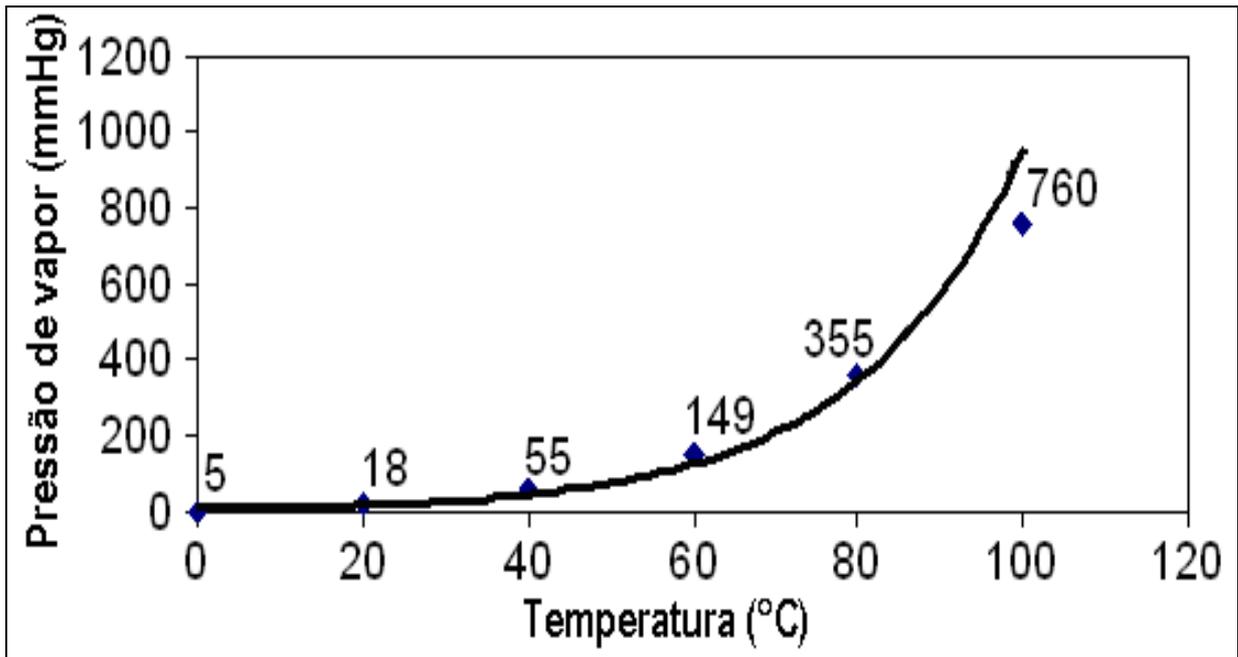


Figura 4.11 - Pressão de vapor da água em regiões de baixa temperatura (BROSNAN, 2003).

4.5 FENÔMENOS DE SECAGEM

4.5.1 Condição de equilíbrio de um sólido úmido com o ar de secagem

Na aplicação específica do processo de secagem em materiais cerâmicos, o ar psicrometricamente caracterizado, circula sobre o meio poroso, fazendo com que esse ar ganhe ou perca umidade. Caso a pressão de vapor desse ar psicrométrico seja menor que a do meio poroso o qual está secando, esse meio poroso perderá umidade (maior pressão de vapor) até atingir uma condição de equilíbrio. Da mesma forma, se a pressão de vapor do ar psicrométrico for maior que a pressão parcial de vapor do meio poroso, esse meio poroso tenderá a absorver umidade até uma condição de equilíbrio. Essa condição de equilíbrio será atingida quando não mais houver trocas entre o ar psicrométrico e o meio poroso, ou seja, quando ambos estiverem na mesma pressão de vapor (equilíbrio de pressões), dando origem às chamadas curvas de equilíbrio entre a umidade do meio poroso e umidade relativa do ar, a determinada temperatura (COSTA, 2001).

Quando se utiliza o processo de secagem por convecção, o sólido que está dotado de certa umidade (W_d) é colocado frente ao ar psicrometricamente controlado (temperatura T , pressão P e umidade relativa W_r). À medida que o tempo passa, o processo evoluirá para uma condição de equilíbrio entre o sólido e esse ar

circulante, momento em que o sólido apresenta uma umidade final (W_{de}), denominada umidade de equilíbrio para aquelas condições de secagem. A partir desse momento, não haverá mais trocas de umidade no sistema. A definição desse processo de secagem pode ser explicada a partir da regra das fases de Gibbs, conforme representada na Equação 4.7:

$$V - C + 2 = F$$

Equação 4.7

Sendo V a variância do sistema, isto é, o número de propriedades que podem ser adotadas pelo sistema de maneira independente. C é o número de componentes presentes no sistema, no caso 3, a saber: o sólido, a água, o ar. F é o número de fases presentes no sistema, no caso 2, a saber: o sólido úmido e o ar úmido. Nessas condições, aplicando-se a regra das fases de Gibbs, chega-se a uma variância V do fenômeno de secagem de 3. Isso significa que fixadas três propriedades, como a pressão, a temperatura e a umidade relativa do ar, todas as demais propriedades do sistema poderão ser determinadas, inclusive a umidade que o sólido apresentará nesta condição de equilíbrio, definindo se o corpo cerâmico absorverá ou perderá umidade em determinadas condições no processo de secagem. A umidade de equilíbrio constitui-se então na umidade limite a que um sólido pode atingir para determinadas condições psicrométricas do ar de secagem.

4.5.2 Princípios de secagem

Segundo Brosnan (2003), para que ocorra a secagem, o sistema formado entre o ar circulante de secagem e a massa cerâmica a ser seca não pode estar em equilíbrio. É necessário que o ambiente de secagem esteja a uma temperatura superior àquela do corpo úmido, criando um fluxo de calor entre o meio poroso e o ar circulante, e possibilitando a vaporização da umidade.

O ar ambiente circulante quando seco e aquecido, além de aumentar o poder de absorção de água, transfere calor ao corpo cerâmico devido ao aumento de sua energia térmica, acelerando o processo de secagem. Ao passar pelo corpo cerâmico úmido, o ar circulante aumenta sua umidade relativa e sua razão de mistura, frutos da absorção da umidade proveniente desse meio poroso. O processo continuará até

que se atinja o equilíbrio entre as pressões externa de vapor do ar circulante e a pressão interna de vapor no interior do meio poroso.

O processo de transferência de massa (água) para o ar ambiente poderá ocorrer através do fenômeno da difusão (baixo grau de hidratação) e ou através do fenômeno da capilaridade (alto grau de hidratação combinado ao tamanho e distribuição dos poros).

Segundo Barba (1977), quando na secagem de materiais cerâmicos, no estágio inicial em que o poro está saturado, ocorre uma taxa de secagem constante, com movimentação da água livre até a superfície, devido às forças de capilaridade. A energia (calor sensível) contida na corrente de ar é transferida para a superfície do meio poroso, promovendo a vaporização dessa água superficial que será transportada pela corrente de ar. Parte dessa energia provocará o aumento da temperatura nessa região, dando início ao processo de transferência de calor para o centro da peça.

Segundo Brosnan (2003), a vaporização da água na superfície gera um gradiente de umidade com seu interior, iniciando também o processo de difusão, com movimento do interior da peça até a superfície, influenciada pelo fluxo de calor que ocorre no sentido inverso. Logo, essa movimentação interna ocorre conjuntamente em fases de líquido e de vapor.

A movimentação na fase líquida é fundamentalmente um fenômeno de capilaridade, enquanto que a movimentação em vapor é basicamente um fenômeno de difusão, afetados não somente pelas condições termodinâmicas da corrente de ar como também por características do próprio meio poroso, controlando dessa forma a taxa de secagem.

O estágio final caracteriza-se por iniciar quando a linha de evaporação de água se restringe ao centro da peça, ou seja, não há mais água livre no material, sendo a taxa de secagem regulada basicamente pelas características do material, até que o teor de umidade de equilíbrio seja alcançado (BROSINAN, 2003).

A água pode ser removida considerando-se o calor sensível (quantidade de energia para variar a temperatura) e o calor latente (quantidade de energia para troca de estado, no caso de líquido para vapor). Assim, o calor sensível utiliza 1 caloria para aumentar 1K a temperatura de um grama de água e no calor latente utiliza-se 540,5 calorias para evaporar um grama de água. Essa grande diferença do

alto calor latente de vaporização da água, explica-se principalmente devido as pontes de hidrogênio na fase líquida, que retarda a evaporação até que uma quantidade de energia esteja disponível para que as moléculas passem para a fase de vapor (BROSANAN, 2003).

A Figura 4.12 mostra os fenômenos do transporte de calor e massa. Segundo esse modelo, o calor é transferido do meio secante (ar) para a superfície do meio poroso que, uma vez aquecida, faz com que o calor seja transferido para o interior praticamente pelo processo de condução.

Na secagem de uma massa cerâmica, a transferência de calor e umidade é basicamente controlada pelas condições externas ao passo que o movimento de umidade do interior até a superfície é basicamente controlado por propriedades da massa cerâmica, como é o caso da permeabilidade e da massa específica. A espessura da peça influencia no processo porque seu aumento implica no crescimento da proporção entre a massa de água a ser retirada e a superfície de evaporação, tornando o processo mais lento (ÁLBARO, 2001).

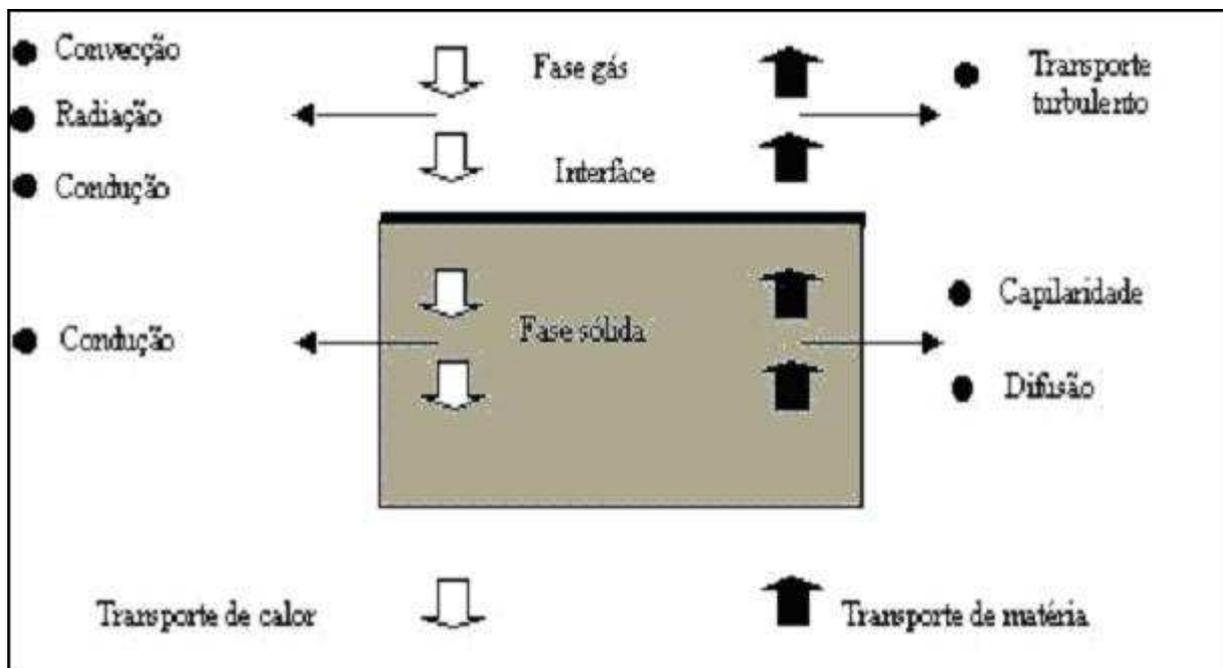


Figura 4.12 - Fenômenos de transporte de calor e massa. (BARBA, 1977).

4.5.3 Taxas e Fases de Secagem

O processo de secagem ocorre em etapas, geralmente bem definidas, em fases onde se verifica a maior ou menor facilidade da perda de umidade. A Figura 4.13 apresenta essas etapas de perda de massa em função do tempo, durante o processo de secagem.

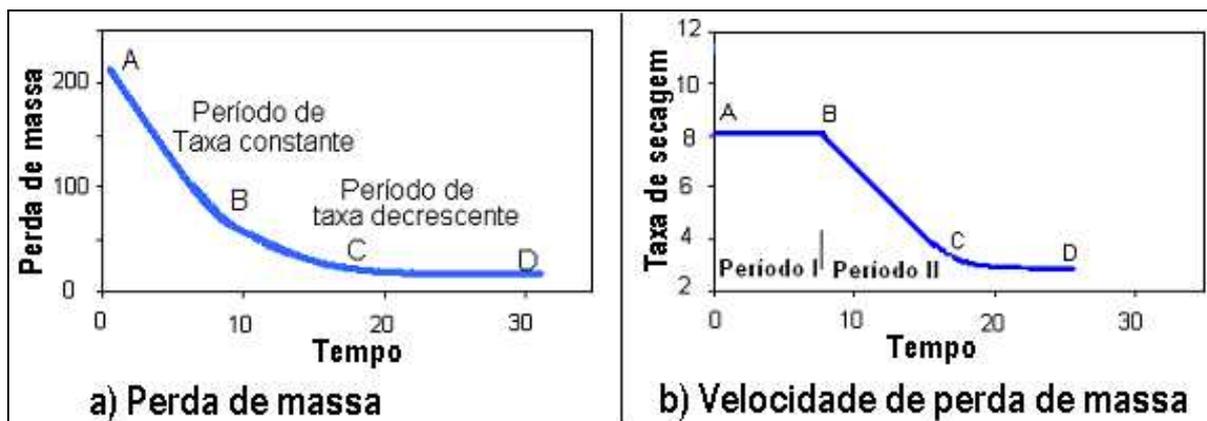


Figura 4.13 - Secagem de material cerâmico em função do tempo (BARBA, 1977).

Observando-se a Figura 4.13 destacam-se principalmente 2 estágios de secagem: o primeiro chamado de período de taxa constante (trecho AB), onde ocorre praticamente toda a retração, e o segundo chamado de período de taxa decrescente que se compõe de dois trechos (BC e CD). Nota-se ainda que os períodos ou estágios ficam bem caracterizados e separados pelo conteúdo de umidade crítica (ponto B), abaixo do qual a retração pode ser negligenciada (BARBA, 1977).

4.5.3.1 Estágio I - Primeiro período: taxa constante

Segundo Brosnan (2003), o período de taxa constante consiste no estágio onde parte da superfície do corpo cerâmico fica continuamente coberta com um filme de água. Em função da secagem, essa água tende a evaporar, sendo continuamente alimentada principalmente pela sucção capilar que age no interior do corpo cerâmico. No caso da transferência de energia ser pelo processo de convecção, a temperatura na superfície da peça será a de bulbo úmido devido ao ar circulante que flui sobre a superfície úmida da peça, alimentada pelos capilares. Nesse período, a taxa de evaporação durante a secagem fica diretamente

relacionada à diferença de entalpia entre a superfície do material cerâmico submetido à secagem e a entalpia do ar circulante. A perda de massa ocorrerá nessa fase, se houver energia suficiente para atingir o calor sensível da água, ocasionando a sua evaporação, bem como se o ar possuir características de absorver e transportar a umidade da peça.

Alguns cuidados são tomados, no sentido de que não haja uma perda excessiva de massa neste estágio I, que pode levar a uma excessiva retração da peça, o que concorre para a formação de fissuras ou, mesmo, para a ruptura da peça. A taxa de evaporação neste estágio encontra-se diretamente ligada ao fluxo de água do interior à superfície exterior da peça. Os diferentes materiais e suas diferentes composições também influenciam na taxa de fluxo (BROSNAN e ROBINSON, 2003). A Figura 4.13 evidencia esse período no trecho AB.

As fissuras podem acontecer devido a fatores como tipo de matérias-primas utilizadas, procedimento de mistura, processo de conformação ou até mesmo forma e geometria do corpo cerâmico. Alguns defeitos mais comuns devido à secagem podem ser citados (BROSNAN e ROBINSON, 2003):

a) Gradiente de fissuras de retração. Consiste no tipo mais comum de fissura, atingindo a superfície do corpo cerâmico, antes que o seu interior comece a fissurar. Esse tipo de fissura é consequência da rápida taxa de secagem, baixa permeabilidade do material cerâmico e da alta contração, que agem de maneira isolada ou com efeitos combinados. As correções são realizadas por uma secagem mais lenta associada, com o acréscimo de material não-plástico, como é o caso da chamota, areia e outros. A Figura 4.14 mostra esse tipo de fissura.

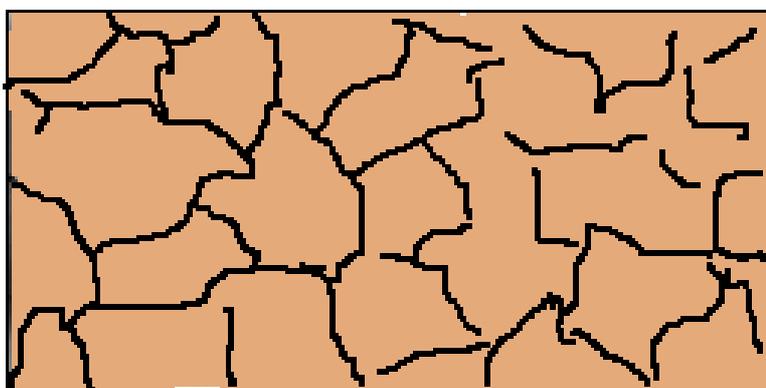


Figura 4.14 - Fissuras superficiais devido a alta taxa de secagem.

b) Não homogeneidade na estrutura. Surge da aglomeração de partículas ou grânulos dentro da estrutura do material cerâmico, provenientes da pré-seleção no processo de formação desse material e que se encontraria mal distribuído na massa. A Figura 4.15 destaca esse tipo de fissura. O acondicionamento em material plástico pode minimizar esse tipo de problema, mas não o eliminando completamente. Alterações na água de formação podem levar a uma pronunciada fissura, que se manifestará quando submetido ao processo de secagem.

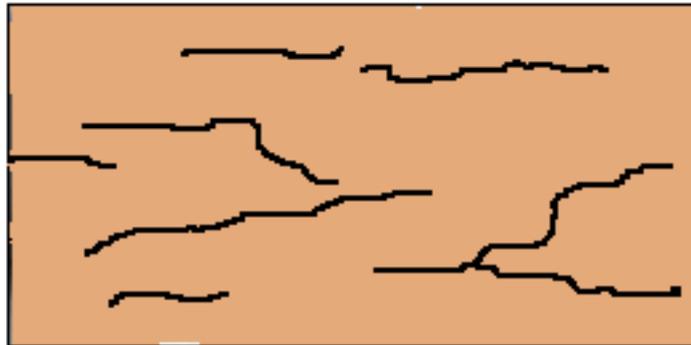


Figura 4.15 - Fissuras devido a não homogeneidade na distribuição das partículas na matriz.

c) Gradiente de água. As fissuras ocorrem devido ao movimento da água de uma posição para outra dentro da peça, sendo que a face que contenha a menor umidade residual tenderá a fissurar antes em relação à face de maior umidade. Durante a convecção, o ar incidente sobre a superfície a secará mais rapidamente que a face onde o mesmo não age, produzindo um gradiente de umidade, ocasionando a retração no interior da peça. Essa retração conduz a fissuras do material, pois as tensões são maiores que a resistência mecânica do corpo cerâmico. A Figura 4.16 mostra esse tipo de fissura. Aumentando-se o conteúdo de água nessas peças, aumenta-se a severidade das fissuras.

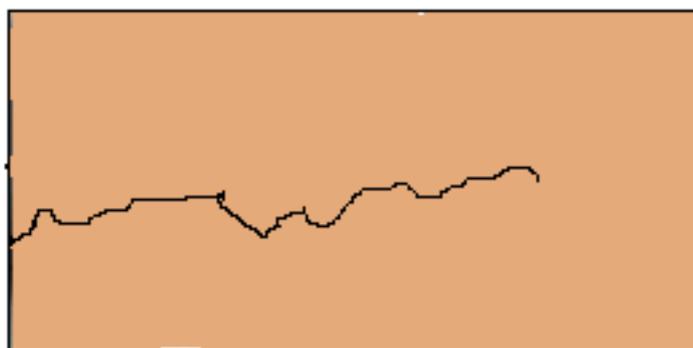


Figura 4.16 - Fissura na face com menor umidade residual.

d) Gradiente devido à espessura da peça. Diferenças na espessura entre os corpos cerâmicos podem causar fissuras, quando submetidos ao mesmo ambiente de secagem. Isso ocorre devido o corpo cerâmico mais fino secar mais rapidamente o que levaria a uma retração com maior intensidade. Essa diferença dimensional cria uma tensão de fissura entre as seções.

4.5.3.2 Estágio II - Segundo Período: taxa decrescente

Neste estágio, praticamente não ocorre retração, porém o produto ainda contém grande parte de sua água de formação. Pode ser dividido em duas etapas:

a) Primeiro período de taxa decrescente. A temperatura do ar circulante deve ser alta suficiente de forma a possibilitar que a água da parte interna do produto cerâmico chegue até sua superfície. O período começa após o período de taxa constante (Estágio I), mais especificamente, após atingir a umidade crítica, momento em que começa diminuir a taxa de perda de umidade (Figura 4.13, trecho BC). Nesse momento, a superfície já não mais se encontra coberta de água, sendo que a evaporação da umidade começa no interior do corpo cerâmico. Nesse período, são controladas principalmente duas variáveis:

i) A temperatura de bulbo seco, juntamente com a taxa de transferência de calor do ar de secagem;

ii) A taxa de permeabilidade do vapor de água, ou seja, a habilidade do corpo cerâmico de facilitar ou dificultar a saída da água.

Ainda, destacam-se fatores como o decréscimo da viscosidade da água do interior do produto em função do aumento da temperatura, influenciando sobre a taxa de transporte da água dentro dos capilares; e a taxa de difusão do vapor de água através da estrutura porosa que compõe o corpo cerâmico.

Entretanto, é a taxa de difusão como um todo que controla a taxa de umidade no interior dos capilares secos. Assim, torna-se comum nesta fase aumentar a temperatura sobre os produtos para acelerar a secagem.

b) Segundo período de taxa decrescente. Esse período tem início após o primeiro período de taxa decrescente. Caracteriza-se pela remoção da umidade residual no interior do corpo cerâmico que tende ir à superfície devido ao processo

de difusão. A temperatura torna-se a principal variável de controle, atingindo os maiores valores durante o processo de secagem.

Não há especificamente um valor que limita esses dois períodos do estágio II, somente a tendência do modelo da curva da taxa de secagem que começa a declinar de uma forma que sugere uma relação parabólica. A taxa de secagem diminui continuamente durante esse segundo período (Figura 4.13 trecho CD).

4.5.4 Caracterização de alguns parâmetros de secagem

4.5.4.1 Umidade Residual após secagem

Segundo Facincani (1993), ao final do processo de secagem, a água de conformação utilizada nos corpos-de-prova, não é completamente eliminada, sendo que o processo considera-se concluído quando fica presente uma pequena quantidade de água residual. Os produtos que permanecem com massa constante quando submetidos ao processo de secagem são considerados como secos. A quantidade de umidade final que permanece nos produtos depende de sua aplicação, podendo assim permanecer com umidade em alto ou baixo valor. Alguns fatores considerados no processo como tempo e custos de secagem; reabsorção de umidade pelo produto quando de seu estoque; resistência mecânica a seco; prevenção aos lascamentos, esfoliações e explosões na queima, constituem dificuldades para fixar o valor mais conveniente para a umidade residual. Somam-se ainda algumas características, tanto materiais quanto do ambiente de secagem e pós-secagem, como:

- Matéria-prima: composição, granulometria;
- Tipo de produto, porosidade, forma e dimensões;
- Tipo de secador;
- Tipo de forno de queima;
- Manipulação e empilhamento após secagem;

A umidade residual serve de indicador para o processo de secagem, porém ainda há necessidade de pesquisas que otimize o ambiente, principalmente visando à economia em relação ao consumo energético.

4.5.4.2 Perdas de água, retrações, tensões internas e tempos de secagem

De uma forma geral, quando os corpos cerâmicos são submetidos à secagem, algumas precauções são tomadas em relação a perdas de massa, retrações, tensões internas e tempos de secagem (FACINCANI, 1993):

- Caso a perda de massa aconteça muito lentamente, uma vez atingida a umidade crítica cessa o regime de perda de massa constante. Caso seja acelerada, o fluxo de umidade do interior para a superfície do corpo faz terminar o ciclo de perda de massa constante de forma antecipada. De qualquer forma, uma vez atingida essa umidade crítica, sucede-se o período de taxa decrescente onde a perda de massa continua de forma lenta em função do tempo.

- De acordo com a espessura do corpo cerâmico, a retração se manifesta de forma diferente, ou seja, no caso da utilização de corpos cerâmicos com pequena espessura, a retração se dará somente no primeiro período (taxa constante). Quando da utilização com grande espessura, a retração poderá continuar após o primeiro período, devido principalmente à migração da umidade do interior à superfície através da porosidade (capilares, meatos, canaliculos, etc.) do corpo cerâmico, formando gradientes de umidade entre o interior e a superfície do corpo cerâmico. Como resultado, tem-se retrações que se manifestam através de tensões de compressão na parte interna e de tração na parte superficial, cujas intensidades encontram-se diretamente ligadas à intensidade de sua diferença. Caso a intensidade na zona de tração seja maior em relação às forças de coesão que formam o corpo cerâmico, poderá provocar fissuras.

Segundo Barba (1977), a relação entre a perda de massa e a retração pode ser explicada segundo a curva de Bigot, caracterizando-se por dois períodos que são compostos por três estágios, conforme apresentado na Figura 4.13.

4.5.4.3 A curva de Bigot

A retração que as peças de cerâmica vermelha sofrem durante o processo de secagem constitui-se num parâmetro de grande importância tecnológica, pois durante essa etapa poderão surgir tensões, tendo como consequência a formação de trincas, comprometendo a qualidade do produto. Uma das formas de evitar esses fenômenos seria a utilização das curvas de Bigot que se propõe a acompanhar a perda de massa em função da retração linear. Sua representação gráfica propõe,

além de acompanhar o binômio perda de massa e a retração, sugerir a otimização do ciclo de secagem, fornecendo dados para previsão de tempo e custos envolvidos em lotes de secagem de produtos específicos. A forma aparente da curva encontra-se apresentada na Figura 4.17, tendo como eixo das abscissas a percentagem da retração de secagem e o eixo das ordenadas, a percentagem de água de conformação. Os pontos A, B e C com as retas referenciais E e D, auxiliam a interpretação da curva.

O ponto A, ao cortar a ordenada E, informa a percentagem de umidade no início da etapa de secagem da peça cerâmica. Ao se projetar esse ponto no eixo das abscissas, é obtido o valor da percentagem total de retração da peça.

Nota-se no gráfico a presença da água de plasticidade, mais especificamente nas retas D e E que passam pelos pontos A e B. Essa água, localizada entre as partículas (Figura 4.17b I) é a grande responsável pela retração da peça que se faz presente na primeira fase de secagem. Já a curva situada entre os pontos B e C forma a segunda fase da secagem, onde ainda pode haver alguma retração. Nessa fase, acontecem as perdas de água intersticial (Figura 4.17b II) e a água coloidal (fase III da Figura 4.17b), que se manifesta após a remoção da água intersticial.

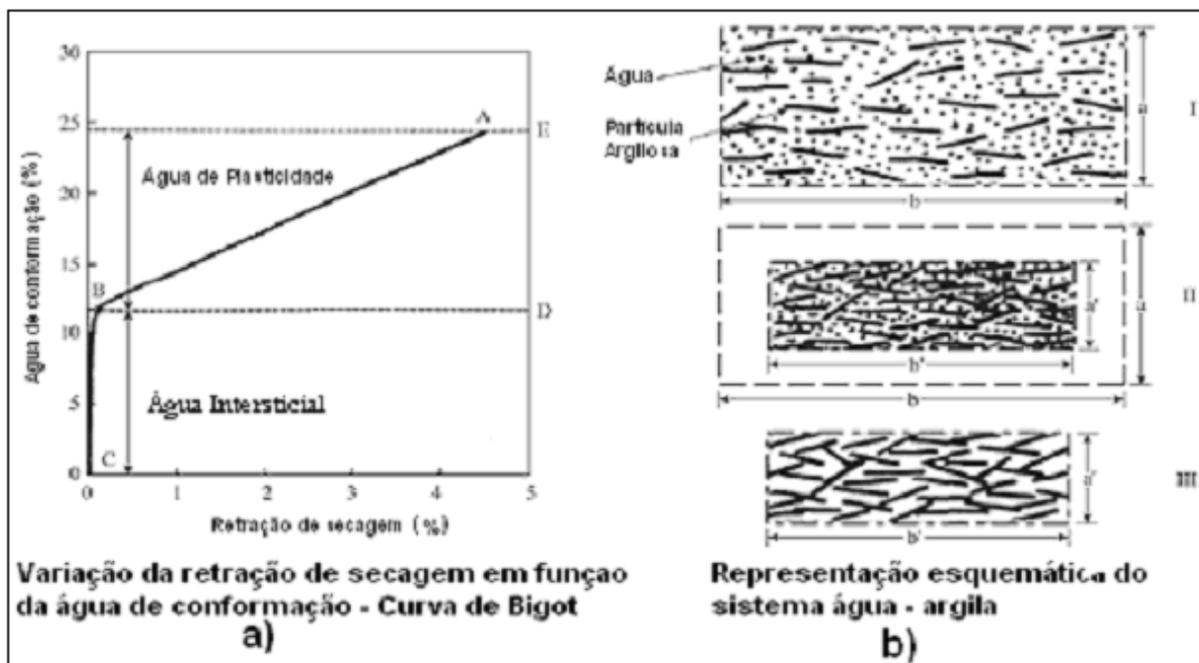


Figura 4.17 - Detalhes da curva de Bigot e representação esquemática do sistema argila – água.

A forma e valores do gráfico da Figura 4.17 são específicos para cada material cerâmico, onde seu conhecimento dá uma excelente projeção para estimar seu tempo de secagem.

4.6 ESTIMATIVA E PREVISÃO DO TEMPO DE SECAGEM EM MATERIAIS CERÂMICOS

Ao se submeter o material cerâmico ao processo de secagem por convecção sob determinadas condições psicrométricas do ar, o fenômeno da secagem poderá ser representado através de um gráfico que relaciona diretamente a perda de massa em função do tempo. O gráfico da Figura 4.18 apresenta a relação da perda de umidade média do corpo cerâmico (w) em função do tempo de secagem (t).

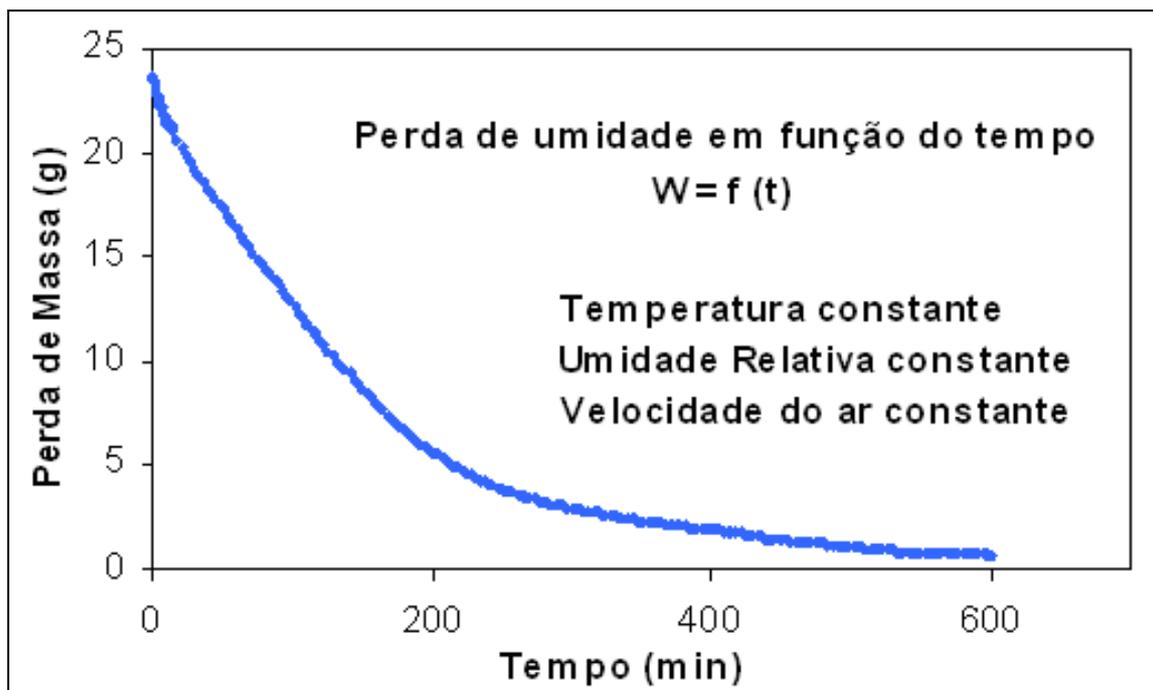


Figura 4.18 - Perda de umidade em função do tempo de secagem.

A partir desses dados, pode-se calcular a velocidade de secagem (V) a cada instante, através da diferenciação numérica entre a variação da perda de massa (dw) e a variação do tempo (dt). Matematicamente, pode ser representada pela Equação 4.8, que é definida para um sólido de massa M_d e com área A exposta ao meio de secagem, com o fluxo de umidade dW que deixa o sólido por unidade de tempo dt .

$$V = -\frac{M_d}{A} \frac{dW}{dt} \quad \text{Equação 4.8}$$

Visando fazer uma comparação entre a forma representativa tradicional e convencional da velocidade em função da umidade residual, conforme já consagrada na bibliografia (BARBA, 1977), com a forma experimental aqui pesquisada (velocidade acumulada em função do tempo de secagem), montou-se a Figura 4.19. Dessa forma, representou-se o fenômeno da velocidade de secagem de forma mais detalhada, onde em b) (representação experimental) se observam três períodos perfeitamente diferenciados: fase de indução (I); fase de velocidade constante (II); fase de velocidade decrescente (III); enquanto que na Figura 4.19a (representação convencional), são representados somente dois períodos de secagem, desconsiderando-se o período inicial ou de indução. Assim, representa-se o período de perda de massa a velocidade constante (II) e o período de perda de massa a velocidade decrescente (III).

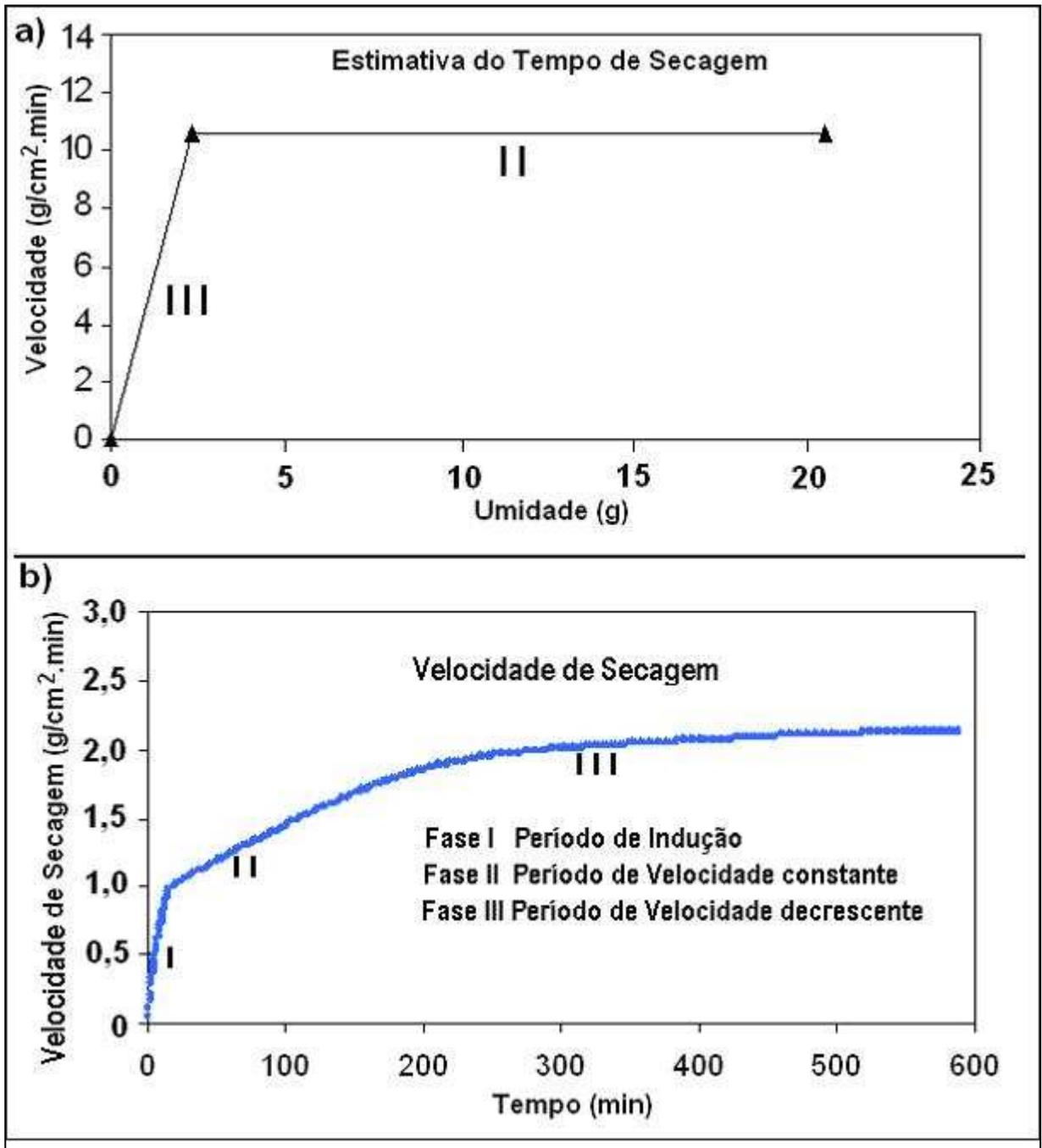


Figura 4.19 - Velocidade de secagem de um corpo cerâmico: a) Convencional b) Experimental.

Em linhas gerais, fazendo uma comparação entre as Figura 4.19a e Figura 4.19b, o período II apresenta uma faixa de umidade na qual a taxa de secagem se mantém constante em função do tempo. Nota-se para esse período, na Figura 4.19b, a inclinação da reta que se mantém na mesma declividade à medida que o tempo passa. Essa reta é formada pelas taxas de umidade calculada a cada intervalo de tempo e acumulada naquele instante, permanecendo assim até o início do período de velocidade decrescente de secagem (fase III), momento em que se

atinge a umidade crítica de Bigot. Ao mesmo tempo, constata-se na Figura 4.19a a constância dessa velocidade na fase II, à medida que o material cerâmico perde umidade.

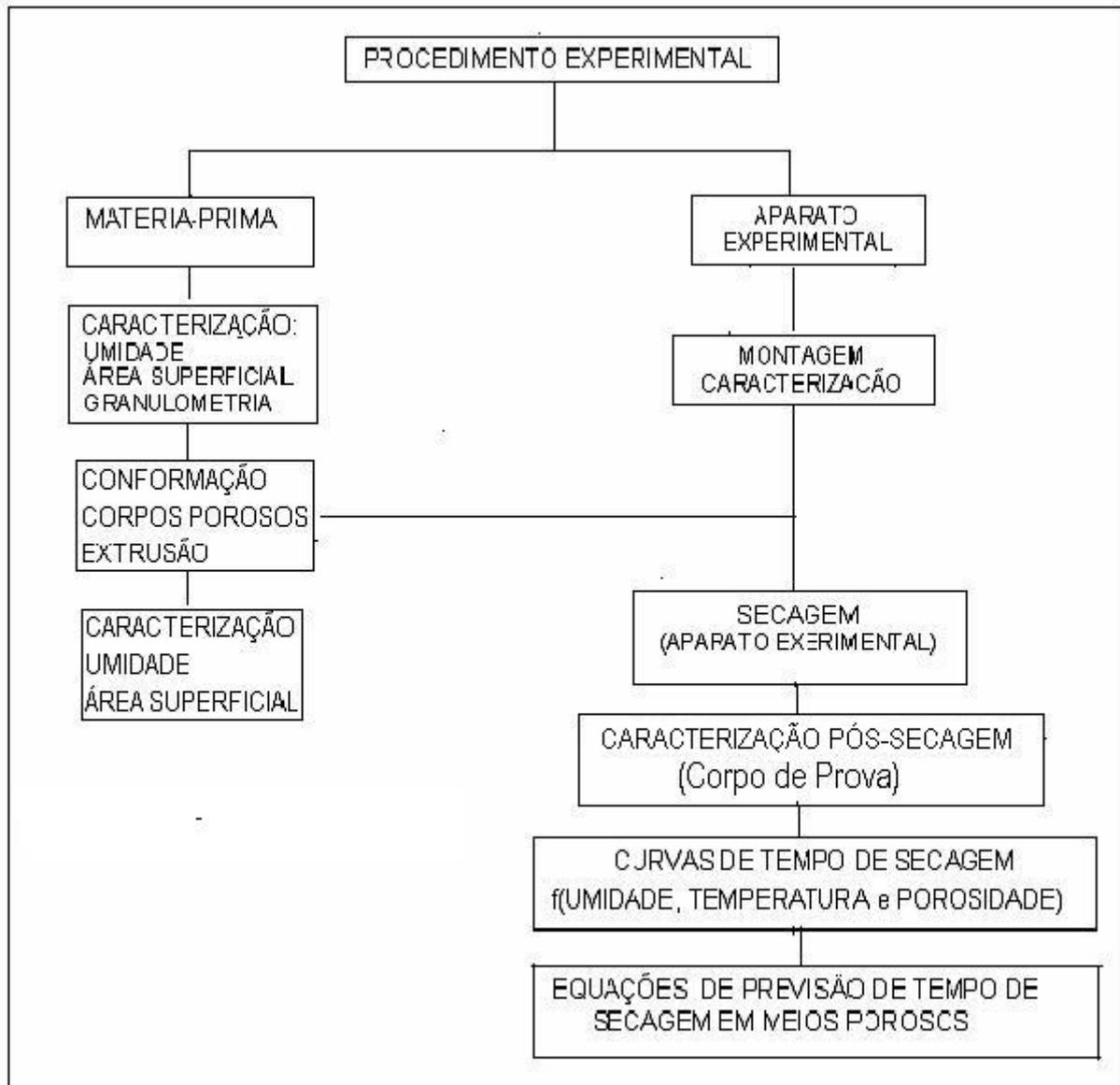
Já o período III apresenta uma faixa de umidade na qual a taxa de secagem vai diminuindo até o momento em que não mais haverá perdas. Nota-se para esse período, na Figura 4.19b, que a inclinação da reta não mais se mantém com declividade constante, mas sim vai diminuindo à medida que o tempo passa até a inclinação ficar paralela ao eixo do tempo. Da mesma forma, constata-se na Figura 4.19a que a velocidade de secagem vai diminuindo até a origem do gráfico, ou seja, sem mais perdas de umidade.

Em termos práticos para estimativa de secagem de certos materiais cerâmicos, obtém-se experimentalmente uma curva característica da perda de massa em função do tempo, típico da Figura 4.18. A partir dessa curva, obtém-se por diferenciação matemática, uma curva típica da Figura 4.19b, caracterizando assim a velocidade da perda de massa em função do tempo. A partir desses dados da velocidade (V), obtidos da prática experimental e considerando-se a Equação 4.8, chega-se à Equação 4.9, que possibilitaria estimar o tempo necessário para secar um material cerâmico ensaiado sob condições controladas a determinados valores de umidade.

$$t_2 - t_1 = -\frac{M_d}{A} \int_{w_1}^{w_2} \frac{dW}{V} \quad \text{Equação 4.9}$$

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 METODOLOGIA



A Figura 5.1 - Fluxograma representativo da metodologia adotada no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

5.2 APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização das operações de secagem, foi necessário o desenvolvimento de um aparato experimental, com funções de controlar, monitorar e registrar as condições psicrométricas do ar, em tempo real. Da mesma forma, necessitava-se atuar sobre as perdas de massa (água) durante o tempo de ensaio. Assim, o aparato de secagem possuía fonte de ar comprimido. O ar era injetado e circulava por um sistema de aquecimento e também por um sistema de vaporização, chegando finalmente até a câmara de secagem, onde se encontravam os corpos cerâmicos ensaiados. Como parte do aparati experimental, foi necessário fazer o projeto de um secador.

5.2.1 Projeto do secador

O projeto do secador seguiu o algoritmo de Keey (1978), conforme esquema apresentado na Figura 5.2. Definiu-se para o trabalho, a secagem do material cerâmico em bateladas, sendo submetido ao processo de convecção com circulação do ar psicrometricamente controlado.

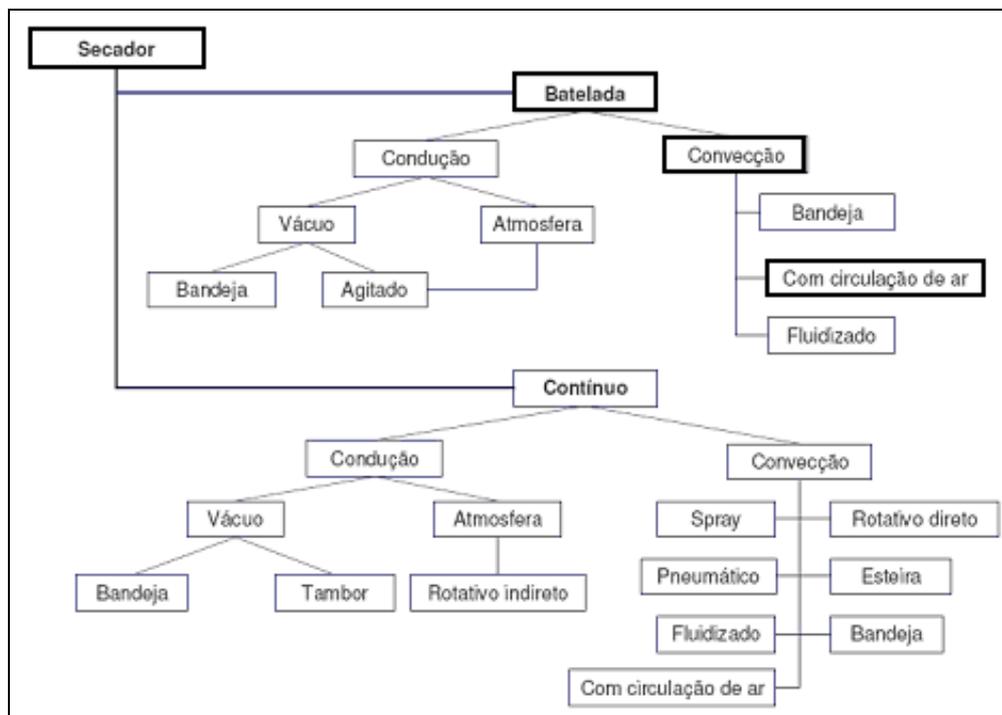


Figura 5.2 - Algoritmo de Keey: Classificação de secadores segundo o modo de operação (KEEY, 1978). Em negrito encontra-se o sistema aqui adotado.

Uma vez definido o tipo de secador, o próximo passo foi projetá-lo considerando o ciclo de etapas de caracterização dos materiais a serem ensaiados, conhecimento do secador e conhecimento do processo, até atingir a sua otimização. Para tanto, baseou-se no fluxograma de Key (1978), conforme apresentado na Figura 5.3. O sistema de secagem foi projetado também em função da disponibilidade no mercado de componentes e equipamentos específicos.

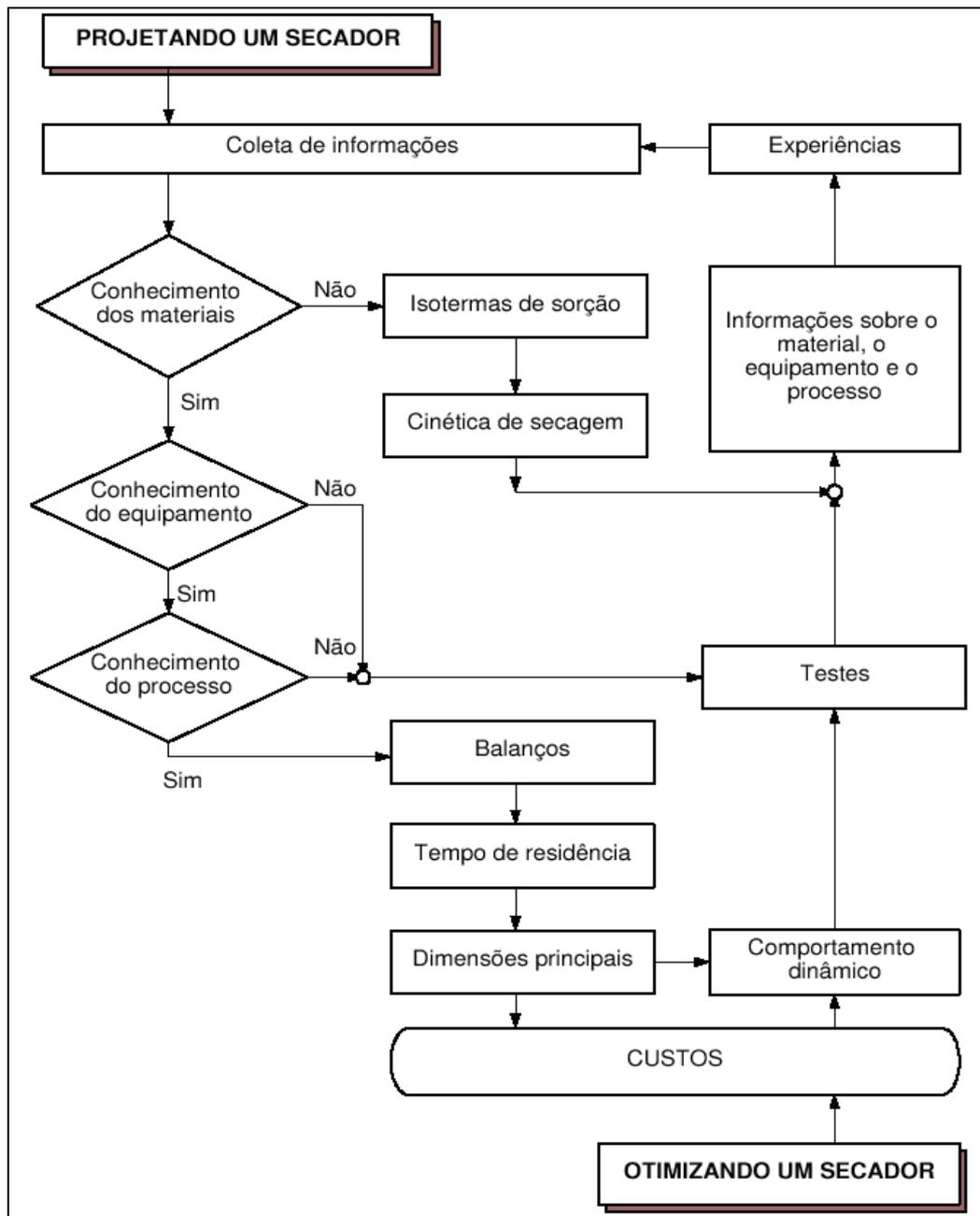


Figura 5.3 - Algoritmo de Key: projeto de funcionamento de um secador (KEEY, 1978).

O aparato projetado tem por princípio preparar o ar ambiente com algumas características psicrométricas como velocidade, temperatura, umidade relativa, visando sua aplicação diretamente sobre os produtos cerâmicos a serem secados. De um modo geral, o ar é captado do ambiente atmosférico, comprimido através de um sistema de compressão, aquecido através de um sistema de aquecimento, umidificado através de um sistema de vaporização e aplicado aos corpos-de-prova no sistema de secagem, com suas características sendo monitoradas, captadas e registradas em tempo real.

5.2.2 Princípio geral de funcionamento

A Figura 5.4 mostra a bancada constituída do sistema geral de secagem utilizada no experimento, composto pelo sistema de ar comprimido (1); sistema de aquecimento (2); sistema de vaporização (3); sistema de secagem (4) e sistema de monitoração (5).

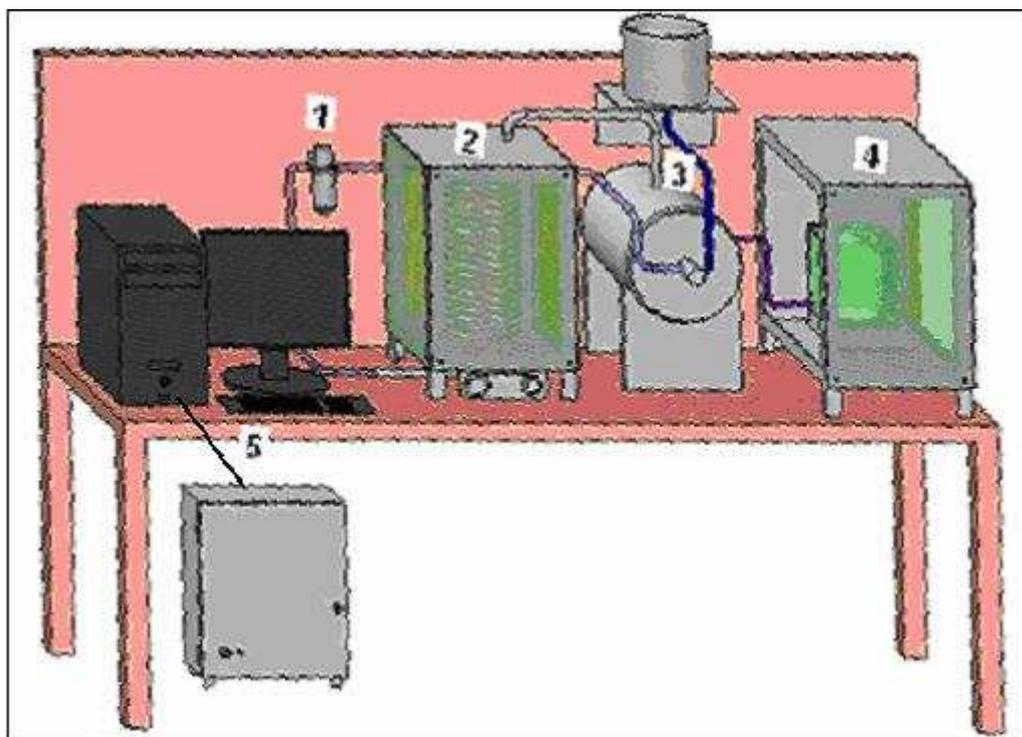


Figura 5.4 - Bancada de teste experimental utilizada neste trabalho.

A Figura 5.5 esquematiza o princípio geral de funcionamento do sistema de secagem do material cerâmico. O ar atmosférico ambiental é captado pelo sistema de ar comprimido (1) e transportado através do sistema de distribuição (C e D). Parte

do mesmo (C) chega até o sistema de aquecimento (2), onde terá sua temperatura aumentada, enquanto que outra parte do ar (D) chega até o sistema de vaporização (3), onde juntamente com a água de alimentação (6) serão pressurizados, formando o vapor de água fria. O ar proveniente do sistema de aquecimento (2) por sua vez se ramifica em duas direções, passando por trajetos diferentes (A e B). Na direção (A), o ar remove a umidade gerada no sistema de vaporização (3), tornando-se assim úmido e quente, direcionando-se até a câmara de expansão (4), enquanto que na outra direção (B), o ar quente e seco se encaminha diretamente até a câmara de expansão (4), fazendo a mistura final e ideal para o sistema de secagem.

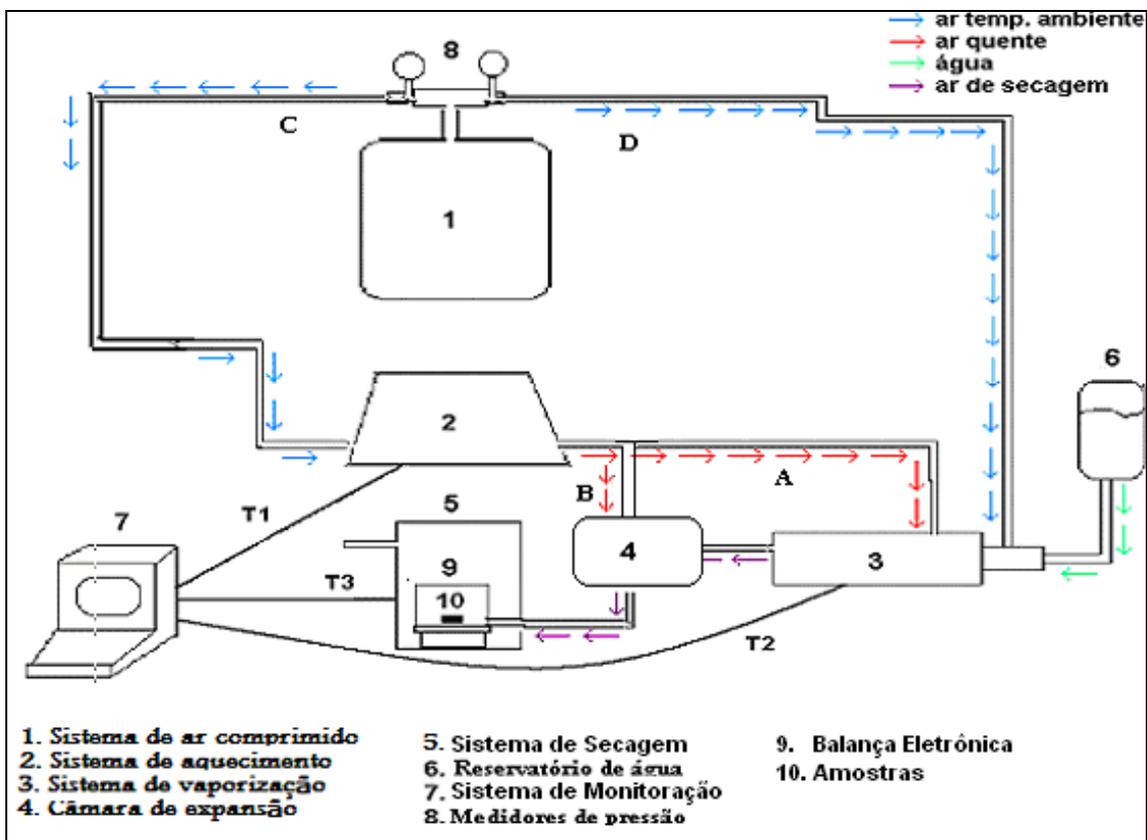


Figura 5.5 - Esquema geral de funcionamento do aparato experimental.

O ar agora expandido, homogêneo e psicrometricamente caracterizado (temperatura, umidade relativa e velocidade) na câmara de expansão (4), chega finalmente à câmara de secagem (5), atuando sobre os corpos cerâmicos úmidos ali depositados, removendo e exaurindo sua umidade para o meio ambiente. O sistema de aferição e de regulação, caracterizados pela presença de manômetros, válvulas e termopares, são os responsáveis pela calibração, controle de vazão e velocidade do ar em todo o sistema, alimentado por ar comprimido de forma contínua, dosando-

o de forma a atingir e manter a temperatura e a umidade relativa necessária para a realização desse processo.

5.2.2.1 Descrição do sistema de secagem

A seguir, é descrito cada um dos componentes (Figuras 5.4 e 5.5), que fazem parte do sistema de secagem desenvolvido para este trabalho:

i) Sistema de alimentação do ar de convecção

O sistema de alimentação do ar de convecção, foi baseado na utilização de ar comprimido; para tanto, foi utilizado um compressor de ar marca Schultz com capacidade de 175 litros; Seu funcionamento obedeceu o seguinte ciclo: o ar proveniente do meio ambiente é aspirado pelo compressor que o comprime e depois o distribui até um ponto de tomada, onde fica disponível para ser utilizado pelo aparato experimental quando da execução dos ensaios experimentais de secagem.

ii) Sistema de regulagem e aferição da pressão

O ar comprimido chega no ponto de tomada numa pressão muito superior a que será utilizada para o experimento. Foi instalado um sistema de regulagem, e de aferição da pressão, calibrando-se assim a pressão para ser utilizada no experimento. Utilizou-se dois tipos de manômetros de forma independente, que estavam ligados no mesmo ponto de tomada (derivação em T): um manômetro (pressão máxima 1,1 Mpa) para regular a pressão do ar que alimenta o sistema de aquecimento (distribuição C, Figura 5.5) e outro manômetro (pressão máxima: 0,40 MPa) para regular a pressão do ar que alimenta a câmara de vaporização para a formação do vapor d'água (distribuição D, Figura 5.5).

c) Sistema de proteção

O sistema de proteção da circulação do ar comprimido consistiu-se de dois tipos de registros abre e fecha: registros tipo globo esférico e registros tipo gaveta com rosca para dar uma melhor aproximação e refino do ar circulante. Na direção que alimenta o sistema de aquecimento (ramo C da Figura 5.5), foi utilizado um conjunto formado de um registro globo e um registro gaveta. Da mesma forma, na direção que alimenta o sistema de vaporização (ramo D da Figura 5.5), foi utilizado um registro globo e um registro gaveta.

iv) Sistema de distribuição

O sistema de distribuição do ar comprimido foi projetado com a finalidade de interligar os vários componentes que fazem parte do sistema, Partindo desde o compressor até o sistema final de secagem. Foi executado com mangueiras do tipo trançada e transparente, modelo *spyraflex* spt 5/16 x 2,5 mm.

v) Sistema de aquecimento (Estufa)

O sistema de aquecimento (estufa) tinha a finalidade de aquecer o ar comprimido que chega com temperatura ambiente em sua entrada. Foi criado um sistema hermeticamente fechado constituído de serpentinas de cobre moldado em forma de espiral, com as seguintes especificações: tubo de cobre com diâmetro externo de 6,3 mm; diâmetro interno de 3,3 mm; espessura de parede do tubo de 1,5 mm; comprimento do tubo de 16 m; diâmetro médio da espiral de 185 mm; número total de 28 voltas com espaçamento de 11,3 mm entre espiras.

A serpentina de cobre foi colocada dentro de um recipiente metálico (latão) cilíndrico, dotado de base e tampa removível, com 250mm de altura, 200mm de diâmetro externo e 3mm de espessura de parede. Em sua parte interna, foi fixada uma fonte de energia térmica constituída por uma lâmpada de 250 watts, com a função de irradiar energia (calor) para aquecer a serpentina de cobre que por sua vez aquece o ar circulante em seu interior. Esse conjunto foi isolado termicamente através da utilização de placas de lã de vidro em sua envoltória cilíndrica externa. O isolamento térmico era constituído de 2 placas (inferior e superior) com as dimensões de 220x220x25,4mm³ e 4 placas laterais de 230x300x25,4mm³

Todo o sistema de aquecimento foi envolvido por uma caixa formada por 6 placas de alumínio (300x300x3mm³), com a função de proteger esse sistema. Na prática, o ar frio proveniente do sistema de ar comprimido, penetra numa das extremidades da espira de cobre, onde à medida que circula em seu interior sofre aquecimento devido à absorção da energia térmica ao longo do trajeto, saindo aquecido na outra extremidade.

Para se controlar a temperatura a ser aplicada ao processo de secagem, instalou-se no sistema de aquecimento, um sistema de controle formado por um termostato (0 – 110°C) e por um reostato com as funções respectivas de controlar a temperatura e a voltagem que alimenta a fonte de energia térmica (lâmpada elétrica de 250W), obtendo-se uma temperatura constante na saída da estufa. O anexo B, apresenta detalhes sobre a avaliação do rendimento do sistema de aquecimento.

vi) Sistema de vaporização (Câmara de vapor)

O sistema de vaporização foi formado por duas câmaras cilíndricas hermeticamente fechadas, dispostas de maneira concêntrica, ou seja, uma acoplada ao interior da outra, posicionadas de modo horizontal. A câmara interna de menor comprimento e diâmetro, formada por vidro opaco e internamente espelhada foi fixada na parte interna, mais especificamente na base da câmara externa que é feita de porcelana e tampada com material feito de acrílico transparente. Nessa tampa, foi acoplada: a bomba de vaporização (Anexo A). A entrada do ar quente proveniente do sistema de aquecimento. A mangueira de saída do ar (agora quente e úmido) destinado à câmara de secagem e o dreno de água (para escoar o excesso acumulado no interior desse sistema de vaporização).

O princípio de funcionamento da câmara de vaporização é simples e baseia-se principalmente no funcionamento de uma pistola de pintura. Essa é alimentada por ar comprimido, em sua base e por água fria proveniente de um reservatório (por gravidade) em sua parte superior. A água pressurizada forma uma neblina, que é jateada contra a base da câmara interna de vaporização. Quando do choque, parte dessa neblina é perdida e escorre pelas paredes da câmara interna, acumulando-se até ser removida pelo dreno, enquanto que outra parte forma o vapor de água que é retirado pelo ar quente (proveniente da estufa), deixando-o agora quente e úmido.

A quantidade de vapor a ser removida, dependerá principalmente de variáveis como energia de pressurização da bomba, distância entre a bomba e o anteparo de choque (base da câmara interna), temperatura e velocidade do ar de entrada na câmara. Visando a otimização do processo, foram realizados testes à temperatura ambiente (25°C), variando-se a pressão de jateamento da pistola bem como sua distância ao anteparo de choque. Testou-se o rendimento variando-se as pressões e as distâncias entre o jato e o anteparo de choque, destacando-se como de bons resultados a faixa de pressões de 0,10MPa a 0,50MPa, mais especificamente, os melhores desempenhos estariam na faixa de pressão de 0,22Mpa a 0,42Mpa para uma distância otimizada entre bomba e anteparo que ficou em torno de 230mm. O gráfico constante no anexo A auxilia na verificação desses resultados.

g) Sistema de secagem

O sistema de secagem foi formado por três câmaras, colocadas de maneira sequencial, como segue:

I) Câmara de mistura e expansão, cuja finalidade é misturar e expandir o ar úmido e quente proveniente do sistema de vaporização, com o ar quente e seco proveniente do sistema de aquecimento, definido assim sua temperatura e umidade relativa, antes que os mesmos sejam aplicados ao material cerâmico a ser secado. Após sua homogeneização e mistura, esse ar psicrométrico se encaminha até a câmara de secagem.

II) Câmara de secagem consiste na câmara onde ficam os corpos-de-prova úmidos, que serão submetidos ao processo de secagem propriamente dito. O ar proveniente da câmara de mistura e expansão passa por esses corpos-de-prova removendo sua umidade, dirigindo-se para a câmara de exaustão.

III) Câmara de exaustão tem a finalidade de eliminar o ar de secagem proveniente da câmara de secagem para o ambiente atmosférico.

h) Sistema de aferição:

O sistema de aferição foi composto por uma estação com microcomputador que tem a função de armazenar, processar e registrar as temperaturas em vários pontos do aparato experimental, bem como também registrar as perdas de massa dos produtos cerâmicos. Utilizou-se de duas interfaces seriais acopladas ao microcomputador; uma delas foi ligada a uma balança eletrônica digital, para aquisição das perdas de massa dos corpos cerâmicos, enquanto que a outra foi ligada a uma estação eletrônica controladora de termopares, onde estavam acoplados 16 termopares e que foram espalhados em vários pontos do sistema de secagem, visando a aquisição das temperaturas nesse sistema. Os dados das temperaturas e da perda de massa foram captados e registrados em tempo real, em planilhas eletrônicas, visando sua futura utilização para a determinação dos parâmetros psicrométricos.

Para a aferição da umidade relativa do ar, adotou-se o modo clássico, ou seja, através da utilização do psicrômetro formado pelos termopares de bulbo seco e de bulbo úmido. A temperatura de bulbo úmido foi obtida colocando-se um termopar envolvido por um tecido de algodão, embebido em água destilada. Um conjunto de termopares (bulbo seco e bulbo úmido) ficou localizado frente ao fluxo de ar de secagem na entrada da câmara de secagem e outro conjunto ficou localizado na saída da câmara de exaustão.

i) Sistema de registro de informações:

O sistema de registro de informações tem a função de registrar as temperaturas e a perda de massa ocorrida durante o processo de secagem. Os dados foram automaticamente armazenados em um microcomputador, via planilha eletrônica. Para o caso específico das temperaturas, os registros foram feitos a cada três minutos; para o caso específico das perdas de massa, a captura e a transferência foi feita a cada 30 segundos.

5.2.3 Avaliação da eficiência e funcionalidade do secador

Uma vez definido e montado o sistema de secagem, foi necessário avaliar e acompanhar sua eficiência e funcionalidade visando sua construção definitiva. Para tanto, seguiu-se o fluxograma de Keey, conforme citado no item 5.2.1, otimizando materiais, equipamentos e processos. De forma paralela, utilizou-se cartas psicrométricas (item 4.3.1), onde foram lançadas as informações coletadas do experimento. Através do conhecimento de três propriedades do ar, conforme cita as regras de Gibbs (item 4.5.1), adotou-se a pressão atmosférica, a temperatura e a umidade relativa e determinou-se as demais propriedades, como entalpia, razão de mistura. O anexo B mostra detalhes sobre os ensaios feitos no sistema de secagem executados em vazio e com água pura no interior da câmara de secagem quando foi analisado o rendimento do sistema. Utilizou-se das cartas psicrométricas e levou-se em consideração o ar ambiente na entrada, no aquecimento e na exaustão do sistema de secagem.

Uma vez constatada a funcionalidade e rendimento do equipamento de secagem com testes em vazio e em branco (com água), partiu-se para a realização do experimento em definitivo, nos vários ambientes atmosféricos que foram submetidas as formulações investigadas.

5.3 MATERIAIS

5.3.1 Massa cerâmica (Argila sem chamota)

Para o desenvolvimento deste trabalho, a matéria-prima base dos corpos-de-prova foi a massa cerâmica de uma empresa produtora de lajotas cerâmicas,

localizada no município de Gravataí-RS. As argilas vermelhas utilizadas na massa cerâmica são provenientes de uma jazida da formação Rio do Rastro. A massa industrial investigada foi coletada após a passagem pela maromba, na forma de blocos de pavimentos cerâmicos extrudados.

Para a caracterização da massa cerâmica industrial realizou-se análises química, mineralógica, bem como das propriedades físicas.

5.3.1.1 Composição química

A composição química da massa cerâmica foi obtida por fluorescência de raios-X, utilizando um equipamento SCHIMADZU XRF 1800, é apresentada na tabela 5.1. Os principais constituintes da massa cerâmica são SiO_2 , com percentual de 69,86%, e Al_2O_3 com 13,94%, quantidade esta relacionada à proporção do mineral argiloso e feldspato presente nas diferentes argilas constituintes da massa cerâmica.

Tabela 5.1 - Composição química da argila.

	(%) em peso
SiO_2	69,86
Al_2O_3	13,94
Fe_2O_3	5,75
K_2O	2,60
MgO	1,09
TiO_2	0,63
P_2O_5	0,21
CaO	0,12
Na_2O	0,12
MnO	0,08
PF	6,31
Total	100,64

O teor de Fe_2O_3 , 5,75% e a forma em que se apresenta são suficientes para garantir a cor vermelha, podendo indicar também a presença de hematita na amostra. A quantidade de K_2O indica a presença de ilita, também constatada pela

análise mineralógica. A perda ao fogo se deve, provavelmente, à decomposição de minerais argilosos, assim como a combustão da matéria orgânica.

5.3.1.2 Composição mineralógica

Por se tratar de um material argiloso, a análise mineralógica foi efetuada por dois métodos distintos: método da amostra não orientada e orientada (HOLTZAPFFEL, 1985). O método orientado, descrito por Santos (1975), analisa a fração menor que $2\mu\text{m}$ de um material argiloso, onde se encontram os argilominerais. O equipamento utilizado foi o difratômetro Philips X'PERT MPD.

A Figura 5.6 apresenta o difratograma da massa cerâmica industrial, utilizando-se o método não orientado para identificar as fases presentes do material, onde é possível identificar-se os argilominerais caolinita e ilita, além de quartzo e hematita. A presença de hematita está relacionada ao Fe detectado na análise química, da mesma forma que o quartzo com a SiO_2 . Em relação aos argilominerais, a ilita está relacionada com a SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O , enquanto que a caolinita está relacionada com SiO_2 e Al_2O_3 .

A Figura 5.7 apresenta o difratograma da fração menor que $2\mu\text{m}$ da massa cerâmica industrial ao natural, glicolada (com etilenoglicol) e calcinada a 500°C por duas horas. Através da análise dos difratogramas da Figura 5.7, pode-se constatar a presença dos argilominerais caolinita e ilita e outros minerais como quartzo e rutilo, este último detectado apenas após a calcinação da massa cerâmica industrial.

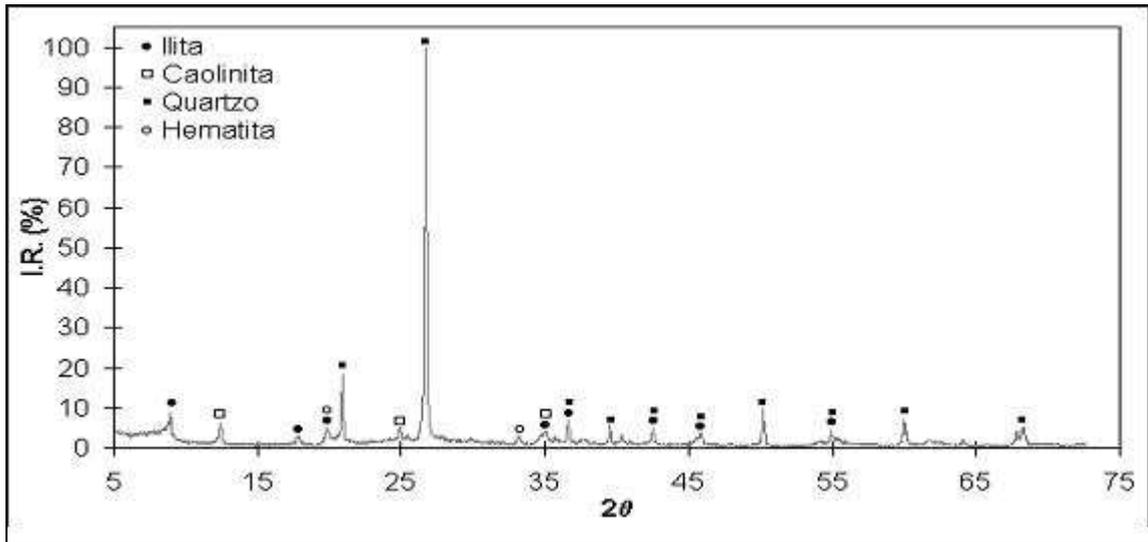


Figura 5.6 - Difratoograma da massa cerâmica obtido pelo método da amostra não orientada.

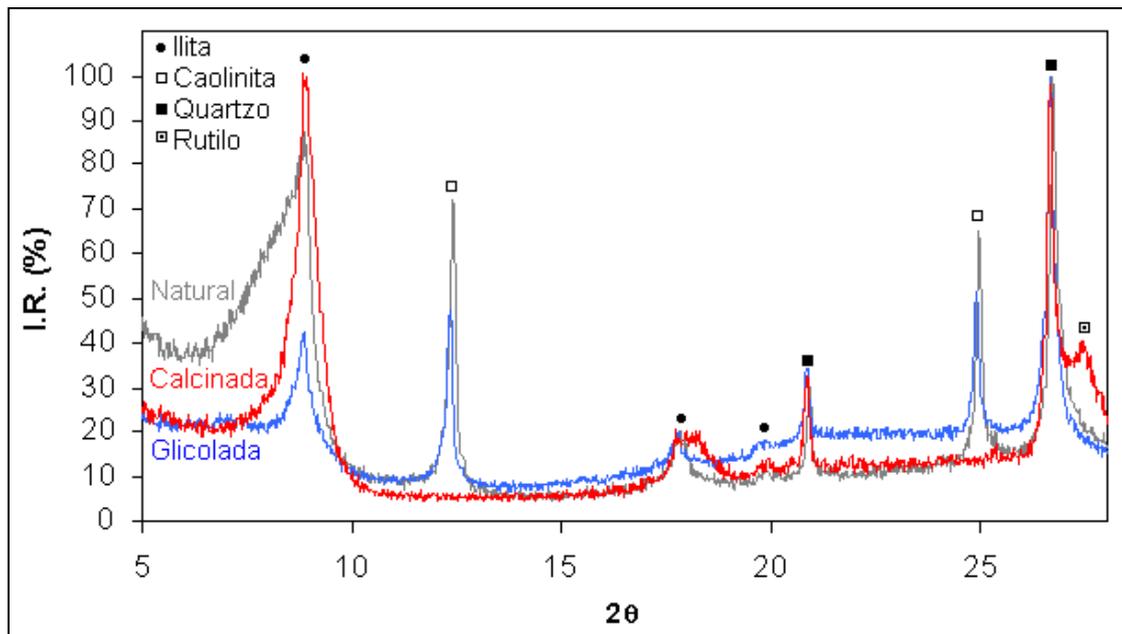


Figura 5.7 - Difratoogramas da massa cerâmica, fração argila, obtidos pelo método da amostra orientada: argila natural, glicolada e calcinada (2 horas a 500°C).

A presença dos argilominerais observados nas massas cerâmicas industrial ao natural pode ser comprovada após a amostra ter sido glicolada e calcinada. Para verificar se o primeiro pico constatado na amostra tratava-se do argilomineral esmectita ou illita, analisou-se a expansibilidade da amostra. Não foi possível

observar qualquer expansão na amostra glicolada (com etilenoglicol). Confirma-se assim, a presença de ilita na massa cerâmica industrial, argilomineral que não apresenta expansão quando glicolado.

5.3.1.3 Propriedades físicas

Para a determinação das propriedades físicas da massa cerâmica industrial, foram realizados ensaios de análise granulométrica, resíduo retido na peneira # 325, limite de plasticidade, análise termodilatométrica, análise termogravimetria e termodiferencial, bem como densidade real e área superficial específica.

i) Resíduo retido na peneira # 325. A massa cerâmica industrial foi passada na malha da peneira # 325 (44 μ m) e a fração retida foi calculada em relação à massa total. Foi obtido um valor de 12,48% em peso para a fração retida.

ii) Limite de plasticidade. O limite de plasticidade mede a quantidade de água mínima necessária para que a argila adquira plasticidade. Neste trabalho, escolheu-se o método de Atterberg para determinar o limite de plasticidade do material argiloso, baseado na norma ABNT/NBR 7180/84. Para tanto, foi adicionada água à massa cerâmica peneirada, quando então foram conformados os filamentos de argila, com dimensões de 10mm de comprimento e diâmetro em torno de 3mm. A Tabela 5.2 lista os valores dos limites de plasticidade para 5 amostras, calculadas tanto em base úmida quanto em base seca. Foi obtido o valor médio de 26,7% em base úmida e 36,5% em base seca. Este valor de limite de plasticidade enquadra-se aos esperados para um material íltico-caolinítico, que varia de 30 a 46% (BARBA, 1997).

Tabela 5.2 - Limite de plasticidade da argila (NBR 7180/84).

Amostra	Peso Úmido (g)	Peso Seco (g)	Base Úmida (%)	Base Seca
1	93,13	91,388	26,6	36,3
2	90,227	88,424	26,5	36,0
3	111,945	110,85	26,8	36,5
4	91,916	90,655	26,7	36,5
5	104,6	103,386	27,1	37,2
Média			26,7	36,5

iii) Análise granulométrica. A análise granulométrica foi efetuada a partir do ensaio de distribuição de tamanho de partícula, pela difração a laser (equipamento

Cilas 1080). A Tabela 5.3 apresenta a análise granulométrica da massa cerâmica industrial. A Figura 5.8 apresenta o gráfico de distribuição granulométrica correspondente. Observa-se que 10% das partículas possuem um tamanho máximo de 0,71 μm ; 50% das partículas tem tamanho máximo de 3,3 μm e 90% das partículas tem tamanho de 11,7 μm .

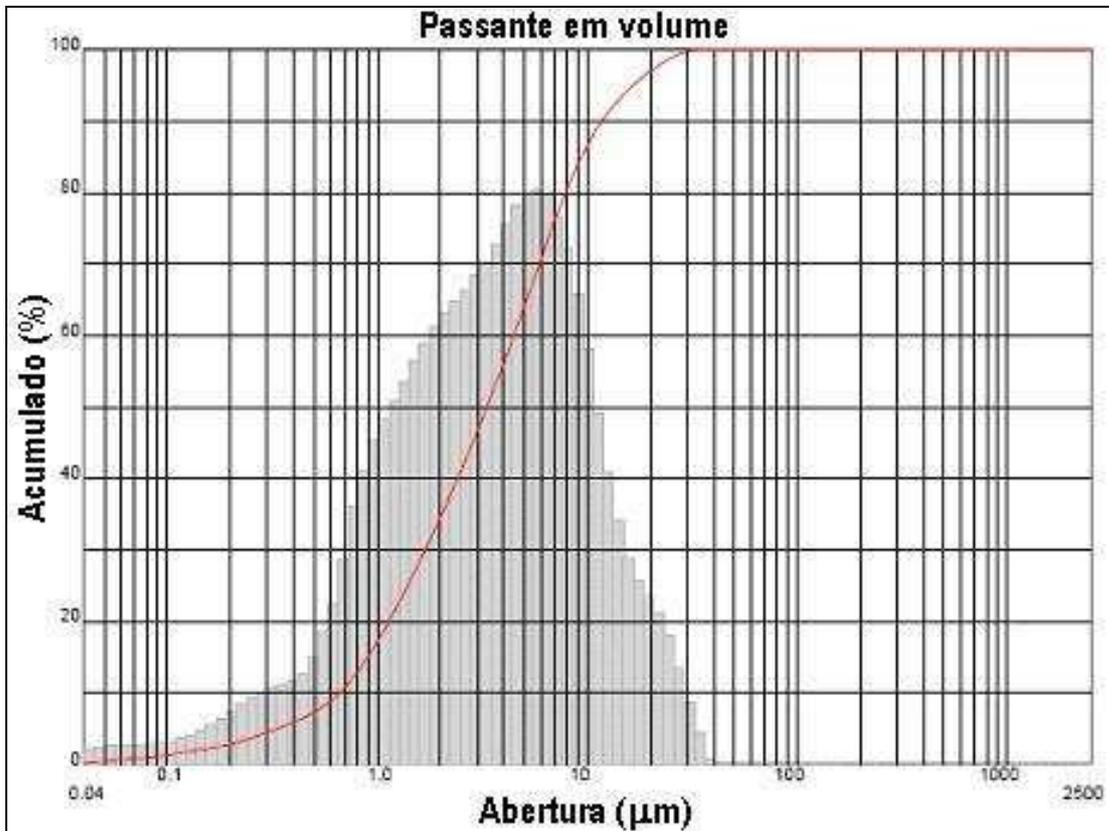


Figura 5.8 - Distribuição granulométrica da massa cerâmica utilizada nos ensaios de secagem.

Tabela 5.3 - Análise granulométrica da massa cerâmica industrial.

Amostra	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)
Argila	0,71	3,30	11,70

Obs.: D₁₀, D₅₀ e D₉₀ são percentagens (10, 50 e 90%) as quais as partículas encontram-se abaixo do diâmetro especificado.

iv) Dilatação térmica linear. A determinação da dilatação térmica linear da massa cerâmica foi realizada em um dilatômetro da marca Harrop Toda 726-SC, que mede a expansão e contração de uma amostra diretamente, em função da temperatura. A Figura 5.9 apresenta a curva de dilatação térmica da massa cerâmica industrial para temperaturas de até 950°C, com taxa de aquecimento e resfriamento de 150°C/h.

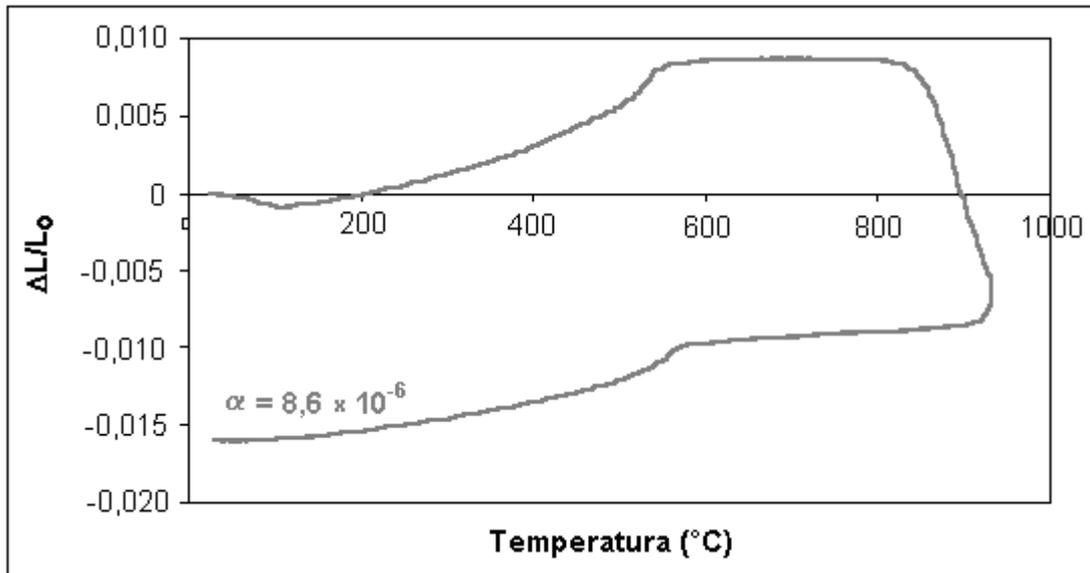


Figura 5.9 - Curva termodilatométrica da massa cerâmica industrial à temperatura máxima de 950°C e taxas de aquecimento e resfriamento de 150°C/h.

A partir da curva dilatométrica da massa cerâmica, pode-se inferir algumas informações a respeito do comportamento térmico da mesma, mencionadas por Vicenzi e Bergmann (1998).

Até aproximadamente 200°C, ocorre a eliminação da água livre do material argiloso. A extensão da perda de água depende do tamanho das partículas, quanto mais finas, maior será a quantidade de água livre adsorvida, portanto maior a extensão da contração devido à eliminação desta água.

A expansão observada entre 200°C e 450°C deve ser devida a oxidação da matéria orgânica presente na massa cerâmica. Aproximadamente 550°C, ocorre uma mudança na curva dilatométrica, devido à eliminação da água estrutural, proveniente dos argilominerais da illita, bem como os íons OH⁻ da estrutura cristalina da caolinita. Próximo a esta temperatura, pode ocorrer a transformação alotrópica do quartzo α em β , que pode ser observada devido a tendência à expansão neste intervalo. Eventualmente, o quartzo presente tenha reagido (parcialmente ou totalmente) com CaO, formando CaO.SiO₂, o qual então não sofre mais a transformação de fase prevista para o quartzo no resfriamento.

Após aproximadamente os 850°C, inicia-se a sinterização, observada pela retração linear da amostra. Durante a curva de resfriamento, pode-se verificar apenas a contração linear da amostra, constatada pelo cálculo do coeficiente de expansão térmica linear $\alpha = 8,6 \times 10^{-6}/K$.

5.3.2 Chamota

No desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se como matéria-prima não-plástica a chamota, por ser resíduo facilmente obtido, proveniente da queima de lajotas extrudados e facilmente obtidos na mesma indústria cerâmica.

Na produção de lajotas, aproximadamente 15% da massa da peça queimada não é aproveitada, independentemente da quebra. Como ilustra a Figura 5.10, o produto obtido da extrusora é um bloco composto por dois pisos separado por filetes da mesma massa cerâmica. Os filetes são separados das duas faces, constituindo um subproduto do processo (Figura 5.11).

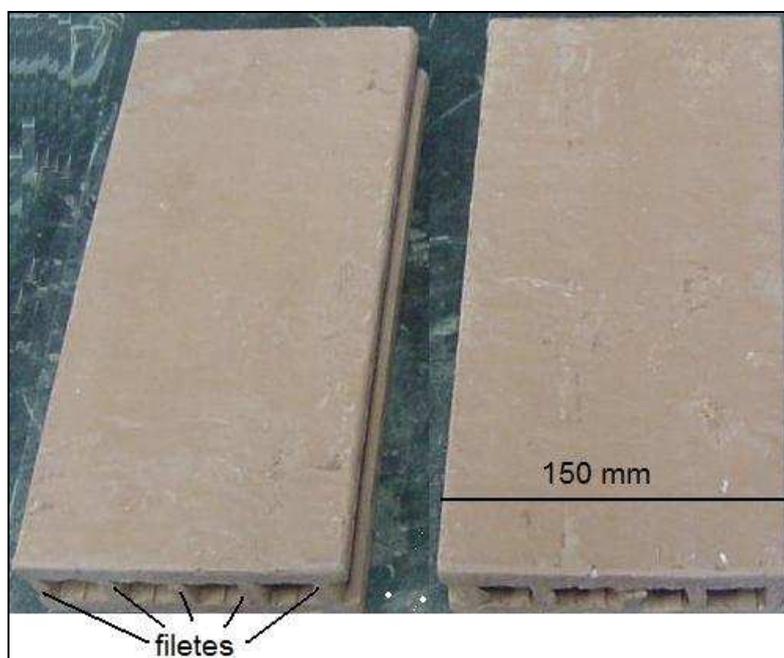


Figura 5.10 - Lajota extrudada, antes da queima, após extrusão em maromba industrial.

Segundo Pracidelli (1997), a adição de até 20% de chamota, finamente moída, aumentam a resistência após a queima, enquanto adições acima de 20% reduz a resistência.

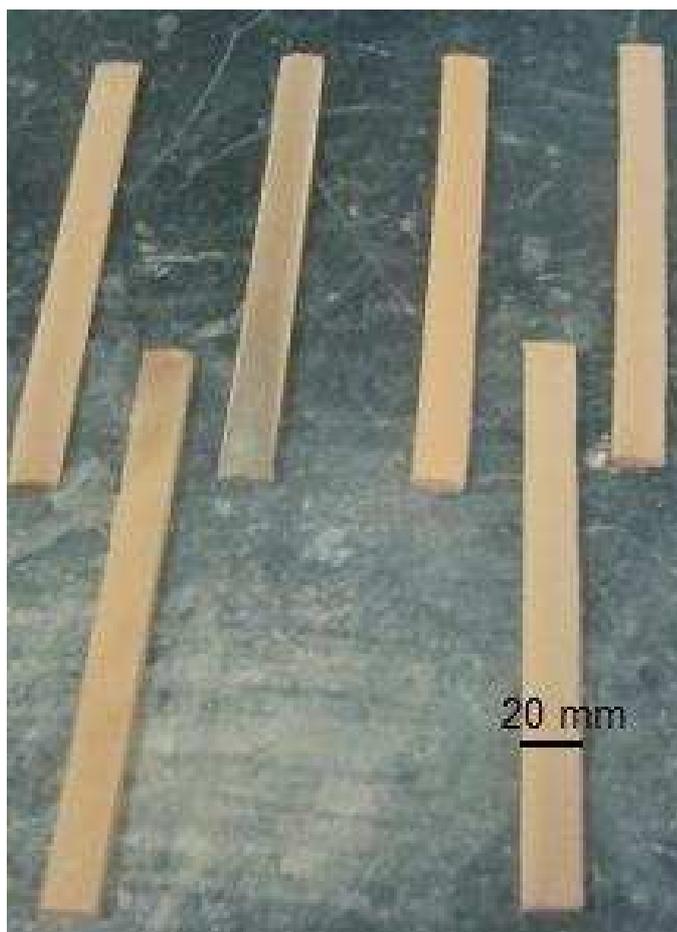


Figura 5.11 - Detalhes dos filetes de chamota queimados, antes da moagem para serem adicionados na formulação dos corpos-de-prova investigados.

A chamota utilizada neste trabalho originou-se, portanto, a partir da moagem (em moinhos de facas e periquito) dos filetes. Após a moagem, a chamota foi então separada em frações granulométricas para adição na massa cerâmica.

Na caracterização da chamota, não se efetuou sua análise química, pois seus constituintes devem ser os mesmos na massa cerâmica crua analisada, com exceção da matéria orgânica, materiais carbonosos e a água. Estes compostos já são eliminados da massa cerâmica através da perda ao fogo que é feita antes da execução da análise química.

5.3.2.1 Composição mineralógica

A Figura 5.12 apresenta o difratograma da chamota utilizando-se o método não orientado para a identificação das fases presentes do material. Através do difratograma mostrado na Figura 5.12 verifica-se que a chamota apresenta os constituintes quartzo e hematita. O equipamento utilizado foi o difratômetro Philips X'PERT MPD.

A Figura 5.13 apresenta o difratograma da chamota da fração menor que $2\mu\text{m}$, obtido pelo método orientado. É apresentado na mesma Figura o difratograma da chamota natural e calcinada a 500°C por duas horas. Não executou-se a difração de raios-x da amostra glicolada, visto que a mesma não apresentava nenhum argilomineral constituinte possível de expansão.

Através da análise dos difratogramas da Figura 5.13, pode-se constatar na chamota a presença do quartzo e rutilo, este último constatado apenas na amostra natural.

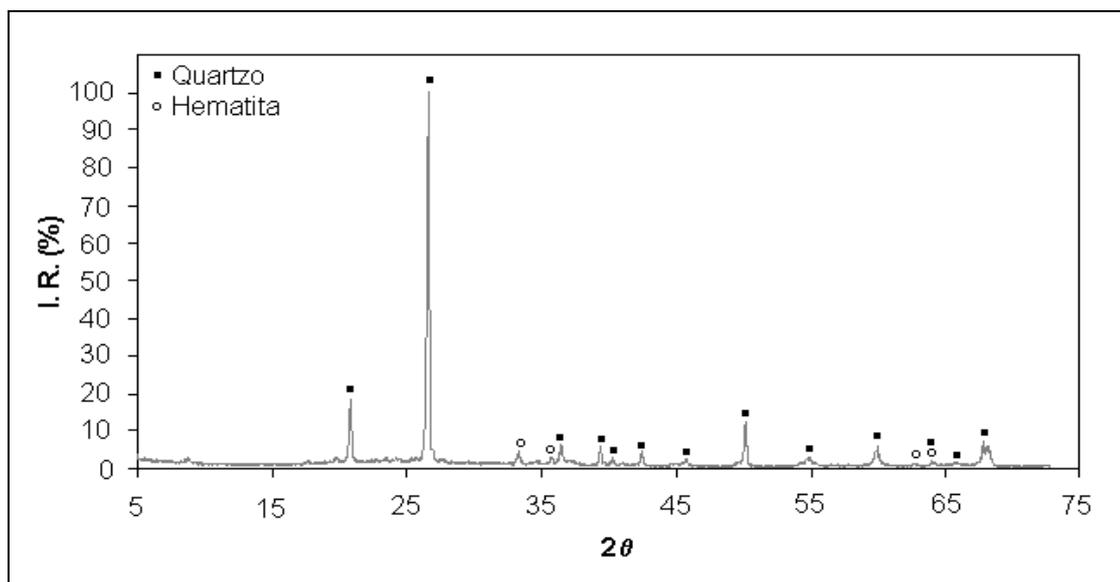


Figura 5.12 - Difratograma da chamota utilizando-se o método da amostra não orientada.

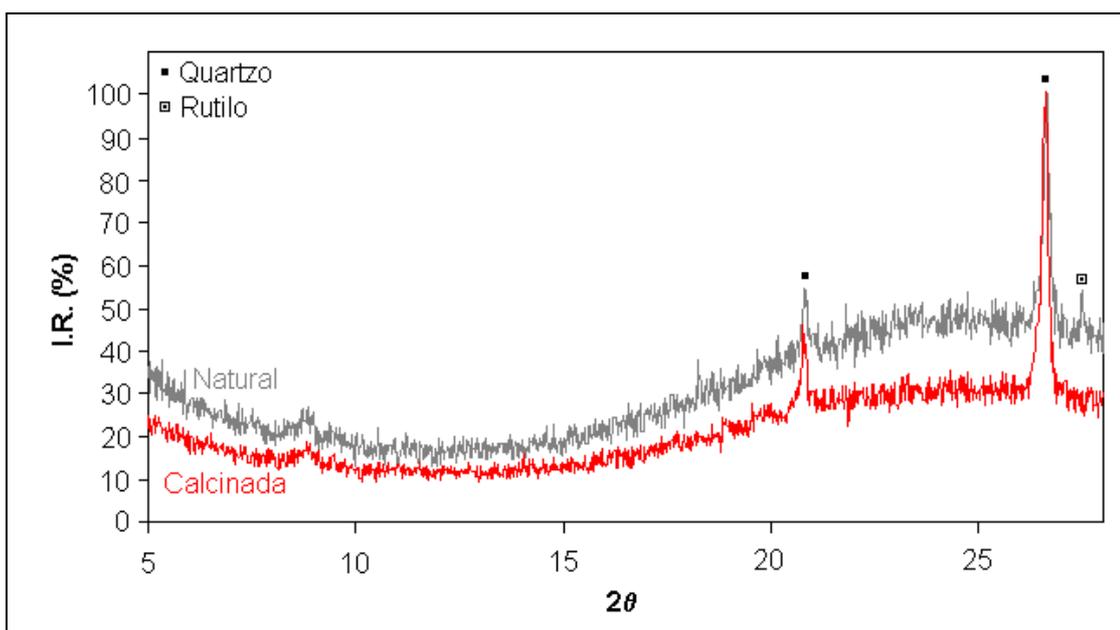


Figura 5.13 - Difratogramas da chamota, fração argila, obtido pelo método da amostra orientada: chamota natural e calcinada (2 horas a 500°C).

5.3.2.2 Propriedades físicas

Para a determinação das propriedades físicas da chamota, foram realizados ensaios de análise granulométrica, termodilatométrica, bem como densidade real e área superficial específica.

i) Análise granulométrica. A Figura 5.14 apresenta a distribuição granulométrica da chamota após moagem por 8 horas e peneiramento (malha 20 – 833 μm). Observa-se que 10% das partículas passam pela peneira 2,04 μm ; 50% das partículas passam pela peneira 124,5 μm e 90% das partículas passam pela peneira 830,5 μm . A determinação da granulometria utilizada foi baseada em dados de referência bibliográfica. Segundo Pracidelli, 1997 e Facincani, 1993, a chamota deve ser utilizada com granulometria entre 80 - 800 μm .

ii) Dilatação térmica linear. A dilatação térmica linear para a chamota foi determinada em um dilatômetro da marca HARROP Toda 726-SC. A Figura 5.15 apresenta essa curva para temperaturas de até 1000°C, com taxa de aquecimento e resfriamento de 150°C/h. Pode-se observar na Figura 5.15, o seu comportamento térmico, cuja inflexão encontra-se a cerca de 570°C, mudando respectivamente o coeficiente de declividade de $1,15 \times 10^{-5}/\text{K}$ para $2,15 \times 10^{-5}/\text{K}$. Como o trabalho limita-se à secagem até 60°C, não houve investigação mais específica para investigar esse ponto de inflexão.

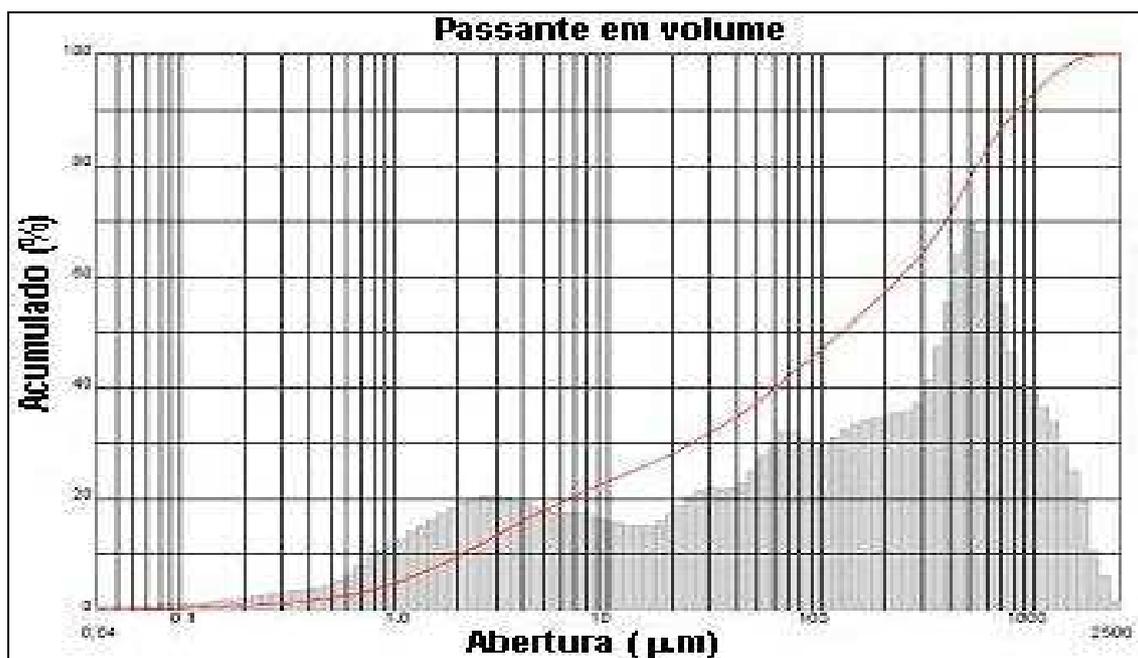


Figura 5.14 - Distribuição granulométrica da chamota.

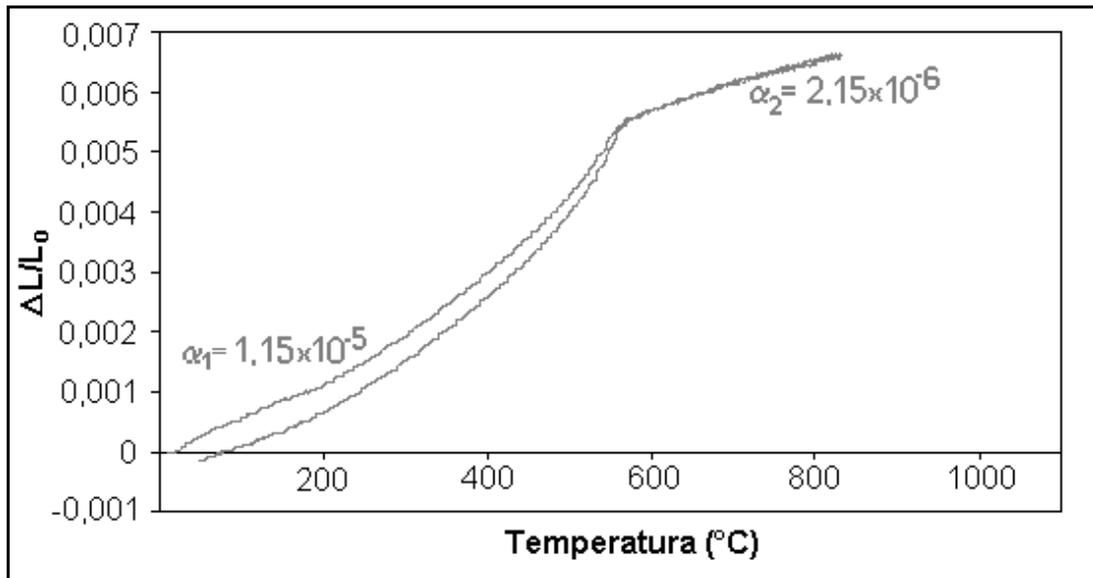


Figura 5.15 - Curva termodilatométrica da massa cerâmica a temperatura máxima de 900°C e taxas de aquecimento e resfriamento de 150° C/h.

iii) Área superficial. O valor de área superficial da chamota foi determinado pelo método BJH (adsorção e dessorção de nitrogênio) no equipamento de marca Quantacrome obtendo-se um resultado de 11,1 m²/g.

5.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

5.4.1 Formulação

A massa cerâmica industrial e a chamota foram preparadas segundo os seguintes procedimentos previstos na Norma ABNT 7181 de 1984:

- Fragmentação;
- Secagem em estufa por 24 horas a temperatura de 105°C;
- Moagem (moinho de bolas) em um período médio de 12 horas;
- Peneiramento por peneira: argila 200# (75µm); chamota 20# (1200 µm).

Com base nos dados da análise granulométrica da massa cerâmica industrial e da chamota, utilizou-se o diagrama de Winkler (Figura 5.16), visando preparar e enquadrar as composições dos corpos-de-prova a serem investigados. As composições enquadraram-se na zona X que indicadas para a fabricação de lajotas (ou telhas).

Os corpos-de-prova foram preparados com diferentes proporções de argila e chamota, conforme Tabela 5.4, contendo respectivamente 0%, 5%, 8% e 10% em peso de chamota adicionado à massa cerâmica, com uma umidade relativa de 40%. Cada composição foi submetida à secagem nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, sendo que foram secados 30 corpos-de-prova (10 lotes ou batelada de secagem com grupo de 3 corpos de prova) para cada uma dessas temperaturas.

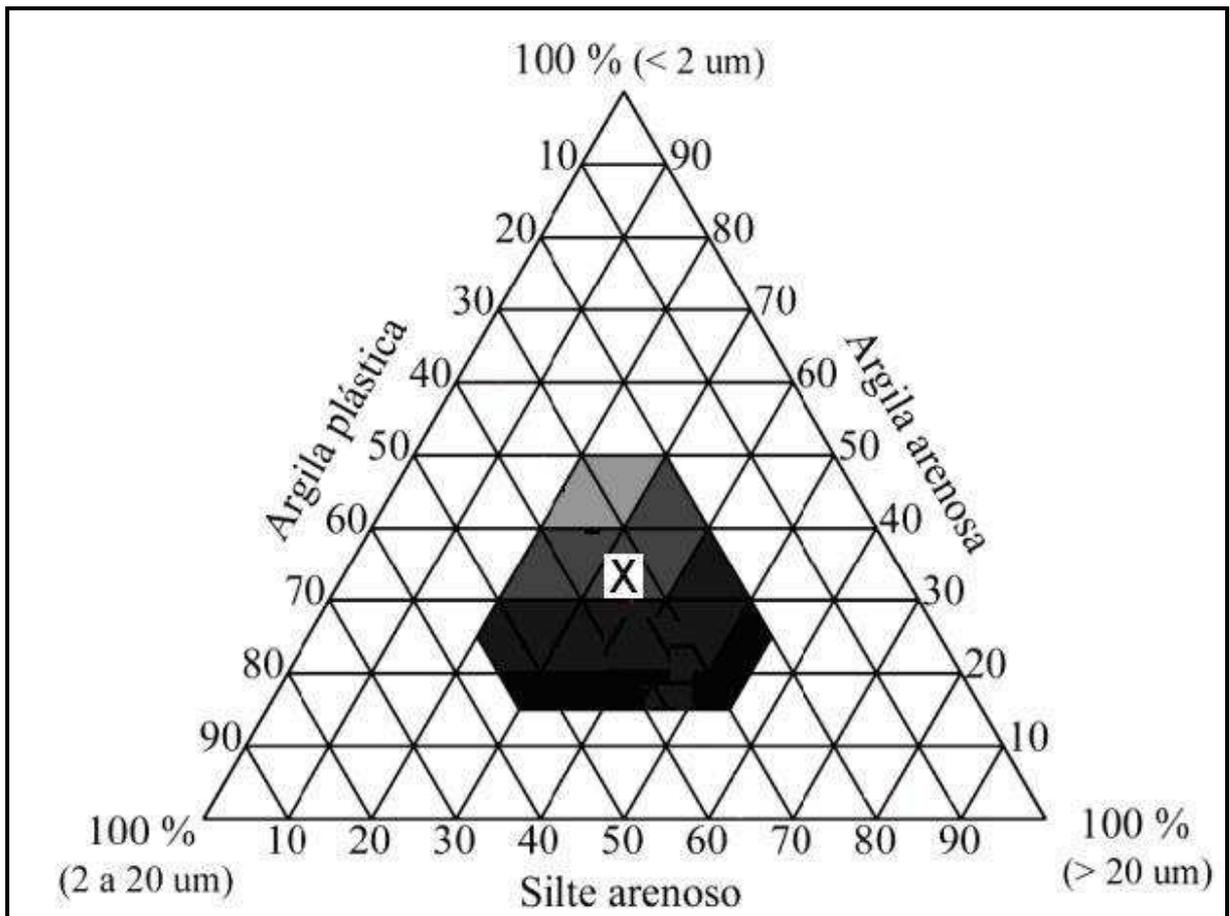


Figura 5.16 - Diagrama de Winkler, caracterizando as zonas com as granulometrias mais apropriadas quando da fabricação de diversos produtos cerâmicos.

Tabela 5.4 - Formulações dos corpos-de-prova investigados.

FORMULAÇÃO % chamota.temperatura	ARGILA (%) em peso	CHAMOTE (%) em peso	TEMPERATUR A (°C)
0.40	100	0	40
0.50	100	0	50
0.60	100	0	60
5.40	95	5	40
5.50	95	5	50
5.60	95	5	60
8.40	92	8	40
8.50	92	8	50
8.60	92	8	60
10.40	90	10	40
10.50	90	10	50
10.60	90	10	60

5.4.2 Caracterização

Os corpos-de-prova foram caracterizados quanto à porosidade e área superficial, utilizando-se um multipicnômetro marca Quantachrome, Assim, uma massa conhecida da amostra foi desgaseificada, e submetida à temperatura de 150°C, com o objetivo de remover possíveis contaminantes que pudessem estar presentes na amostra. Baseando-se na quantificação do nitrogênio absorvido pelo material analisado, chegou-se, através do método de BJH, a valores constantes na Tabela 5.5. Mais detalhes são encontrados e detalhados nos anexo C, D e E.

Tabela 5.5 - Área superficial e porosidade dos corpos-de-prova investigados.

Chamota (%)	Tempo de ensaio (min)	Relação máxima p/p_0	VOLUME (cm ³ /g)	Área Superficial (m ² /g)	Microporos (%)	Mesoporos (%)
0	199,2	1	62	32,73	16,24	83,76
5	197,6	1	58	30,58	14,45	85,55
8	218,6	1	48	28,11	11,08	88,92
10	198,3	1	42	27,63	10,76	89,24

5.4.3 Conformação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram conformados segundo as composições estipuladas na Tabela 5.4, acrescidas da quantidade de umidade composta pelo limite de plasticidade mais 3% acima desse limite em base úmida (Tabela 5.2 – item 5.3.1.3).

A chamota foi adicionada à argila, sendo levado a um misturador (moinho de bolas) por um período de 2 horas. Após essa homogeneização, acrescentou-se aos poucos toda a água de mistura, enquanto se homogeneizava em um misturador de pás. Após, a mistura ficou em repouso por 24 horas no interior de um vasilhame hermeticamente fechado na temperatura ambiente (25°C).

Essas composições foram levadas até a extrusora a vácuo, que funcionou sob uma pressão de 30 kPa e numa velocidade de 21 rotações por minuto, quando então as peças cerâmicas foram extrudadas, e moldadas com dimensões finais de aproximadamente 20x8x90mm³, ficando dessa forma prontas para se submeterem ao processo de secagem. A Figura 5.17 mostra o material cerâmico conformado, após sair da extrusora.



Figura 5.17 - Corpos-de-prova após extrusão.

5.5 ENSAIOS DE SECAGEM

5.5.1 Aquisição dos dados experimentais

O ciclo de secagem experimental utilizava 3 corpos-de-prova para serem secados em batelada, visando à obtenção de melhores resultados em grupo. O ciclo total de secagem teve duração até sua completa estabilidade, ou seja, até o momento onde não mais houvesse perda de massa, sendo que os dados foram coletados e registrados conforme os itens seguintes:

5.5.1.1 Perdas de Massas

As perdas de massa quando da secagem para cada batelada, formada por um grupo de 3 corpos de prova foram registradas em tempo real, a cada 30 segundos, em uma planilha eletrônica (Microsoft® Excel) cujo modelo consta no Anexo H.

5.5.1.2 Temperaturas

Os termopares foram distribuídos no aparato experimental em determinados locais, onde foram aferidas as temperaturas. Essas temperaturas foram registradas em planilhas eletrônicas (Microsoft® Excel), em tempo real, a cada 3 minutos, conforme apresentada no Anexo I.

5.5.1.3 Dimensões dos Corpos-de-prova

Cada corpo-de-prova foi medido em suas três dimensões antes e após o processo de secagem. O modelo de planilha utilizado para o registro das dimensões dos corpos-de-prova para cada conformação encontra-se apresentado no Anexo J.

5.5.2 Aquisição dos dados experimentais

Os dados de cada ensaio de secagem foram armazenados em uma planilha eletrônica (Microsoft® Excel), como a apresentada na Figura 5.18. A partir das informações registradas nessa planilha, foram montados os gráficos para análise da secagem. Atenta-se para o fato que foi destacado e incluído na coleta de dados o período de indução, denominado neste trabalho de período I (a bibliografia tradicional o inclui no período II, por ser de curta duração), continuando o período de

perda de massa constante como período II e o período de perda de massa decrescente como período III.

No exemplo apresentado na planilha da Figura 5.18, os valores foram calculados para o ensaio realizado com um corpo-de-prova de formulação com 5% de chamota, a uma temperatura de 40°C e 40% de umidade relativa.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
	TAXA de secagem (g/min)	cp01-03	cp04-06	cp07-09	cp10-12	cp13-15	cp16-18	cp19-21	cp22-24	cp25-27	cp28-30	Media da perda de Umidade	23,909g	Desvio Padrão	Acima	Abaixo	Porcentagem	
1	0	0.000	-0.077	-0.158	-0.206	-0.06	-0.007	-0.006	-0.083	-0.06	-0.011	-0.097	-0.062	23.909	0.065	0.003	-0.128	100.00
2	0.5	-2.147	-0.042	-0.306	-0.408	-0.279	-0.023	-0.328	-0.147	-0.279	-0.238	-0.271	-0.213	23.759	0.124	-0.088	-0.337	99.37
3	1	-2.976	-0.083	-0.441	-0.619	-0.663	-0.083	-0.406	-0.221	-0.663	-0.753	-0.477	-0.421	23.550	0.244	-0.177	-0.665	98.50
4	1.5	-2.639	-0.124	-0.571	-0.832	-0.982	-0.147	-0.497	-0.317	-0.982	-1.172	-0.662	-0.606	23.365	0.364	-0.242	-0.970	97.73
5	2	-1.865	-0.188	-0.633	-1.158	-1.126	-0.221	-0.6	-0.381	-1.126	-1.461	-0.894	-0.737	23.234	0.439	-0.298	-1.176	97.18
6	2.5	-2.675	-0.22	-0.708	-1.306	-1.276	-0.317	-0.707	-0.507	-1.276	-1.674	-1.632	-0.924	23.047	0.535	-0.389	-1.459	96.39
7	3	-1.700	-0.262	-0.875	-1.441	-1.4	-0.381	-0.821	-0.573	-1.4	-1.956	-1.721	-1.043	22.928	0.581	-0.462	-1.624	95.90
8	3.5	-1.884	-0.319	-0.947	-1.571	-1.534	-0.507	-0.953	-0.701	-1.534	-2.148	-1.934	-1.175	22.796	0.617	-0.558	-1.792	95.34
9	4	-1.927	-0.353	-0.995	-1.733	-1.74	-0.573	-1.084	-0.766	-1.74	-2.388	-2.153	-1.310	22.661	0.692	-0.618	-2.002	94.78
10	4.5	-1.602	-0.394	-1.016	-1.908	-1.825	-0.701	-1.207	-0.898	-1.825	-2.626	-2.31	-1.422	22.549	0.733	-0.689	-2.156	94.31
11	5	-1.651	-0.452	-1.131	-2.175	-1.962	-0.766	-1.371	-0.943	-1.962	-2.819	-2.437	-1.538	22.433	0.782	-0.757	-2.320	93.83
12	5.5	-1.410	-0.51	-1.158	-2.347	-2.071	-0.898	-1.478	-1.024	-2.071	-2.982	-2.54	-1.637	22.334	0.810	-0.827	-2.447	93.41
13	6	-1.253	-0.567	-1.3	-2.495	-2.137	-0.943	-1.59	-1.111	-2.137	-3.14	-2.597	-1.725	22.246	0.828	-0.897	-2.552	93.05
14	6.5	-1.113	-0.605	-1.425	-2.616	-2.212	-1.024	-1.679	-1.163	-2.212	-3.286	-2.618	-1.803	22.168	0.843	-0.959	-2.646	92.72
15	7	-1.170	-0.656	-1.57	-2.731	-2.251	-1.111	-1.781	-1.215	-2.251	-3.462	-2.665	-1.885	22.086	0.861	-1.023	-2.746	92.38
16	7.5	-1.140	-0.701	-1.695	-2.858	-2.293	-1.163	-1.94	-1.272	-2.293	-3.627	-2.697	-1.965	22.007	0.884	-1.081	-2.848	92.04
17	8	-1.167	-0.752	-1.826	-3	-2.339	-1.215	-2.043	-1.372	-2.339	-3.784	-2.747	-2.046	21.925	0.905	-1.141	-2.951	91.70
18	8.5	-0.970	-0.801	-1.958	-3.125	-2.38	-1.272	-2.094	-1.418	-2.38	-3.938	-2.788	-2.114	21.857	0.930	-1.184	-3.044	91.42
19	9	-1.204	-0.844	-2.122	-3.27	-2.444	-1.372	-2.192	-1.468	-2.444	-4.124	-2.778	-2.199	21.772	0.958	-1.241	-3.156	91.06
20	9.5	-1.074	-0.891	-2.303	-3.395	-2.497	-1.418	-2.284	-1.517	-2.497	-4.26	-2.798	-2.274	21.697	0.981	-1.292	-3.255	90.75
21	10	-1.123	-0.937	-2.487	-3.526	-2.544	-1.468	-2.371	-1.574	-2.544	-4.426	-2.822	-2.353	21.619	1.013	-1.339	-3.366	90.42
22	10.5	-0.891	-0.976	-2.673	-3.958	-2.581	-1.517	-2.449	-1.618	-2.581	-4.51	-2.83	-2.415	21.556	1.072	-1.343	-3.487	90.16
23	11	-1.081	-1.014	-2.85	-4.122	-2.634	-1.574	-2.533	-1.671	-2.634	-4.653	-2.854	-2.491	21.480	1.109	-1.382	-3.600	89.84
24	11.5	-1.048	-1.071	-3.04	-4.303	-2.673	-1.618	-2.633	-1.73	-2.673	-4.784	-2.856	-2.564	21.407	1.145	-1.419	-3.710	89.53
25	12	-0.761	-1.138	-3.209	-4.487	-2.702	-1.671	-2.663	-1.779	-2.702	-4.826	-2.868	-2.618	21.354	1.166	-1.451	-3.784	89.31
26	12.5	-0.774	-1.194	-3.335	-4.673	-2.74	-1.73	-2.78	-1.839	-2.74	-4.834	-2.854	-2.672	21.299	1.180	-1.491	-3.852	89.09
27	13	-0.833	-1.228	-3.434	-4.85	-2.756	-1.779	-2.945	-1.892	-2.756	-4.904	-2.877	-2.730	21.241	1.211	-1.519	-3.941	88.84

Figura 5.18 - Modelo de planilha eletrônica (Microsoft® Excel), onde foram registrados os valores das perdas de massa dos 30 corpos-de-prova ensaiados para a formulação 5.40 (massa cerâmica com 5% de chamota e temperatura de secagem de 40°C).

Pela Figura 5.18, pode-se descrever o conteúdo de informações como segue:

- i) Coluna A: tempo de coleta feita a cada 0,5 minutos (30 segundos);

- ii) Coluna *B*: taxa ou velocidade de perda de massa, ou seja, relação entre a variação média das massas (coluna *N*) pela variação do tempo (Coluna *A*);
- iii) Colunas *C* a *L*: Perda de massa dos corpos-de-prova submetidos ao ciclo de secagem. Cada coluna representa perda de massa de 3 corpos-de-prova;
- iv) Coluna *M*: Média das perdas de massa dos corpos-de-prova, calculada entre as colunas *C* a *L*, excluindo-se os valores expúrios;
- v) Coluna *N*: Ordem decrescente das médias apresentadas na coluna *M*;
- vi) Colunas *O*, *P* e *Q*: Contêm valores referentes ao desvio padrão e seus limites: superior e inferior, respectivamente, em torno da média dos corpos-de-prova;
- vii) Coluna *R*: Variação Percentual da média das perdas de massa dos corpos-de-prova;

5.5.3 Determinação da resistência mecânica

A resistência mecânica dos corpos cerâmicos foi determinada por flexão a quatro pontos, logo após terem sido submetidos ao processo de secagem. Para a aferição da resistência mecânica, foi utilizada a prensa hidráulica (máquina ATS modelo 1105C) com velocidade de avanço de 0,0002 mm/s. As amostras foram submetidas à flexão a quatro pontos até o rompimento. O anexo F mostra o detalhe desse processo na prensa hidráulica.

Os corpos-de-prova foram posicionados na máquina de ensaios e sofreram um aumento de carga até o seu rompimento. A carga máxima atingida no rompimento da peça C_{\max} foi registrada para obtenção da tensão de ruptura σ_f segundo a Equação 5.1, onde as variáveis encontram-se destacadas na Figura 5.19.

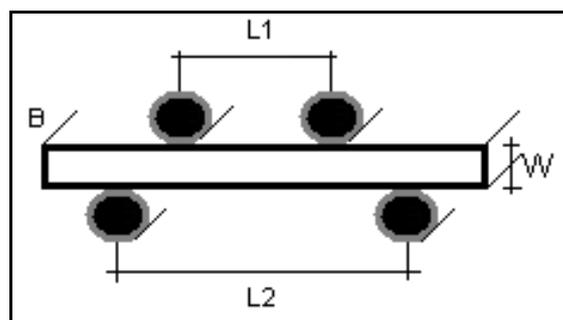


Figura 5.19 - Detalhe do corpo-de-prova submetido ao ensaio de flexão a quatro pontos, cujas dimensões fazem parte da fórmula representada na Equação 5.1.

$$\sigma_f = \frac{3 C_{\max} \cdot (L_2 - L_1)}{2 B \cdot W^2} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde:

C_{\max} - Carga máxima registrada na prensa;

B – Largura do corpo-de-prova;

W – Espessura do corpo-de-prova;

$(L_2 - L_1)$ - Diferença entre os comprimentos de apoio do corpo-de-prova e atuação da carga de flexão.

5.5.3.1 Tratamento Estatístico dos Resultados de Resistência Mecânica

A natureza aleatória dos defeitos presentes em materiais cerâmicos faz com que se tenha uma incerteza nas medidas de suas propriedades, em especial a resistência mecânica. Medidas de resistência mecânica de uma série de corpos-de-prova cerâmico idênticos produzem resultados com considerável dispersão. Esse comportamento pode ser explicado como uma consequência da flutuação de tamanho do defeito controlador. A existência desta dispersão tem consequências importantes em Engenharia. Primeiramente, a resistência mecânica que poderá ser usada em um projeto com segurança será menor que a resistência média medida deste material. Além disso, a probabilidade de falha de uma amostra em escala é maior que a de uma amostra pequena sob a mesma tensão, pois aumenta a probabilidade de um defeito crítico em um volume maior. Portanto, é importante ter meios de descrever estes efeitos quantitativamente e incorporá-los a um método de projeto para aumentar a sua segurança. As distribuições estatísticas oferecem tais meios.

Entre as distribuições estatísticas que descrevem o fenômeno destaca-se a distribuição de Weibull como uma resposta mais apropriada para pequenos valores de resistência mecânica e contém um termo de dependência do volume que permite seu uso em amostras de volumes variáveis.

O tratamento baseia-se no modelo análogo ao do elo mais fraco de uma corrente, onde a resistência mecânica como um todo será igual ao do elo mais fraco (região que contém a falha crítica). Weibull propôs ainda uma função empírica de distribuição de probabilidade de falhas e obteve a expressão para a probabilidade de fratura acumulada, conhecida como Distribuição de Weibull, segundo a Equação 5.2.

$$F = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

Equação 5.2

onde F é a probabilidade de fratura, σ é a tensão de ruptura, σ_0 é a constante de normalização correspondente à tensão cuja probabilidade de falha é 63,2% e m o módulo ou parâmetro de Weibull. O coeficiente m é adimensional e fornece uma avaliação da homogeneidade do material e conseqüentemente, da dispersão de seus valores de resistência e de sua confiabilidade. A expressão acima pode ser linearizada para a obtenção das constantes m e σ_0 , obtendo-se assim a Equação 5.3:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F_j}\right)\right] = m \cdot \ln \sigma_j - m \cdot \ln \sigma_0$$

Equação 5.3

Em que o índice j , variando de um a N , representa a localização da j -ésima tensão quando estas estão ordenadas em ordem crescente. No ensaio, se conhece a tensão de ruptura de cada um dos N corpos-de-prova da amostra, isto é σ_j . A probabilidade de fratura acumulada foi estimada pelo fator estimador dado por $F_j = (j - 0,5) / N$. Assim, a função expressa na Equação 5.3 pode ser facilmente plotada em um gráfico $\ln[\ln(1/1-F_j)]$ versus $\ln \sigma_j$, onde os parâmetros m e σ_0 são determinados por um método de regressão. A tensão média (Equação 5.4) é definida como sendo aquela na qual a probabilidade de ruptura é de 50% e é também o valor geralmente reportado na literatura como sendo a medida de resistência da amostra ensaiada.

$$\sigma_{50} = \sigma_0 \cdot \left(-\ln \frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{m}}$$

Equação 5.4

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 SECAGEM DA MASSA CERÂMICA SEM CHAMOTA

6.1.1 Secagem nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C

Os gráficos na Figura 6.1, 6.2 e 6.3 mostram as perdas de massa dos corpos-de-prova da massa cerâmica sem chamota, submetidos ao processo de secagem nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, em função do tempo de secagem. Nos itens “a” dessas figuras, são apresentadas as curvas de todos os corpos-de-prova submetidos ao processo de secagem, bem como as curvas de limite superior e inferior, resultantes da média do desvio padrão dessas curvas. Já em seus itens “b”, tem-se a média das curvas apresentadas em seus itens “a”, excluídas as linhas fora das curvas de desvio padrão, pois foram consideradas como valores espúrios.

A partir dessas informações, juntamente com a expressão da Equação 4.8, foram obtidas as velocidades de secagem para as médias desses corpos cerâmicos, cujos gráficos encontram-se apresentados nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6. Essas figuras apresentam as velocidades de secagem com valores acumulados a cada momento (três minutos), considerando a área total de exposição ao ambiente de secagem e a quantidade de umidade da massa cerâmica.

Nota-se nessas figuras as três declividades que representam as três fases de secagem (I, II e III), representando assim as diferentes velocidades de perda de massa durante todo o processo de secagem. Observa-se ainda que cada fase pode ser representada por uma equação de regressão linear do tipo retilínea (fases I e II) ou do tipo logarítmica (fase III).

Como o processo de secagem baseia-se principalmente na segunda fase de secagem, que relata o período de perda de massa constante e visando a obtenção da umidade crítica de secagem, conforme descrito pelas curvas de Bigot, trabalhou-se especificamente nessa fase, obtendo-se os gráficos das Figuras 6.7, 6.8 e 6.9.

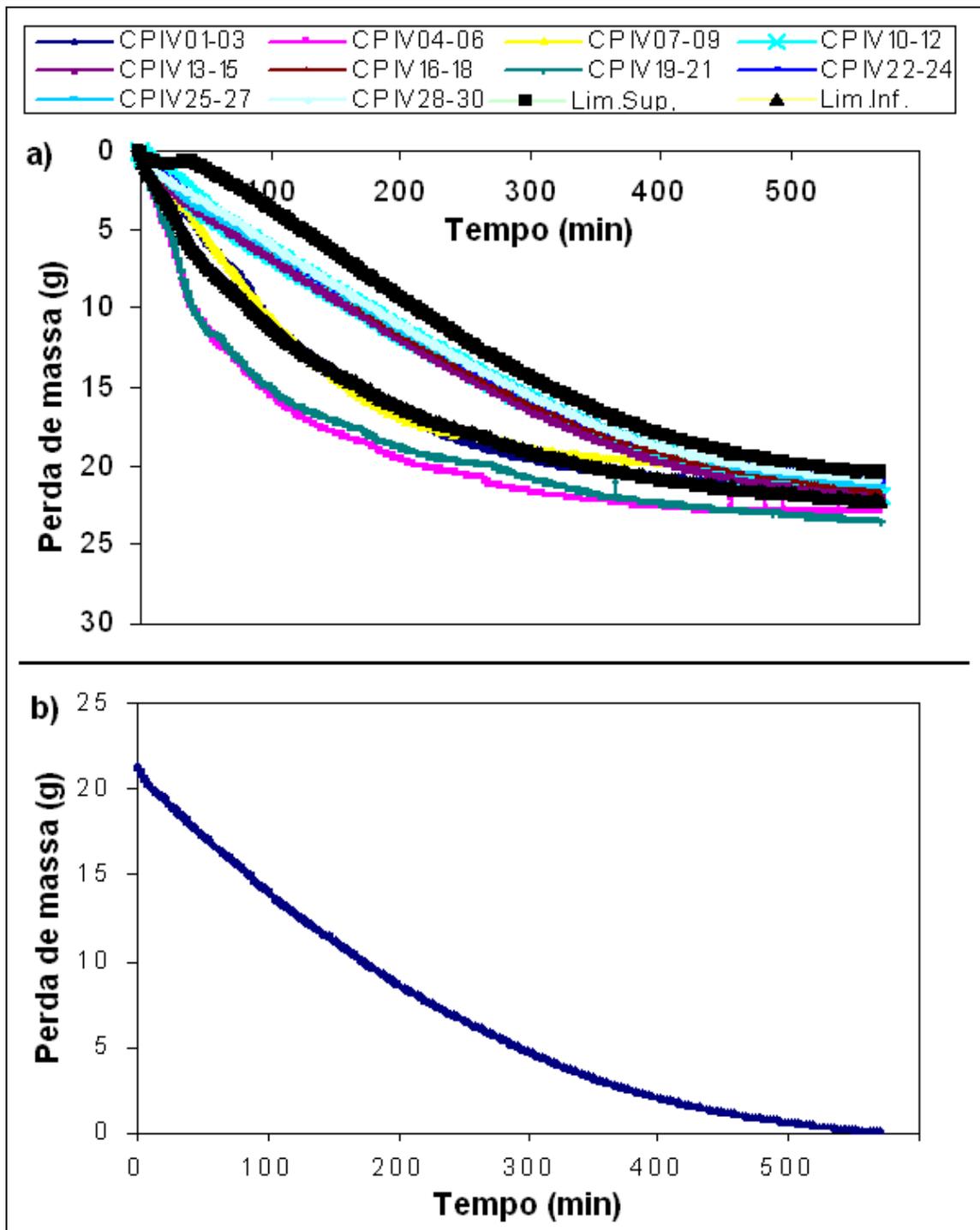


Figura 6.1 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica mica sem chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

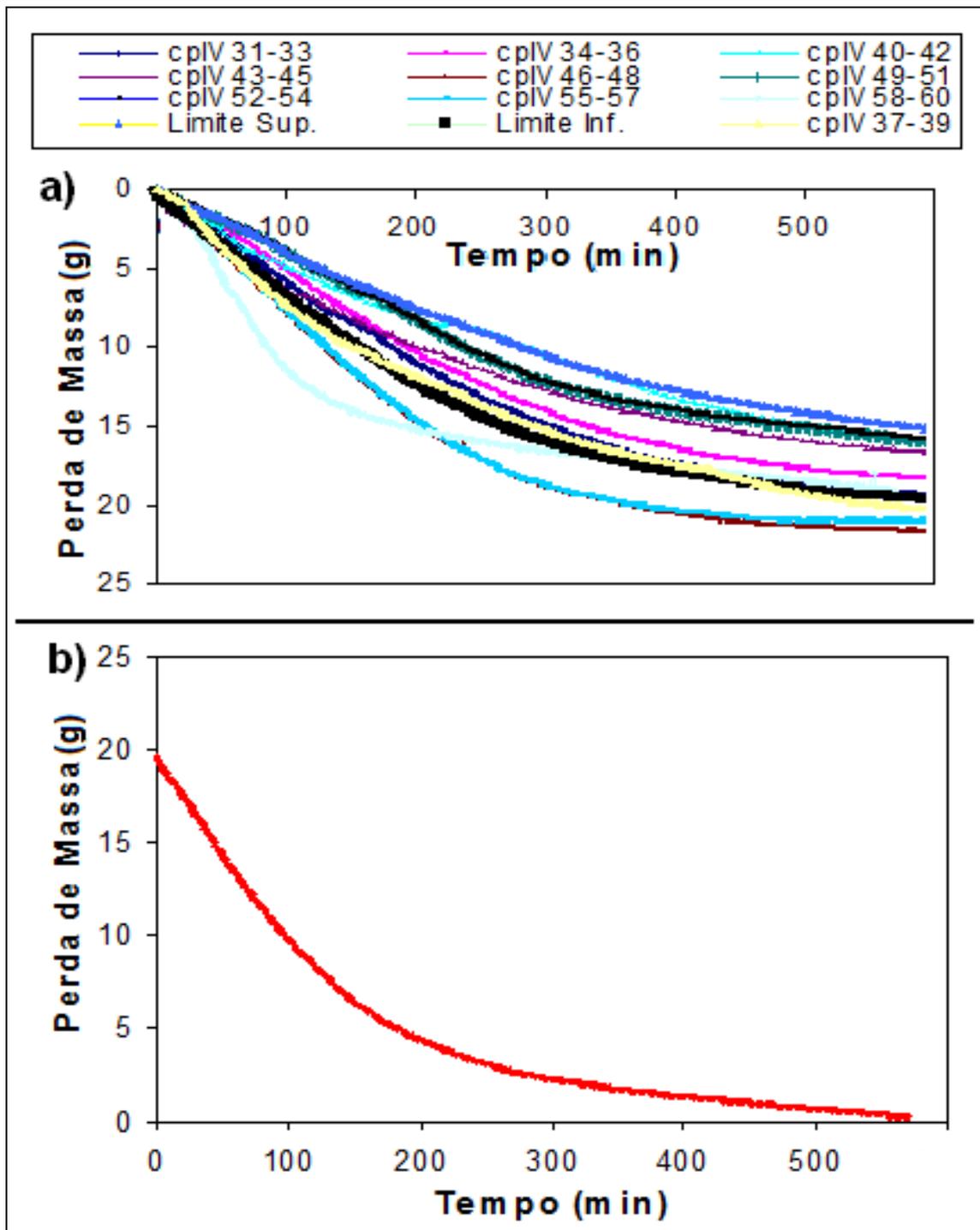


Figura 6.2 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica mica sem chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

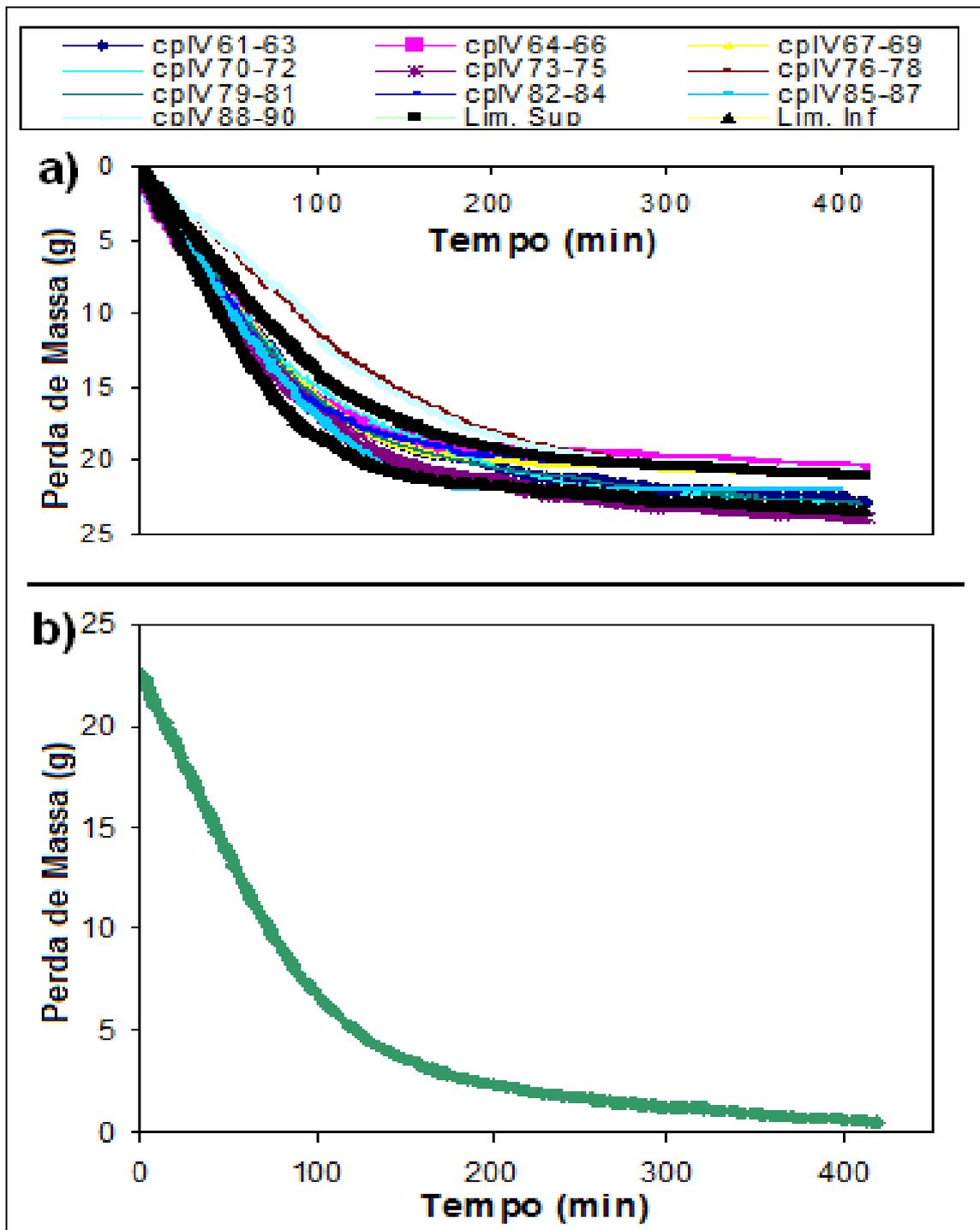


Figura 6.3 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica mica sem chamota. a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

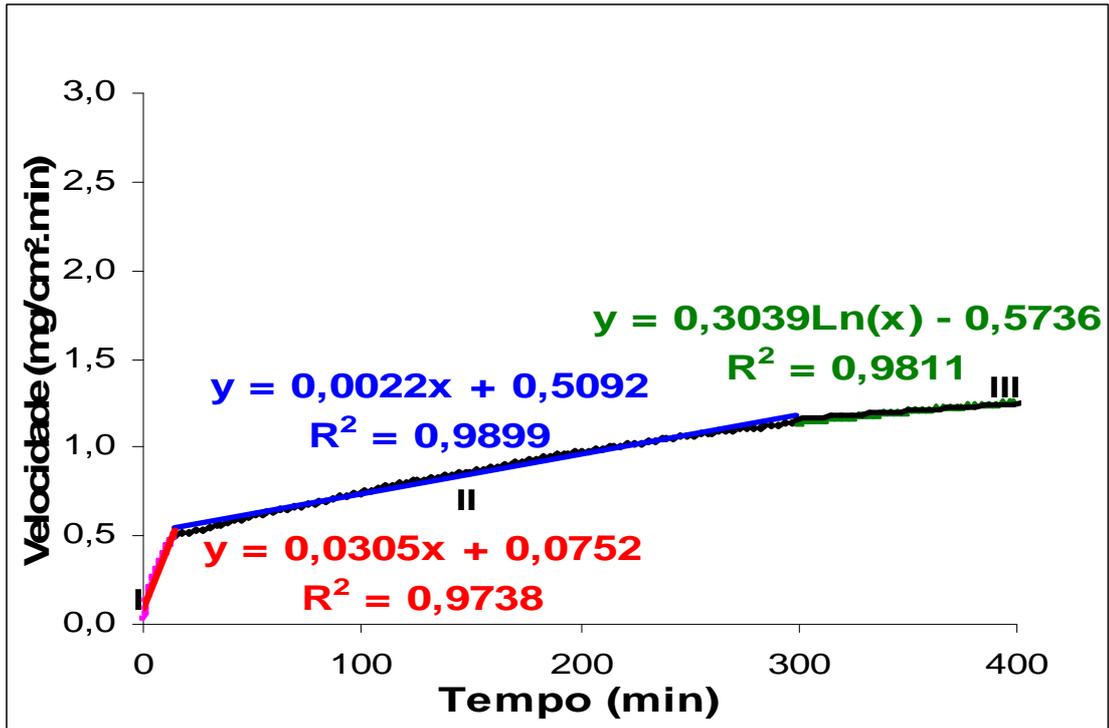


Figura 6.4 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica sem chamota e suas respectivas equações de regressão linear.

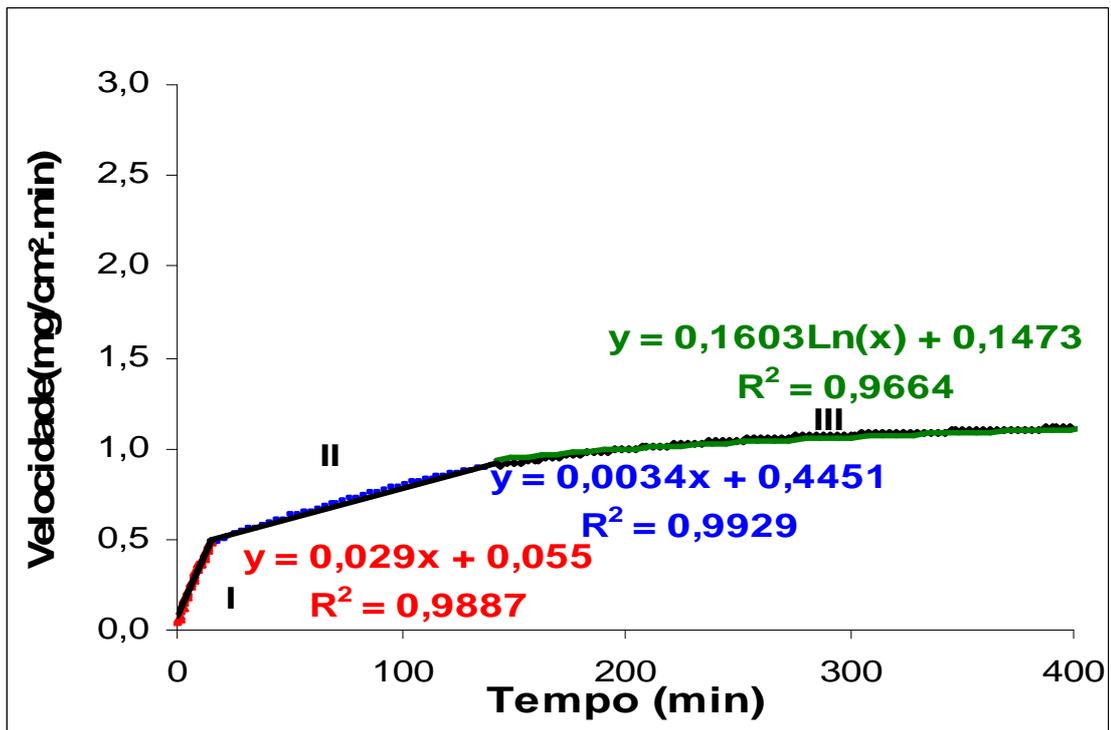


Figura 6.5 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica sem chamota e suas respectivas equações de regressão linear.

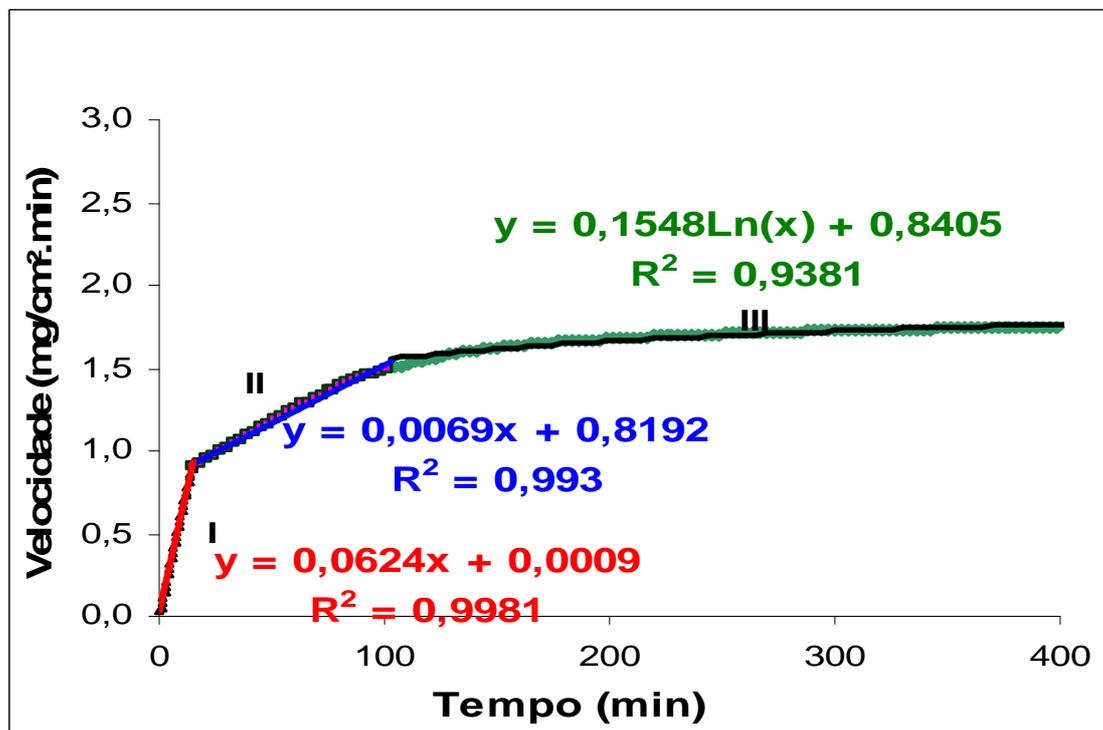


Figura 6.6 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica sem chamota e suas respectivas equações de regressão linear.

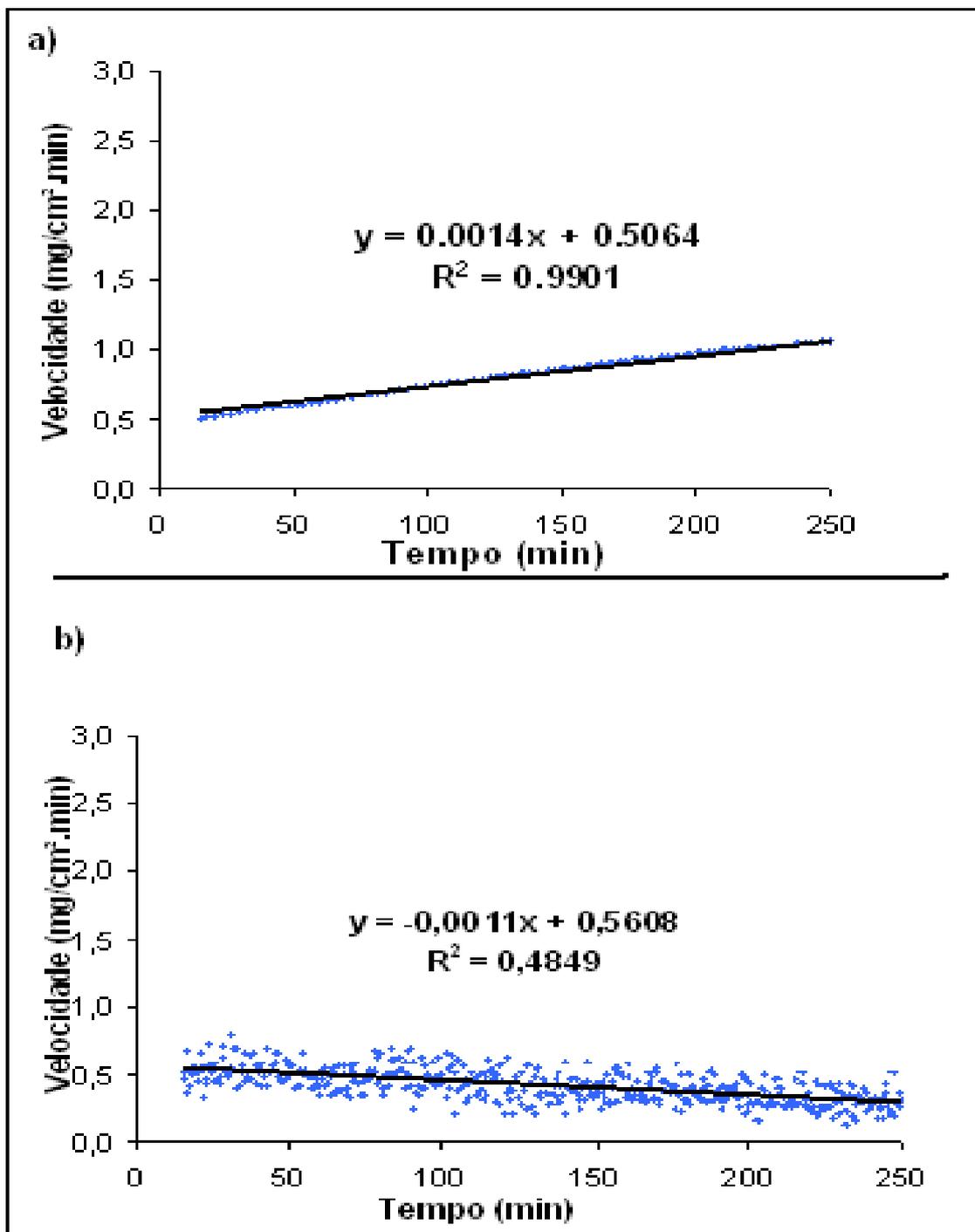


Figura 6.7 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica sem chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

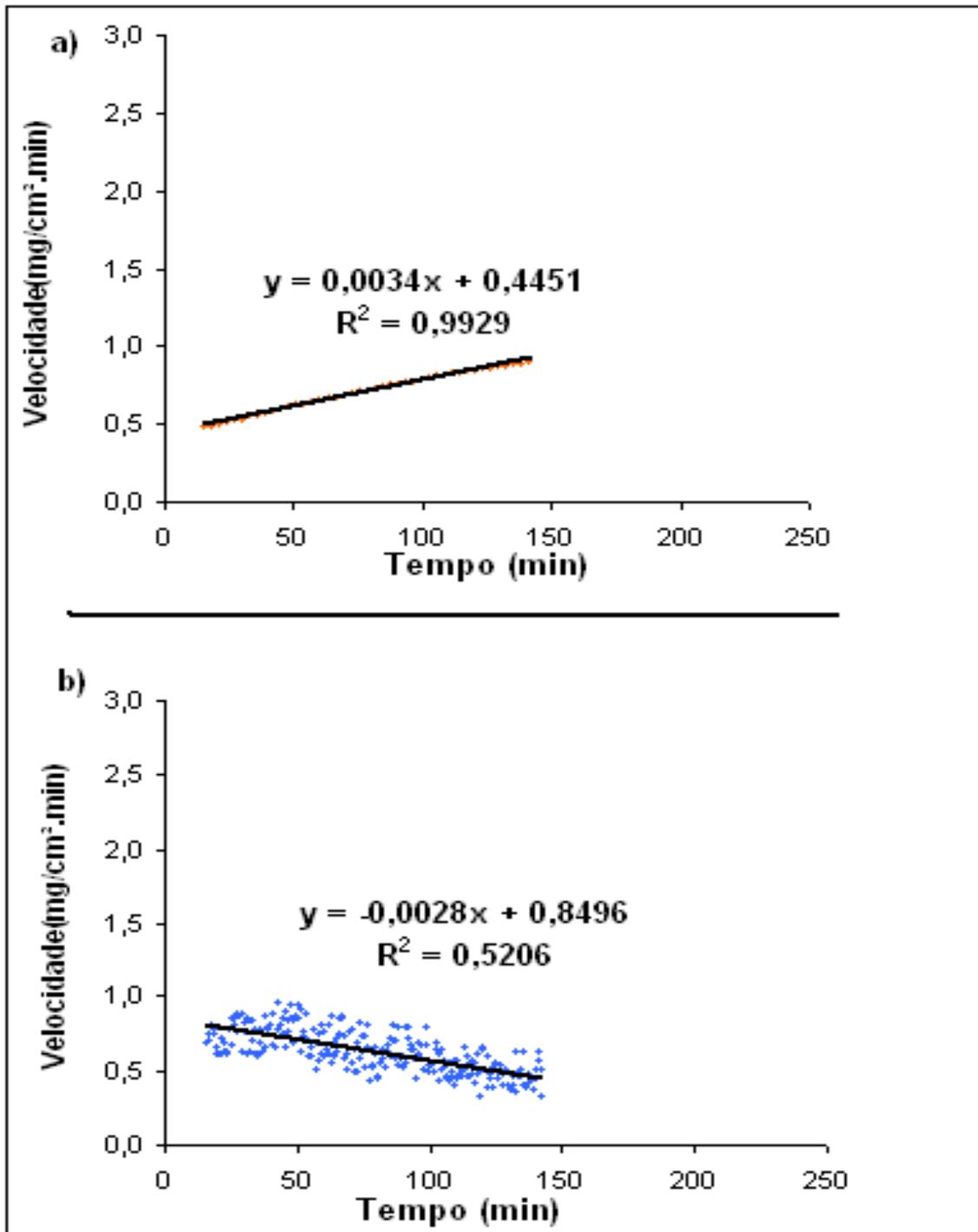


Figura 6.8 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica sem cham ota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

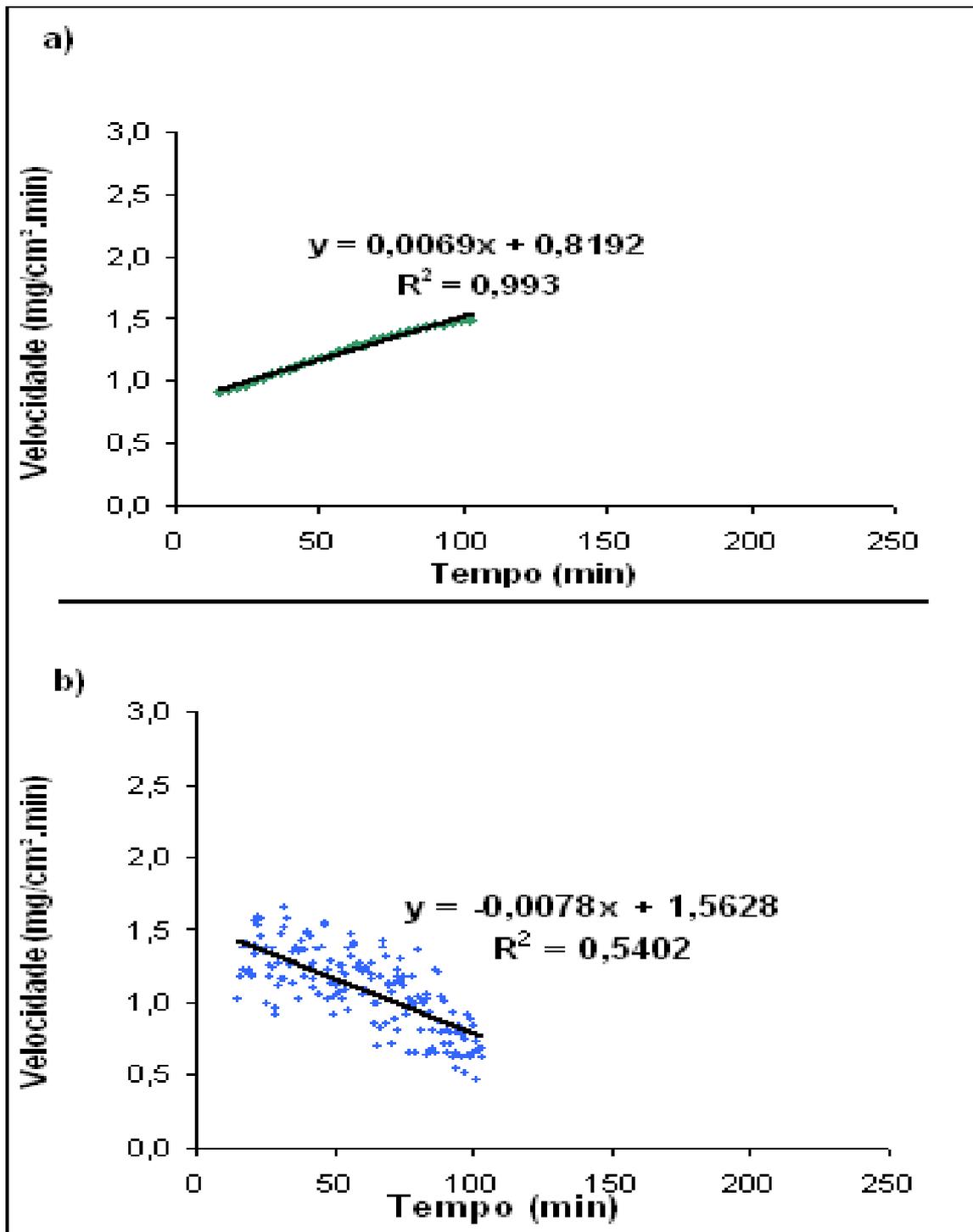


Figura 6.9 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica sem chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

Para o cálculo dos limites da fase II de secagem (velocidade acumulada a cada 3 minutos – itens “a” das Figuras 6.7, 6.8 e 6.9), com as fases vizinhas (I e III), fez-se uma regressão linear, através da equação da reta, avaliando-se o fator estatístico de correlação dos dados (R^2), tendo-se o cuidado para que à medida que se aumentasse o intervalo dessa fase, esse fator se mantivesse em torno de 0,99, o que implicaria em pequena dispersão dos dados em relação a sua média. Uma vez satisfeita essa condição, definiram-se as coordenadas dos valores correspondentes ao tempo e à massa que delimitam esse intervalo.

Para o cálculo das velocidades instantâneas, refinou-se a malha de cálculo, diminuindo-se o intervalo de tempo de 3 minutos para 30 segundos e aplicou-se novamente a Equação 4.8, chegando-se aos valores de velocidade apresentados no item “b” dessas figuras. Constatou-se que a velocidade instantânea diminui de forma uniforme e linear em função do tempo, segundo a linha de tendência caracterizada pela equação da reta. Para a previsão do tempo de secagem, foram calculadas as velocidades médias nesses intervalos de fase II, obtendo-se assim um patamar de velocidade constante e característico, conforme mostrado na Figura 4.19 (BARBA, 1997).

6.1.2 Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C

O gráfico da Figura 6.10 faz uma comparação da perda de massa através da umidade remanescente na massa cerâmica sem chamota, em função do tempo de secagem, para as diferentes temperaturas de secagem praticadas (40°C, 50°C e 60°C), mantendo-se constante as demais características psicrométricas. Pode-se notar que o teor de umidade remanescente na temperatura de 60°C, foi menor que para a temperatura de 50°C, que por sua vez foi menor que para temperatura de 40°C. Isso pode ser explicado pelo aumento da entalpia do ar, que por sua vez aumenta a temperatura no interior da massa cerâmica, ocasionando uma saída da água com maior intensidade.

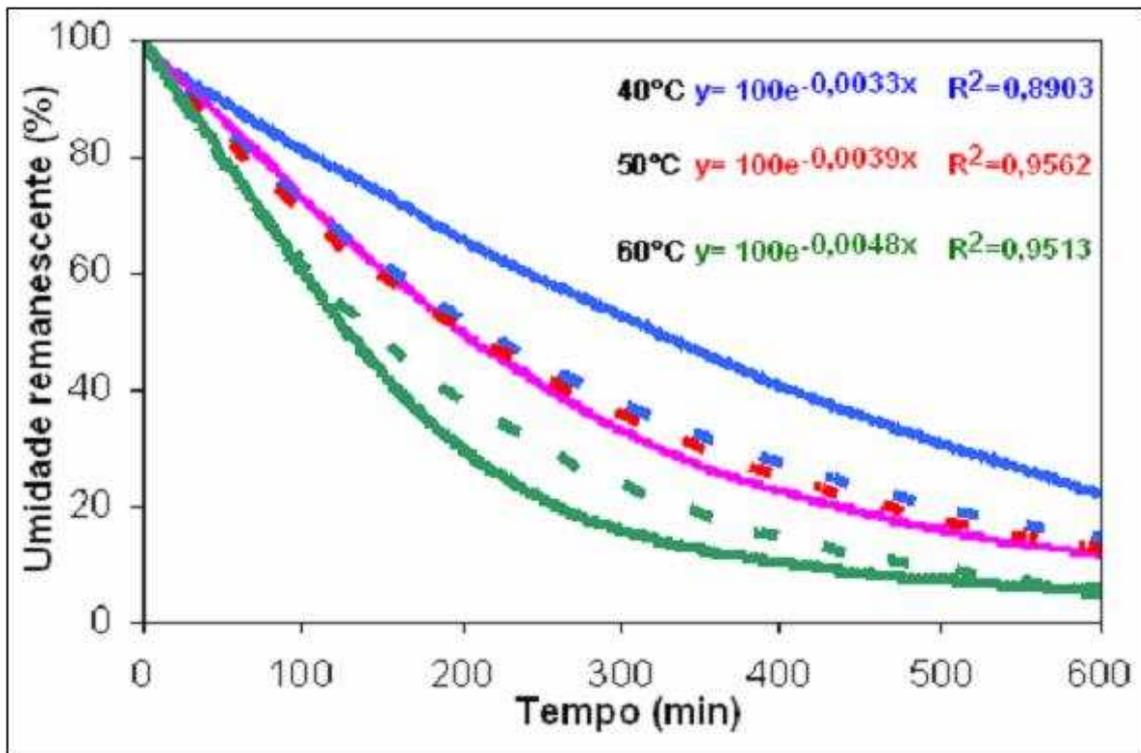


Figura 6.10 - Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas sem chamota, submetidas à secagem a 40°C, 50°C e 60°C.

De outra maneira, a Figura 6.11 apresenta uma comparação entre as velocidades “instantâneas” de secagem em relação ao tempo, para os corpos cerâmicos sem chamota na massa cerâmica, quando submetidos às temperaturas de secagem de 40°C, 50°C e 60°C. Nota-se que se atinge maiores velocidades de perda de massa quando submetidos às maiores temperaturas de secagem. Nota-se ainda que mantendo-se na mesma temperatura, 40°C, 50°C ou 60°C, a velocidade de secagem tende a diminuir linearmente com o tempo, sendo que a velocidade diminui mais drasticamente ao longo do tempo, para as maiores temperaturas de secagem (maior declividade das retas), cujo final da fase atinge-se em um menor período de tempo.

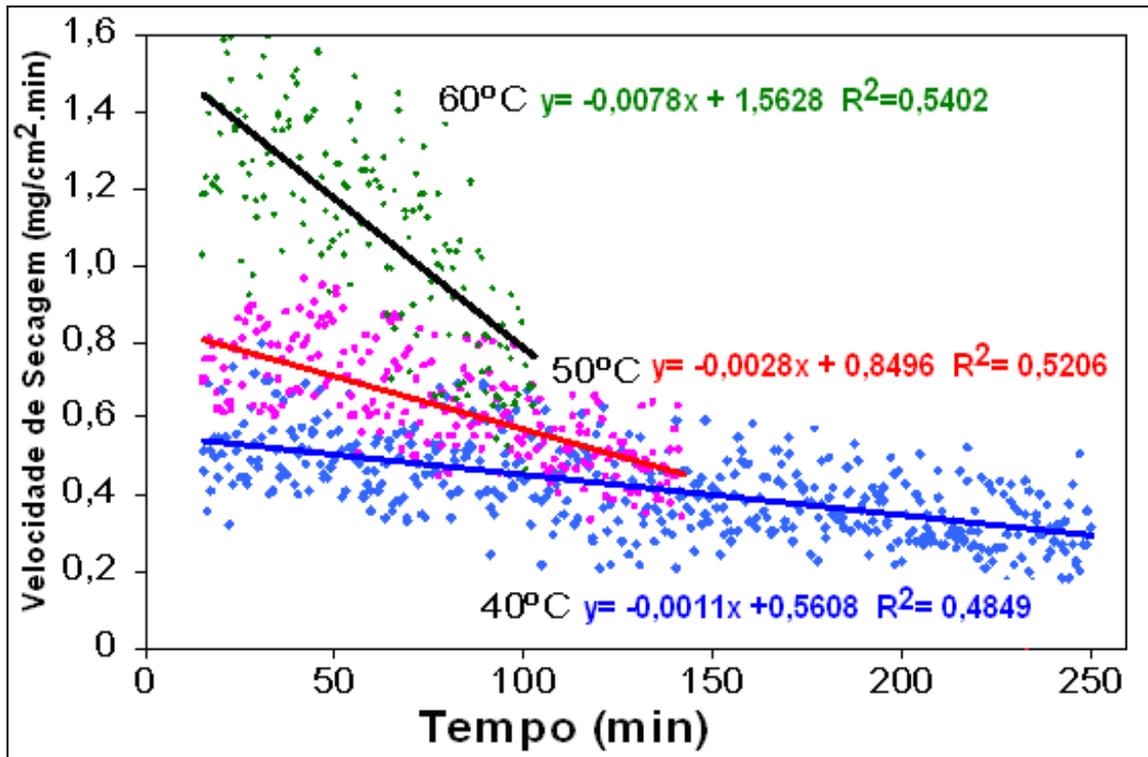


Figura 6.11 - Comparação entre as velocidades de perdas de massa “instantânea” em função do tempo de secagem para argila com 0% de chamota nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

6.2 SECAGEM DA MASSA CERÂMICA COM 5% DE CHAMOTA

6.2.1 Secagem a 40°C

Os gráficos na Figura 6.12, 6.13 e 6.14 mostram as perdas de massa dos corpos-de-prova da massa cerâmica com 5% de chamota, submetidos ao processo de secagem nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, em função do tempo de secagem. Nos itens “a” dessas figuras, são apresentadas as curvas de todos os corpos-de-prova submetidos ao processo de secagem, bem como as curvas de limite superior e inferior, resultantes da média do desvio padrão dessas curvas. Já em seus itens “b”, tem-se a média das curvas apresentadas em seus itens “a”, excluindo as linhas fora das curvas de desvio padrão, pois foram consideradas como valores espúrios.

Essas informações somadas com a expressão da Equação 4.8, possibilitaram a obtenção das velocidades de secagem para as médias desses corpos cerâmicos, cujos gráficos encontram-se apresentados nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17, que apresentam as velocidades de secagem com valores acumulados a cada momento (três minutos), onde se observam as três declividades que representam as três fases de secagem (I, II e III), representando assim as diferentes velocidades de perda de massa durante todo o processo de secagem. Observa-se ainda que cada fase pode ser representada por uma equação de regressão linear do tipo retilínea (fases I e II) ou do tipo logarítmica (fase III).

Como o processo de secagem dá ênfase à segunda fase que relata o período de perda de massa constante e visando a obtenção da umidade crítica de secagem, conforme descrito pelas curvas de Bigot, trabalhou-se especificamente nessa fase, obtendo-se os gráficos das Figuras 6.18, 6.19 e 6.20.

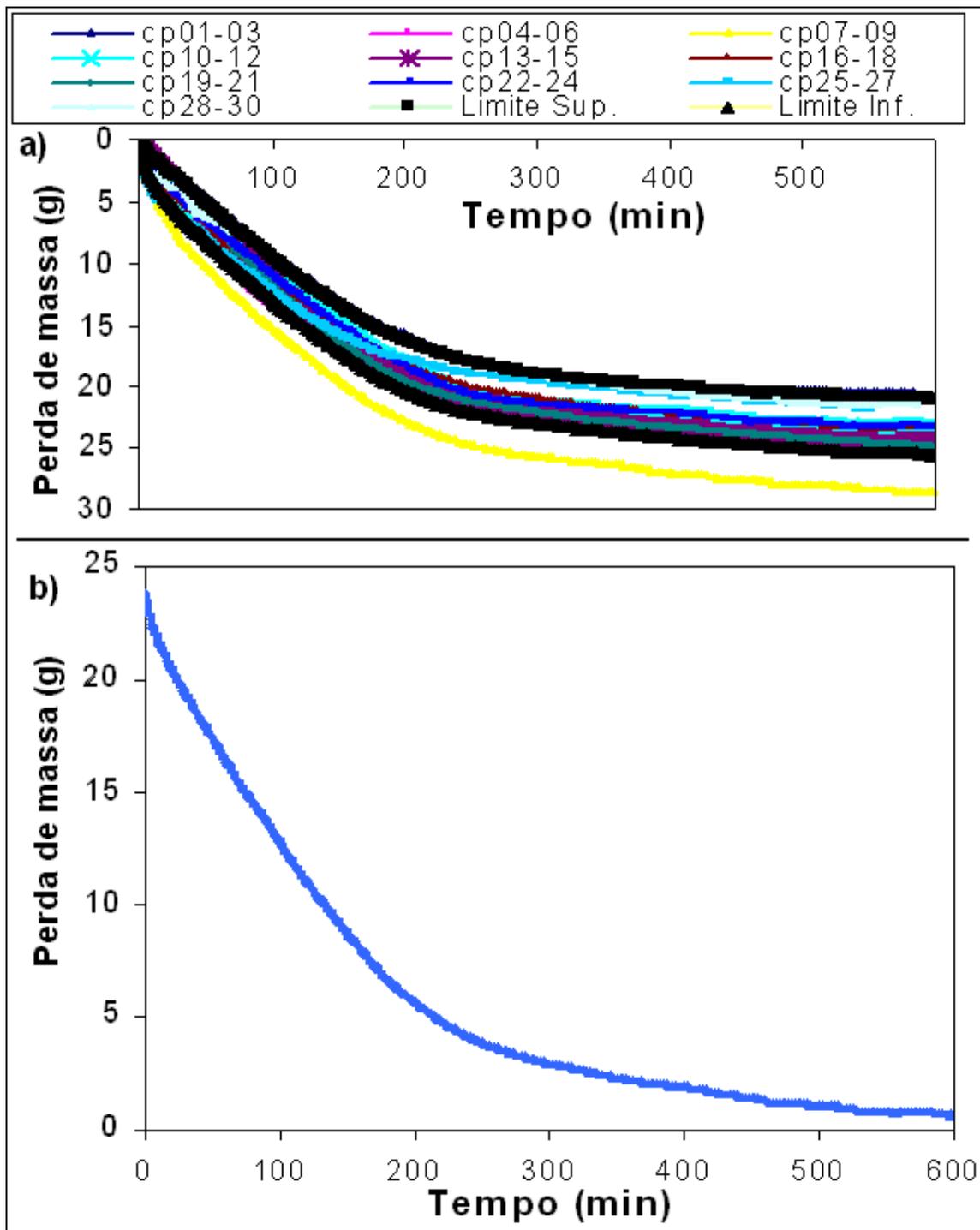


Figura 6.12 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 5% de chamota.
a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

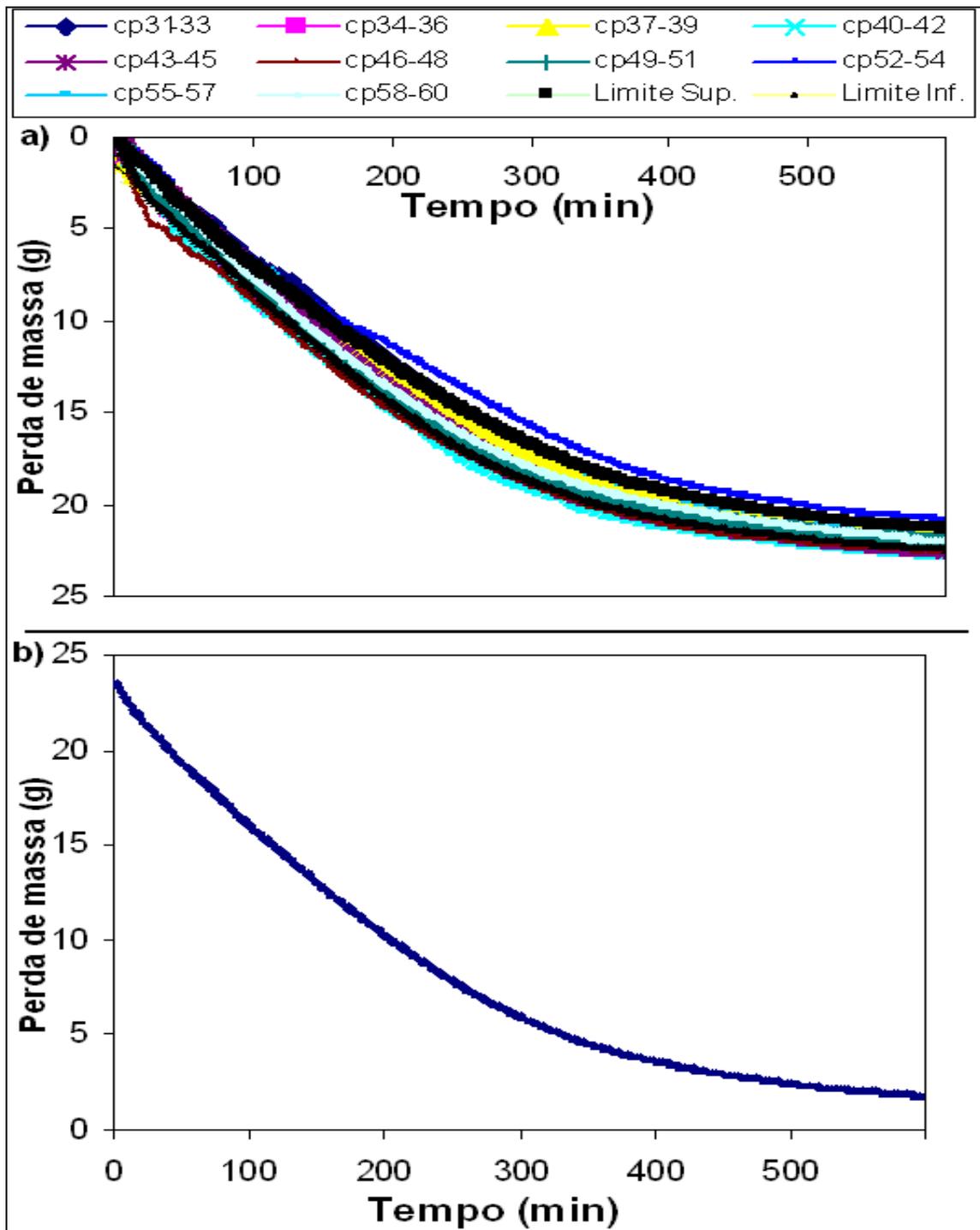


Figura 6.13 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 5% de chamota.
a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

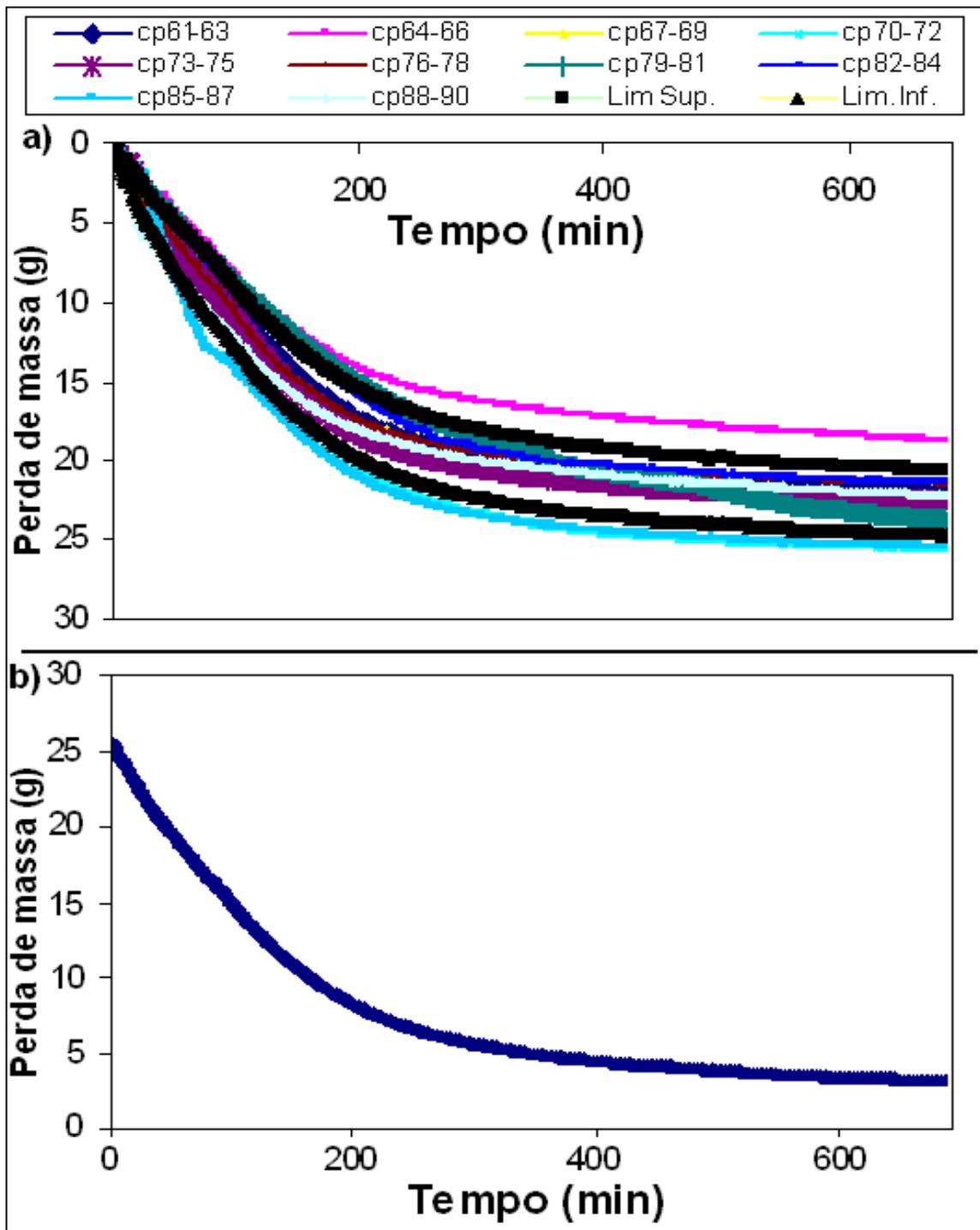


Figura 6.14 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 5% de chamota.
a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

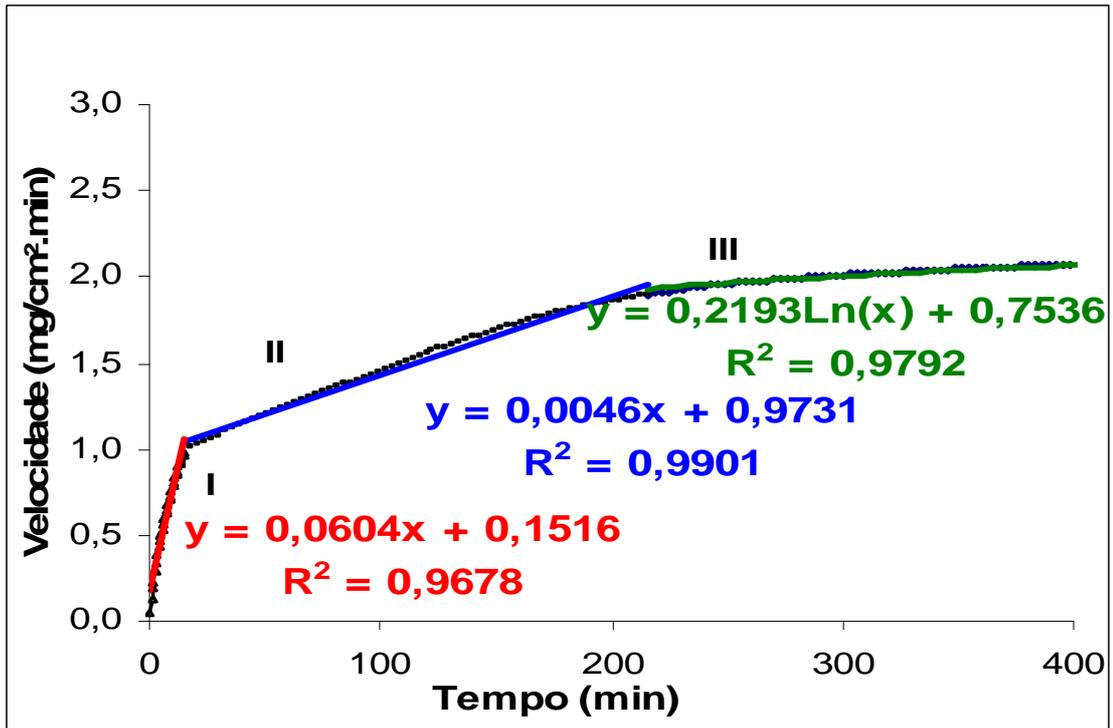


Figura 6.15 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica com 5% de chamota e suas equações de regressão linear.

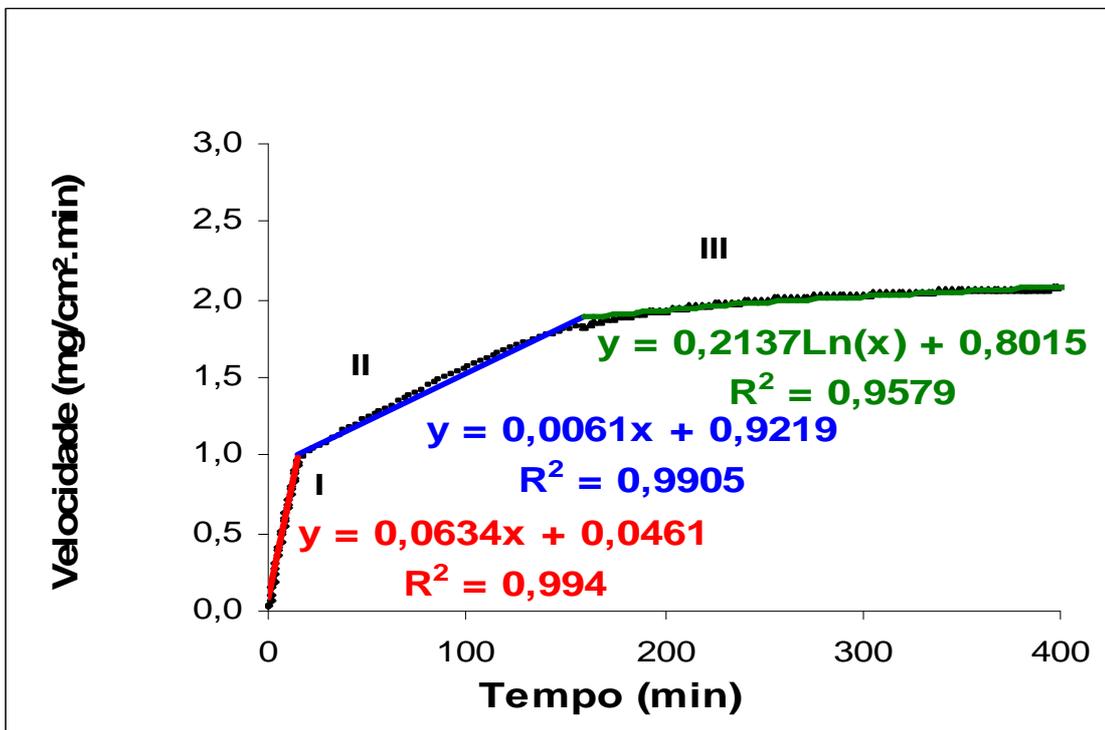


Figura 6.16 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica com 5% de chamota e suas equações de regressão linear.

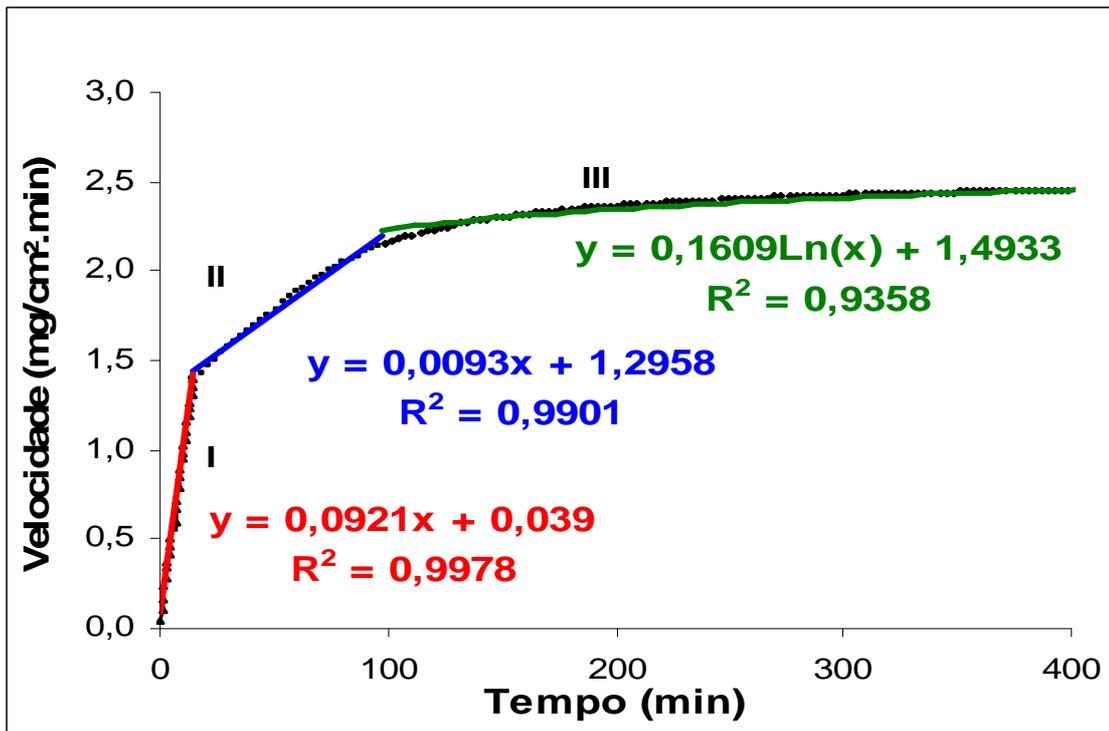


Figura 6.17 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica com 5% de chamota e suas equações de regressão linear.

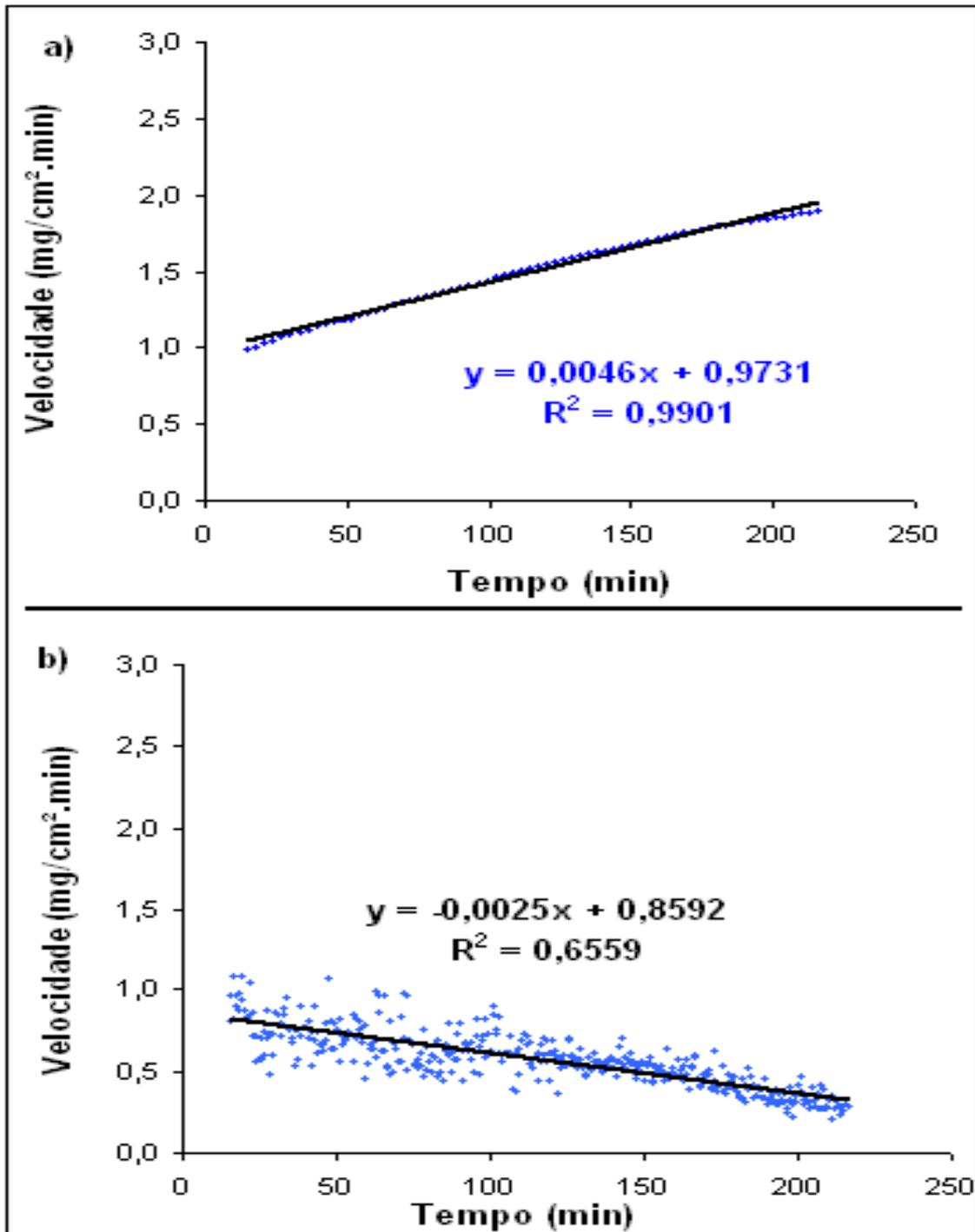


Figura 6.18 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 5% d e chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

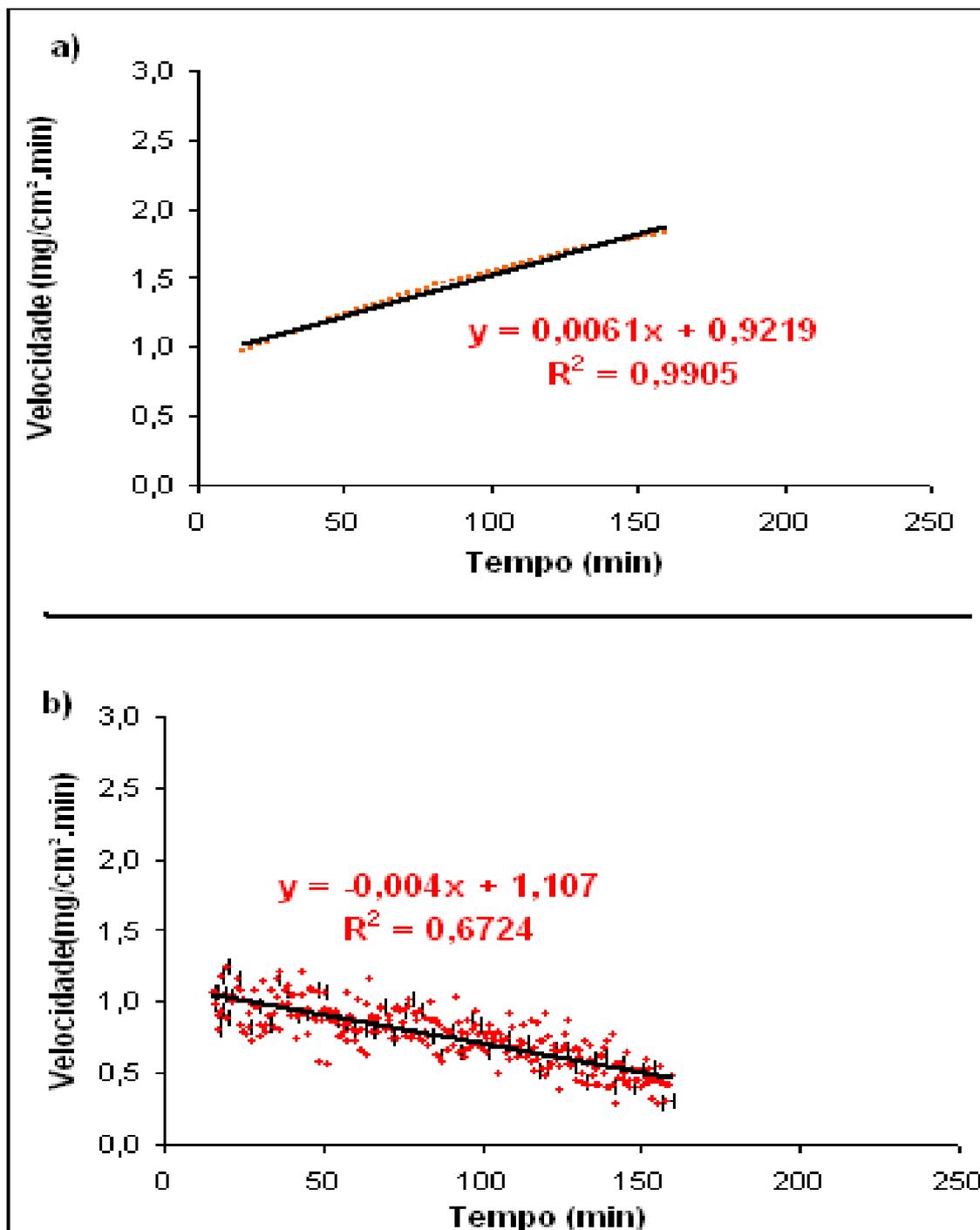


Figura 6.19 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 5% d e chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

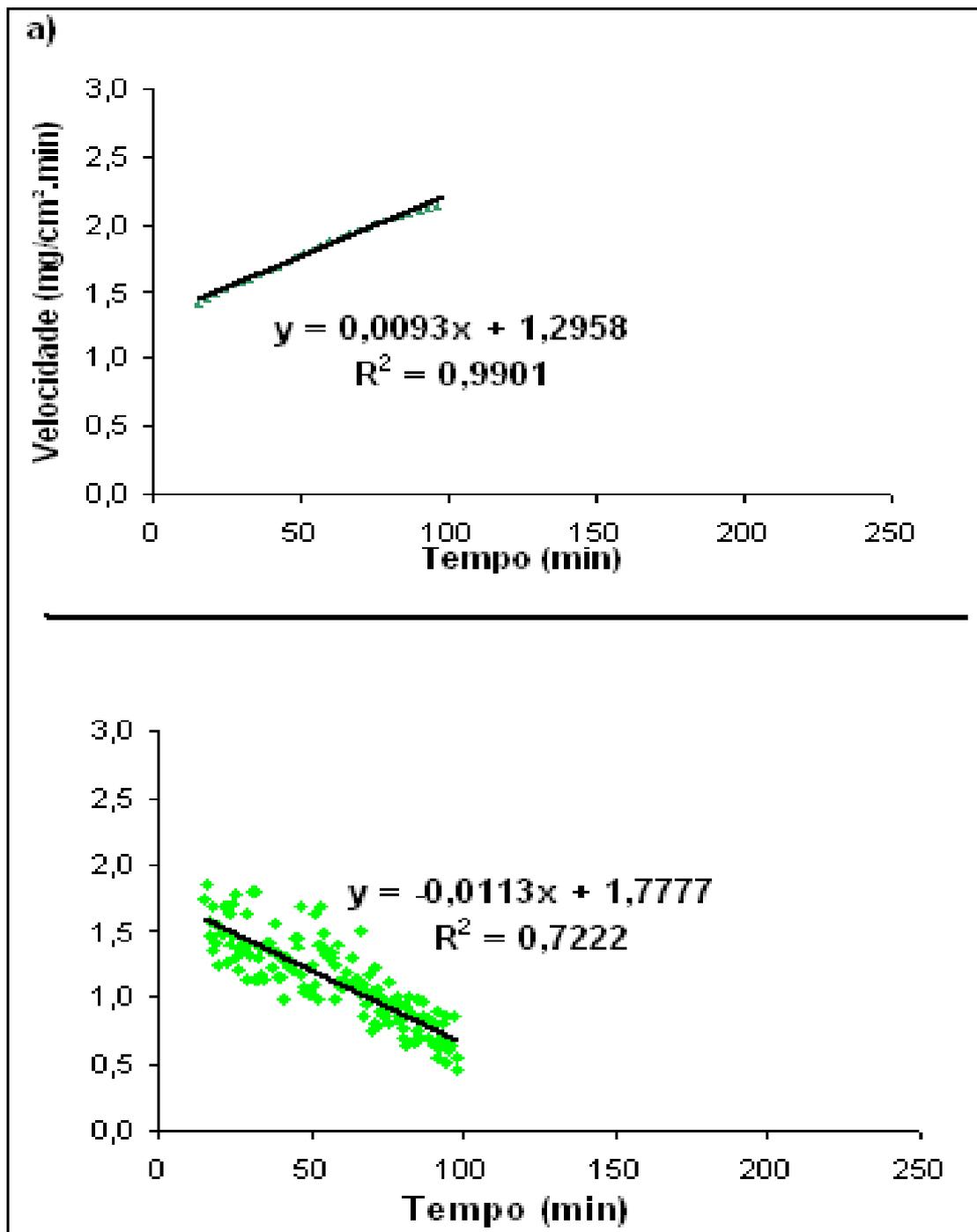


Figura 6.20 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 5% d e chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

Os limites da fase II de secagem (itens “a” das Figuras 6.18, 6.19 e 6.20), com as fases vizinhas (I e III), foram obtidos por regressão linear (equação da reta), avaliando-se para que o fator estatístico de correlação dos dados (R^2), se mantivesse em torno de 0,99, implicando em pequena dispersão dos dados em relação a sua média definindo-se assim os valores correspondentes ao tempo e à massa que delimitam esse intervalo.

As velocidades instantâneas foram obtidas refinando-se a malha de cálculo, diminuindo-se o intervalo de tempo de 3 minutos para 30 segundos e aplicando-se novamente a equação 4.8, chegando-se aos valores de velocidade apresentados no item “b” dessas figuras. Constatou-se que a velocidade instantânea diminui de forma uniforme e linear em função do tempo, segundo a linha de tendência caracterizada pela equação da reta. Para a previsão do tempo de secagem, foram calculadas as velocidades médias nesses intervalos de fase II, obtendo-se assim um patamar de velocidade constante e característico, conforme mostrado na Figura 4.19 (BARBA, 1997).

6.2.2 Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C

O gráfico da Figura 6.21 faz uma comparação da perda de massa através da umidade remanescente na massa cerâmica com 5% de chamota, em função do tempo de secagem, para as diferentes temperaturas de secagem praticadas (40°C, 50°C e 60°C), mantendo-se constante as demais características psicrométricas. Pode-se notar que o teor de umidade remanescente na temperatura de 60°C, foi menor que para a temperatura de 50°C, que por sua vez foi menor que para temperatura de 40°C. Isso pode ser explicado pelo aumento da entalpia do ar, que por sua vez aumenta a temperatura no interior da massa cerâmica, ocasionando uma saída da água com maior intensidade.

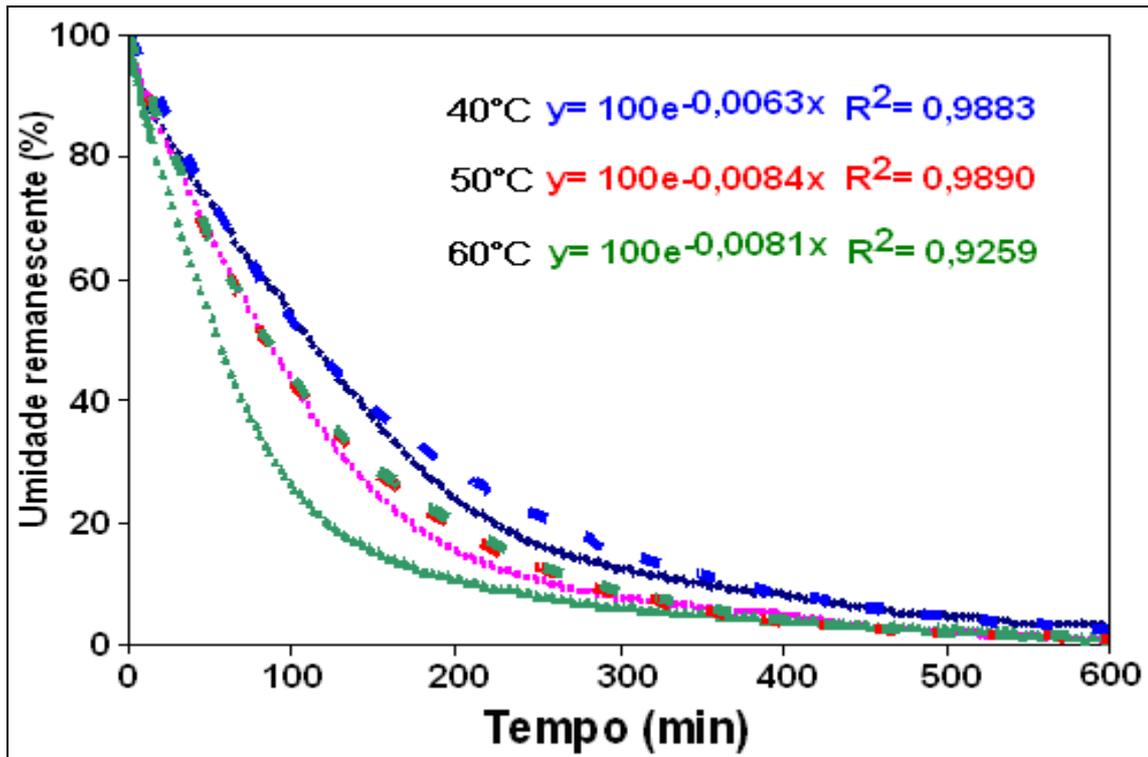


Figura 6.21 - Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas com 5% de chamota, submetidas à secagem a 40°C, 50°C e 60°C.

De outra maneira, a Figura 6.22 faz uma comparação entre as velocidades “instantânea” de secagem em relação ao tempo, para os corpos cerâmicos com a presença de 5% de chamota na massa cerâmica, quando submetidos às temperaturas de secagem de 40°C, 50°C e 60°C. Nota-se que se atinge maiores velocidades de perda de massa quando submetidos às maiores temperaturas de secagem. Nota-se ainda que para a mesma temperatura, 40°C, 50°C ou 60°C, a velocidade de secagem tende a diminuir linearmente com o tempo, sendo que a velocidade diminui mais drasticamente ao longo do tempo, para as maiores temperaturas de secagem (maior declividade das retas), cujo final da fase atinge-se em um menor período de tempo.

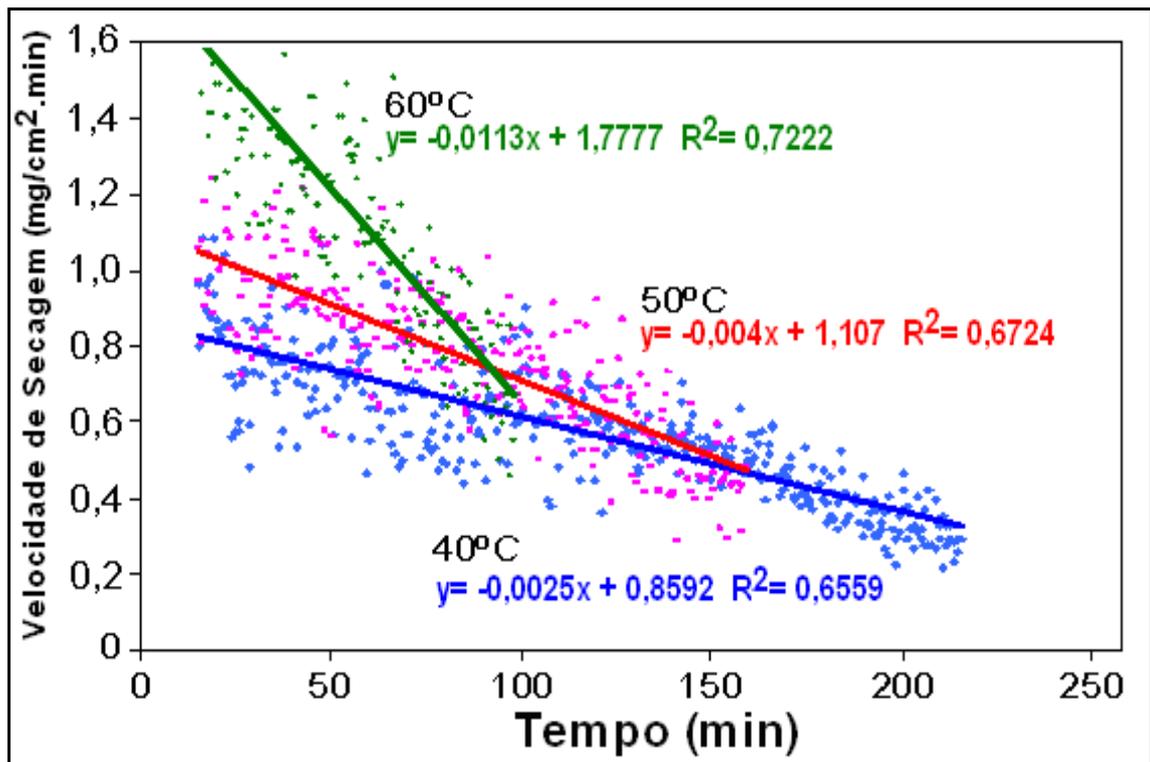


Figura 6.22 - Comparação entre as velocidades “instantânea” de perdas de massa em função do tempo de secagem para argila com 5% de chamota e 95% de argila nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

6.3 SECAGEM DA MASSA CERÂMICA COM 8% DE CHAMOTA

6.3.1 Secagem a 40°C

As Figuras 6.23, 6.24 e 6.25 mostram as perdas de massa dos corpos-de-prova da massa cerâmica com 8% de chamota, em função do tempo de secagem. Em seus itens “a” são apresentadas as curvas dos corpos-de-prova e os limites superior e inferior, resultante da média do desvio padrão dessas curvas. Nos itens “b”, tem-se a média das curvas apresentadas nos itens “a”, excluindo os valores espúrios.

Essas informações utilizadas com a expressão da Equação 4.8 permitiram a obtenção das velocidades de secagem para as médias desses corpos cerâmicos, cujos gráficos encontram-se apresentados nas Figuras 6.26, 6.27 e 6.28, retratando as velocidades de secagem acumulada a cada momento (três minutos).

Nota-se as três declividades que representam as três fases de secagem (I, II e III), com diferentes velocidades de perda de massa. Observa-se ainda que cada fase pode ser representada por uma equação de regressão linear do tipo retilínea (fases I e II) ou do tipo logarítmica (fase III).

Como o processo de secagem dá ênfase à segunda fase que relata o período de perda de massa constante e visando a obtenção da umidade crítica de secagem, conforme descrito pelas curvas de Bigot, trabalhou-se especificamente nessa fase, obtendo-se os gráficos das Figuras 6.29, 6.30 e 6.31.

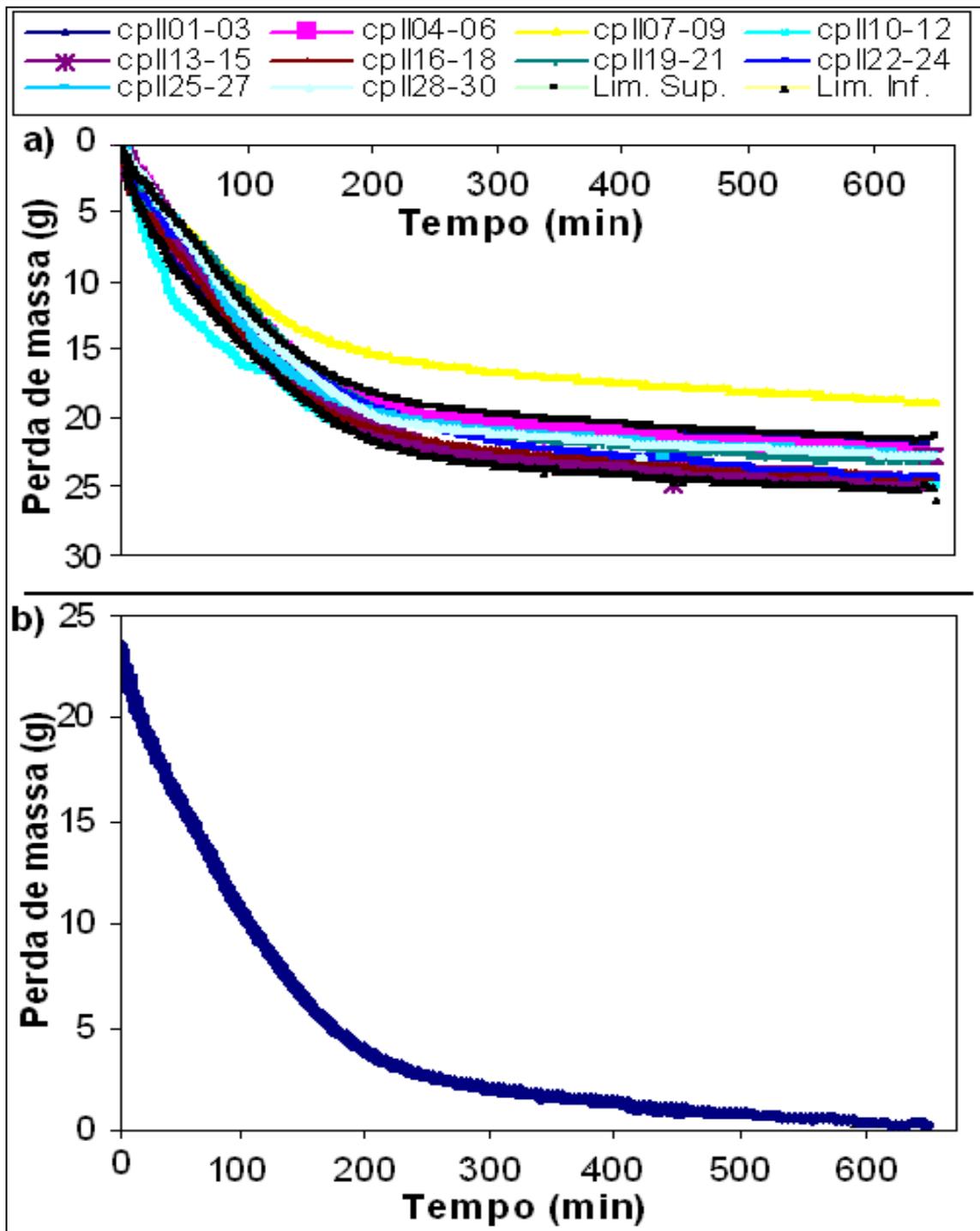


Figura 6.23 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 8% de chamota.
a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

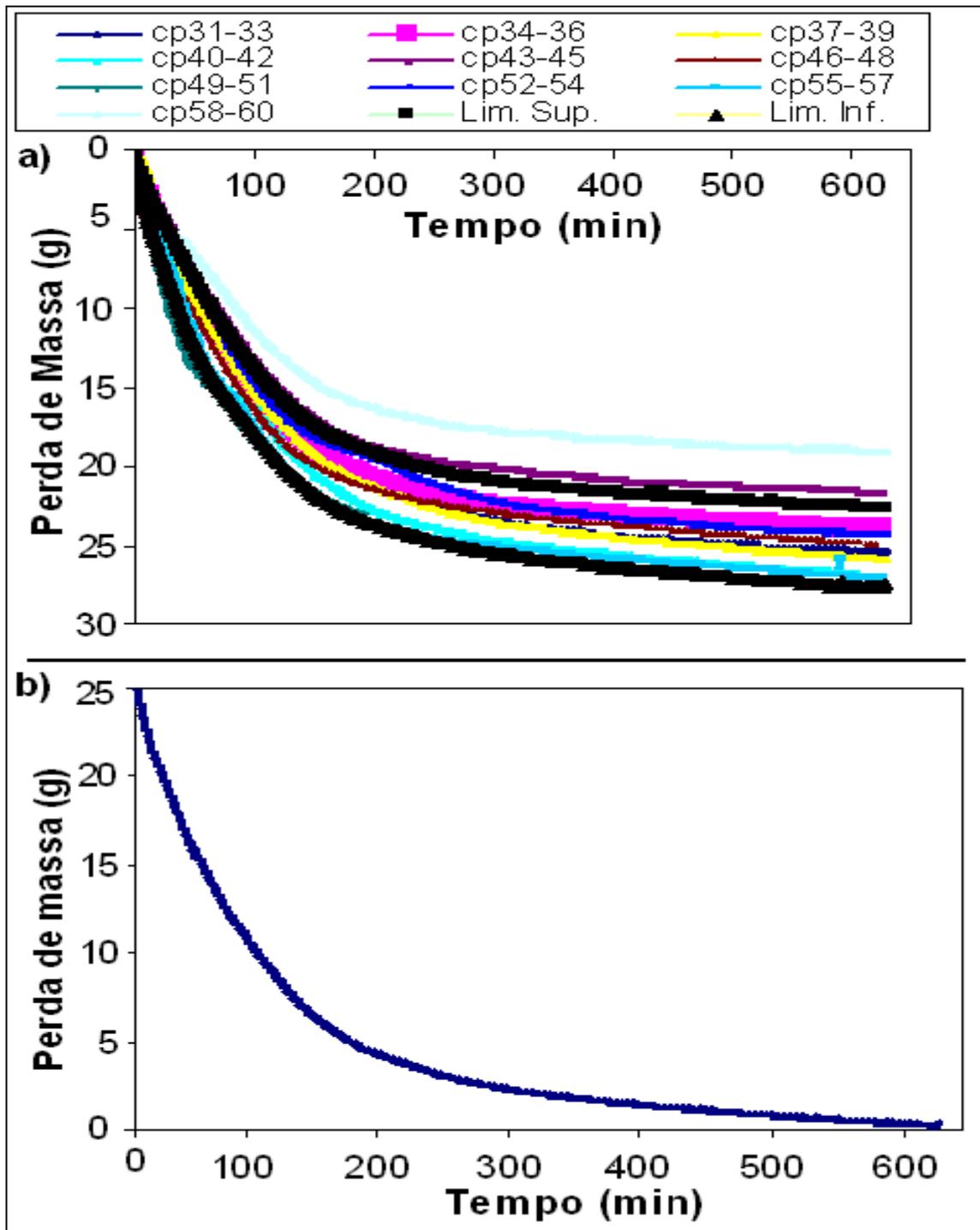


Figura 6.24 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 8% de chamota.
a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

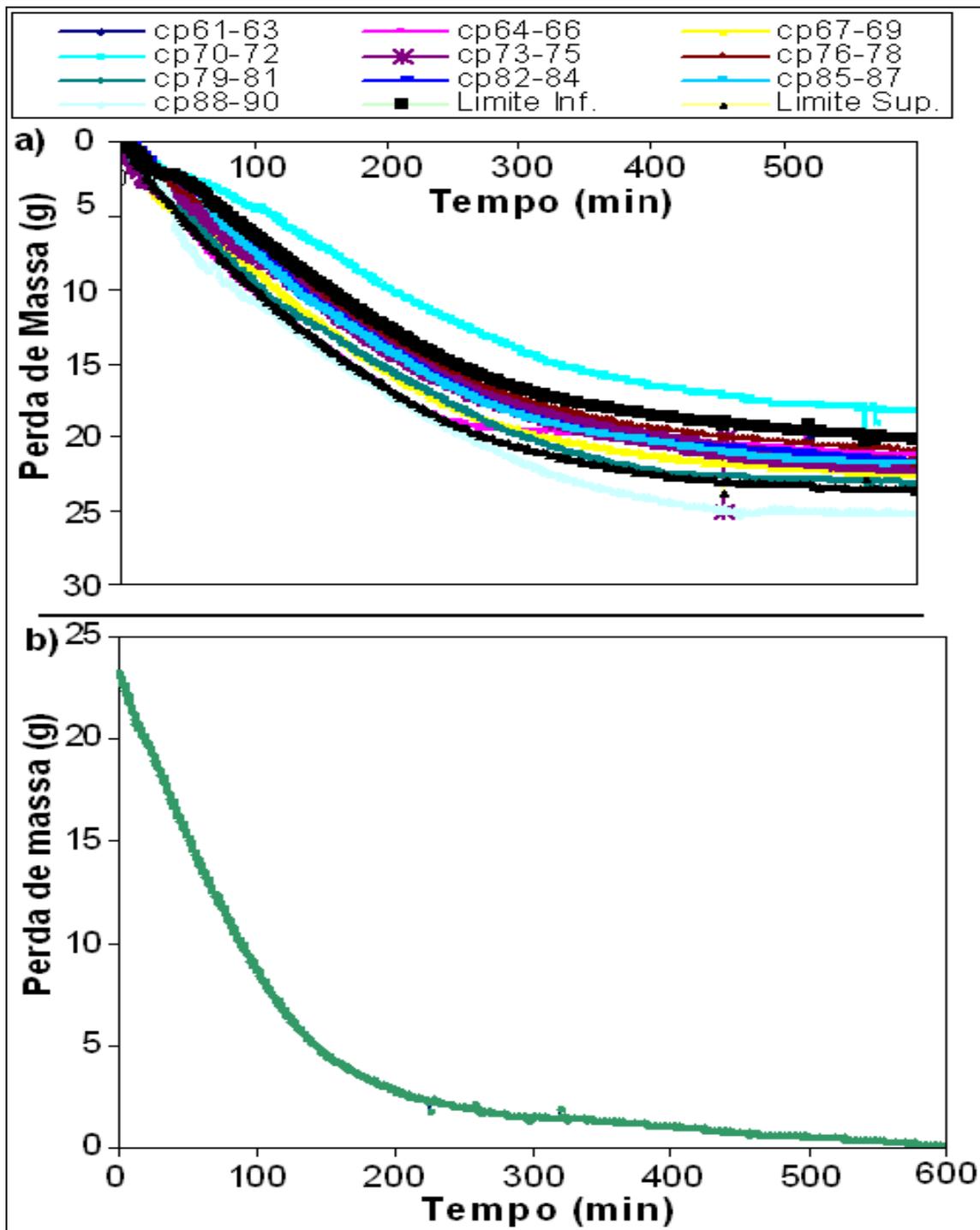


Figura 6.25 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 8% de chamota.
a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

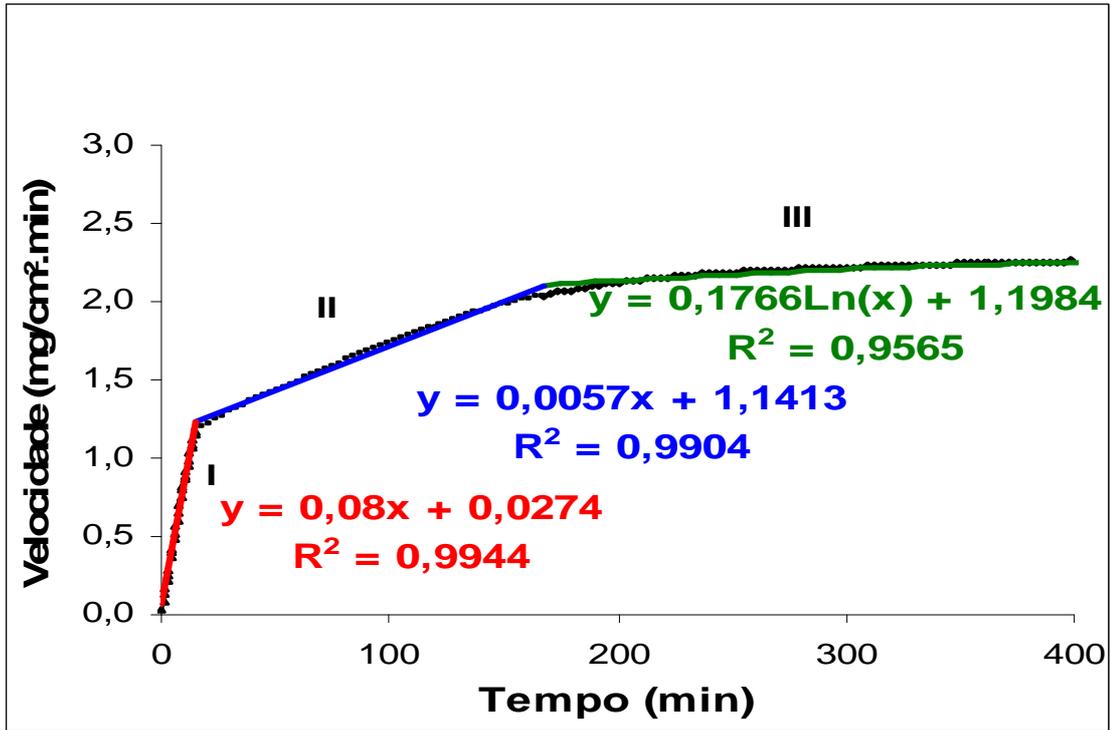


Figura 6.26 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica com 8% de chamota e suas equações de regressão linear.

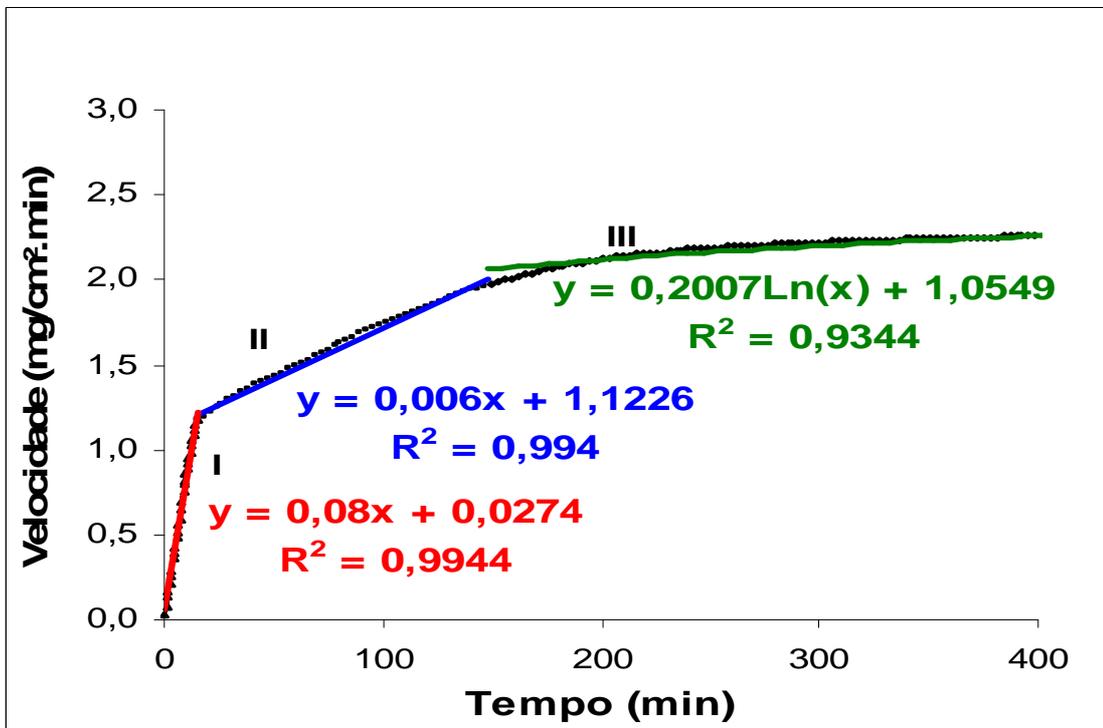


Figura 6.27 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica com 8% de chamota e suas equações de regressão linear.

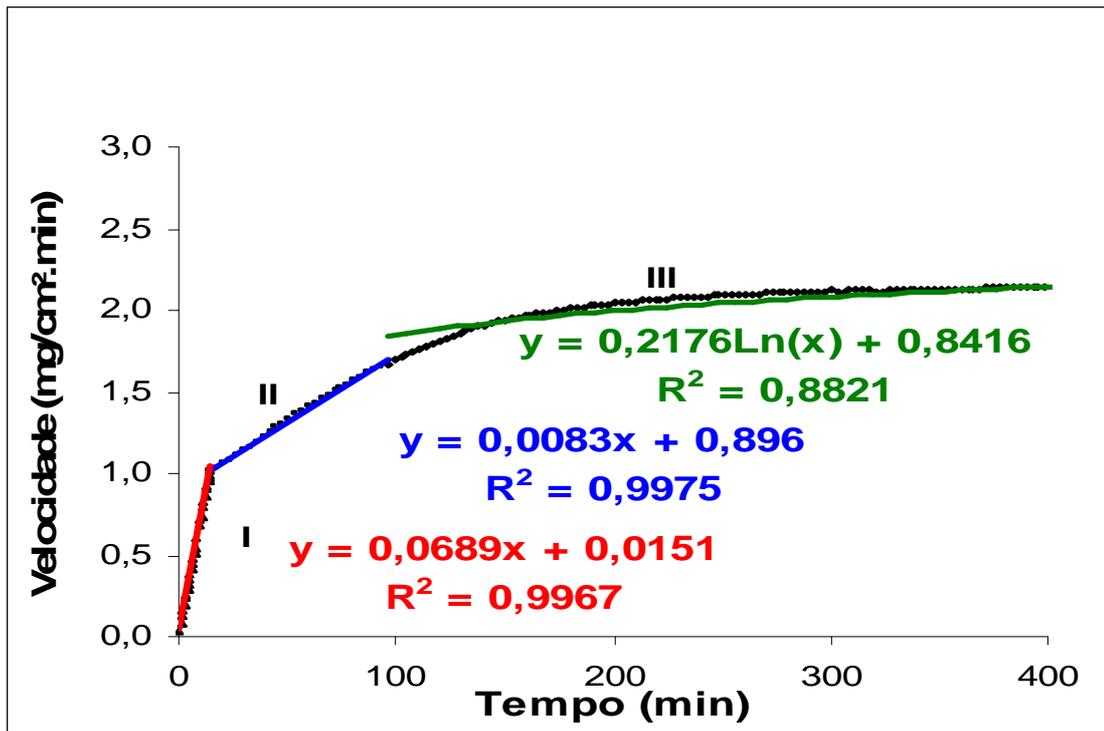


Figura 6.28 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica com 8% de chamota e suas equações de regressão linear.

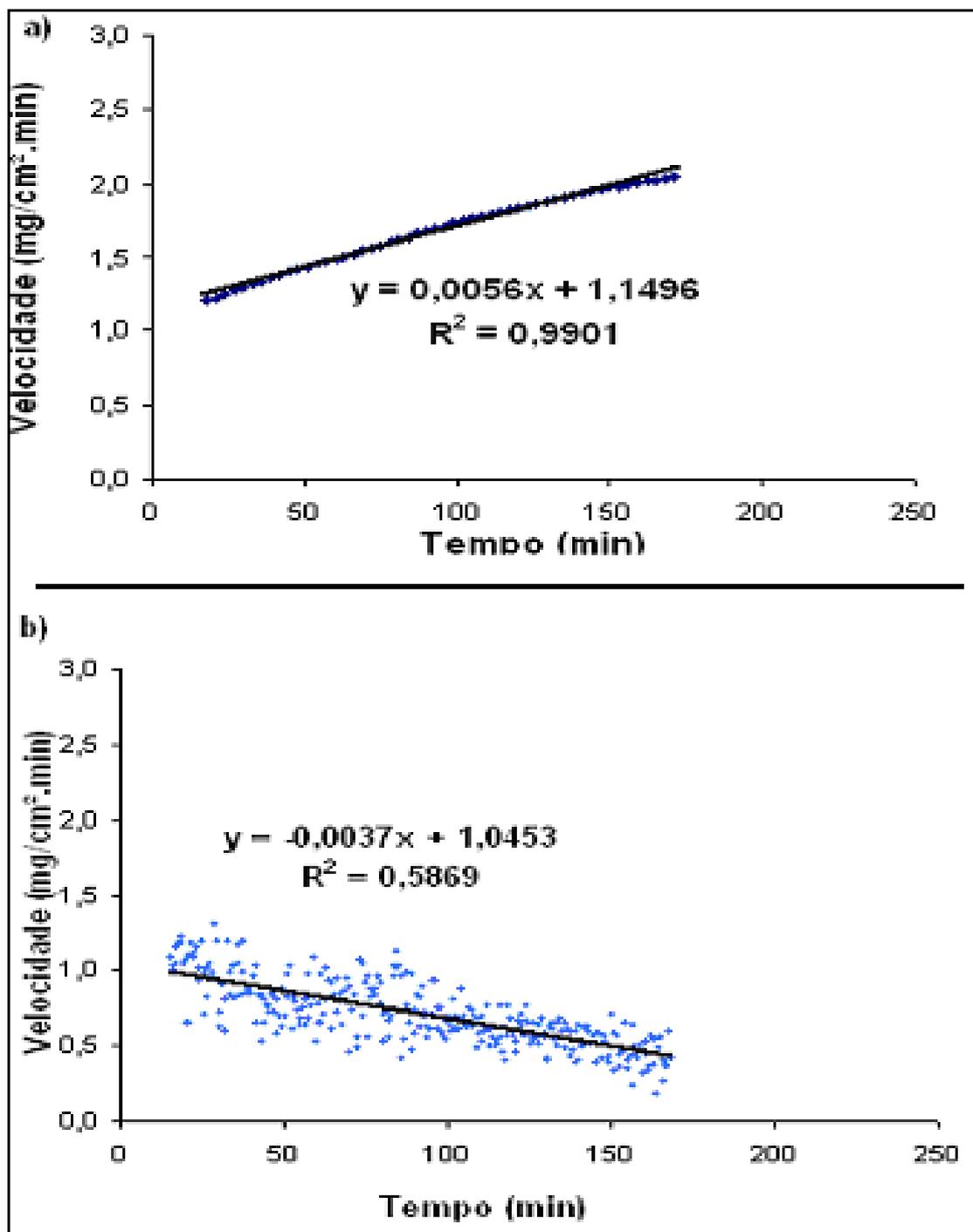


Figura 6.29 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 8% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

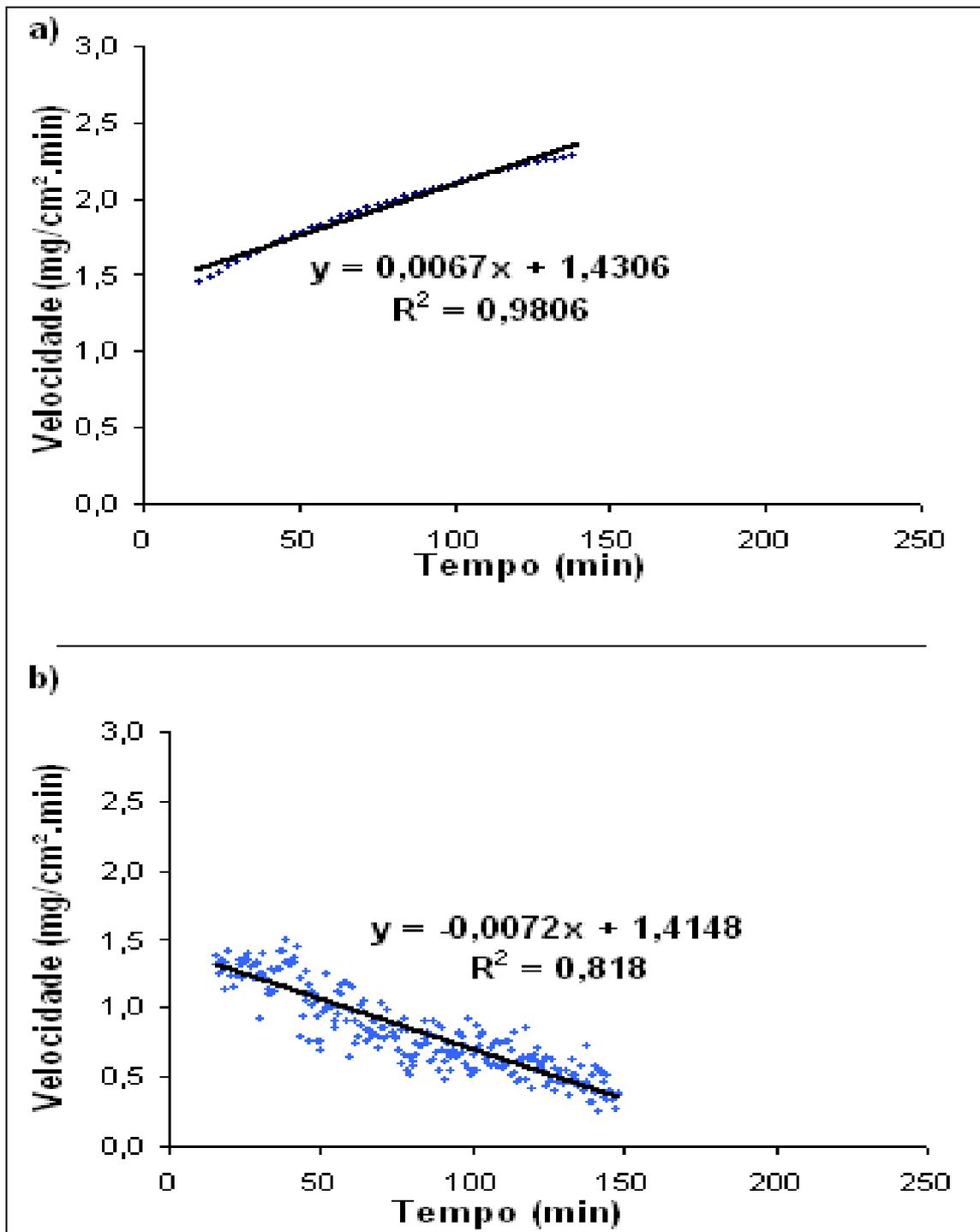


Figura 6.30 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 8% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

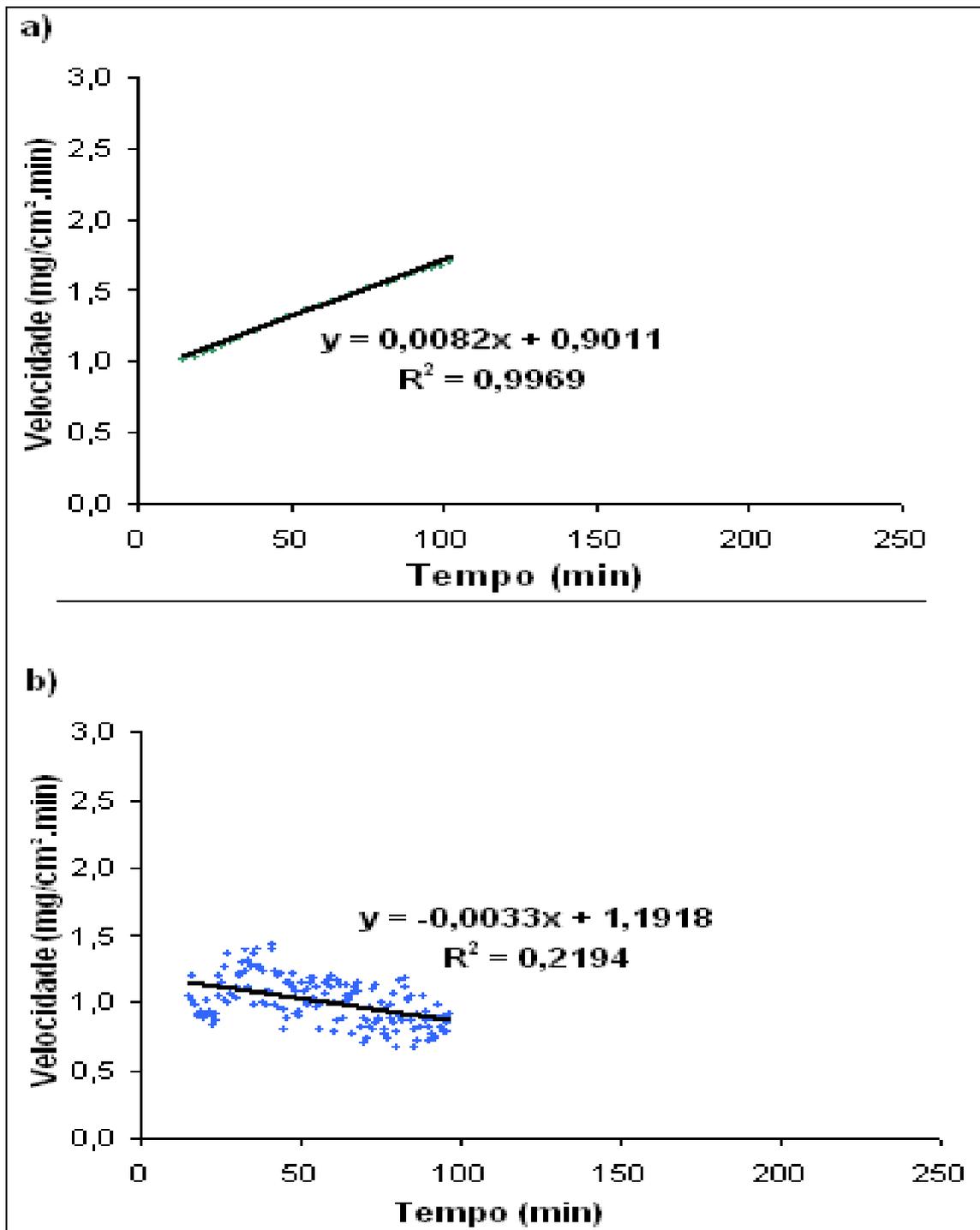


Figura 6.31 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 8% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

Para o cálculo dos limites da fase II de secagem (velocidade acumulada a cada 3 minutos – item a das Figuras 6.29, 6.30 e 6.31), com as fases vizinhas (I e III), fez-se uma regressão linear, através da equação da reta, avaliando-se o fator estatístico de correlação dos dados (R^2), tendo-se o cuidado para que à medida que se aumentasse o intervalo dessa fase, esse fator se mantivesse em torno de 0,99, o que implicaria em pequena dispersão dos dados em relação a sua média. Uma vez satisfeita essa condição, definiram-se os valores correspondentes ao tempo e à massa que delimitam esse intervalo.

Para o cálculo das velocidades instantâneas, refinou-se a malha de cálculo, diminuindo-se o intervalo de tempo de 3 minutos para 30 segundos e aplicou-se novamente a Equação 4.8, chegando-se aos valores de velocidade apresentados no item “b” dessas figuras. Constatou-se que a velocidade instantânea diminui de forma uniforme e linear em função do tempo, segundo a linha de tendência caracterizada pela equação da reta. Para a previsão do tempo de secagem, foram calculadas as velocidades médias nesses intervalos de fase II, obtendo-se assim um patamar de velocidade constante e característico, conforme mostrado na Figura 4.19 (BARBA, 1997).

6.3.2 Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C

O gráfico da Figura 6.32 faz uma comparação da perda de massa através da umidade remanescente na massa cerâmica com 8% de chamota, em função do tempo de secagem, para as diferentes temperaturas de secagem praticadas (40°C, 50°C e 60°C), mantendo-se constante as demais características psicrométricas. Pode-se notar que o teor de umidade remanescente na temperatura de 60°C, foi menor que para a temperatura de 50°C, que por sua vez foi menor que para temperatura de 40°C. Isso pode ser explicado pelo aumento da entalpia do ar, que por sua vez aumenta a temperatura no interior da massa cerâmica, ocasionando uma saída da água com maior intensidade.

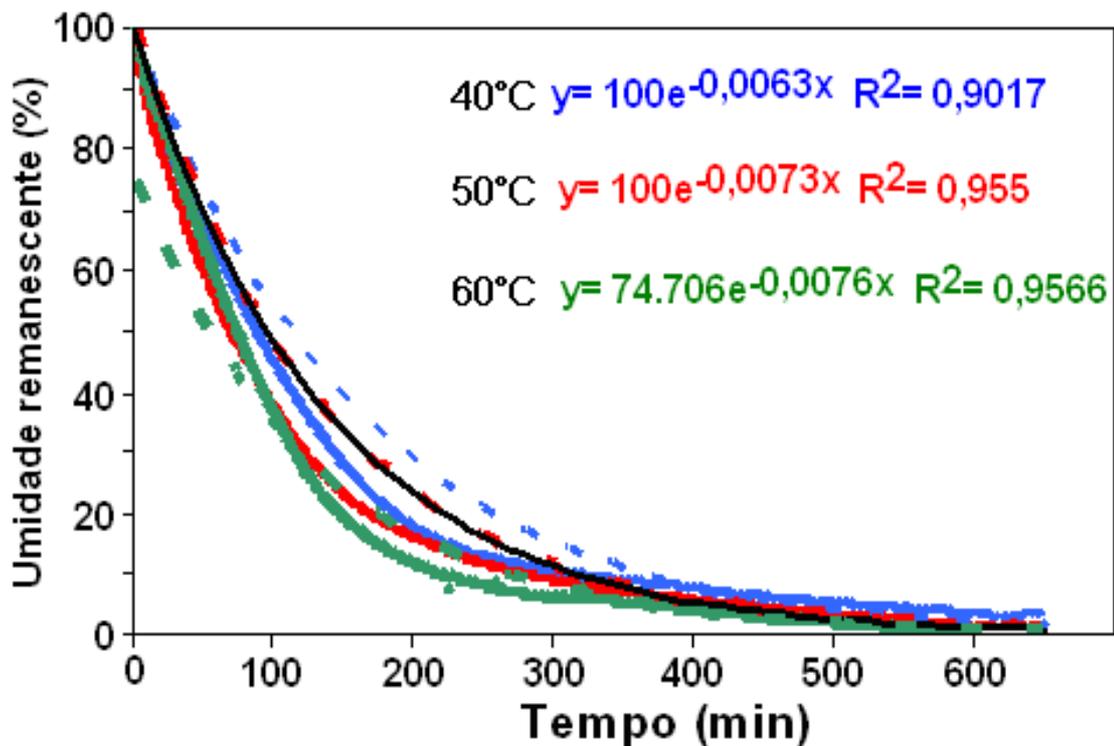


Figura 6.32 - Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas com 8% de chamota, submetidas à secagem a 40°C, 50°C e 60°C.

De outra maneira, a Figura 6.33 apresenta uma comparação entre as velocidades “instantânea” de secagem em relação ao tempo, para os corpos cerâmicos com a presença de 8% de chamota na massa cerâmica, quando submetidos às temperaturas de secagem de 40°C, 50°C e 60°C. Nota-se que se atinge maiores velocidades de perda de massa quando submetidos às maiores

temperaturas de secagem. Nota-se ainda que para a mesma temperatura, 40°C, 50°C ou 60°C, a velocidade de secagem tende a diminuir linearmente com o tempo, sendo que a velocidade diminui mais drasticamente ao longo do tempo, para as maiores temperaturas de secagem (maior declividade das retas), cujo final da fase atinge-se em um menor período de tempo.

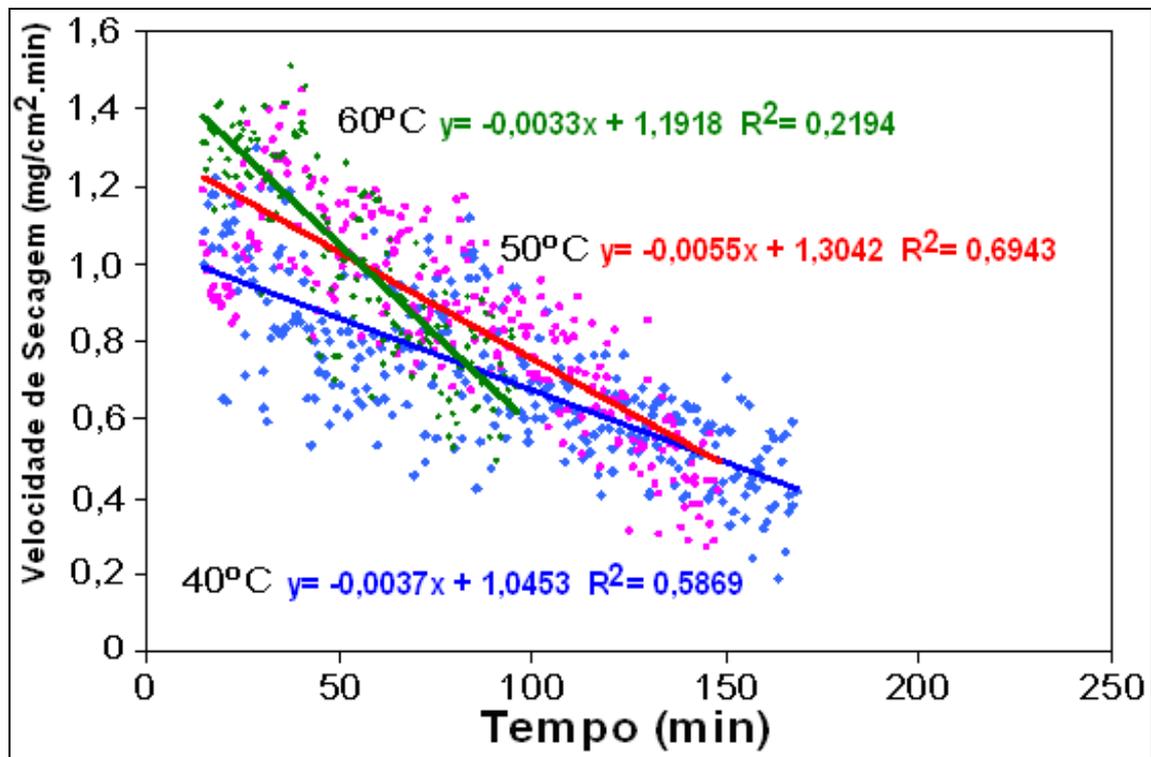


Figura 6.33 - Comparação entre as velocidades de perdas de massa em função do tempo de secagem para argila com 8% de chamota e 92% de argila nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

6.4 SECAGEM DA MASSA CERÂMICA COM 10% DE CHAMOTA

6.4.1 Secagem a 40°C

As Figuras 6.34, 6.35 e 6.36 mostram as perdas de massa dos corpos-de-prova da massa cerâmica com 8% de chamota, em função do tempo de secagem. Em seus itens “a” são apresentadas as curvas dos corpos-de-prova e os limites superior e inferior, resultante da média do desvio padrão dessas curvas. Nos itens “b”, tem-se a média das curvas apresentadas nos itens “a”, excluindo os valores espúrios.

Essas informações utilizadas com a expressão da Equação 4.8 permitiram a obtenção das velocidades de secagem para as médias desses corpos cerâmicos, cujos gráficos encontram-se apresentados nas Figuras 6.37, 6.38 e 6.39, retratando as velocidades de secagem acumulada a cada momento (três minutos).

Nota-se as três declividades que representam as três fases de secagem (I, II e III), com diferentes velocidades de perda de massa. Observa-se ainda que cada fase pode ser representada por uma equação de regressão linear do tipo retilínea (fases I e II) ou do tipo logarítmica (fase III).

Como o processo de secagem dá ênfase à segunda fase que relata o período de perda de massa constante e visando a obtenção da umidade crítica de secagem, conforme descrito pelas curvas de Bigot, trabalhou-se especificamente nessa fase, obtendo-se os gráficos das Figuras 6.40, 6,41 e 6.42.

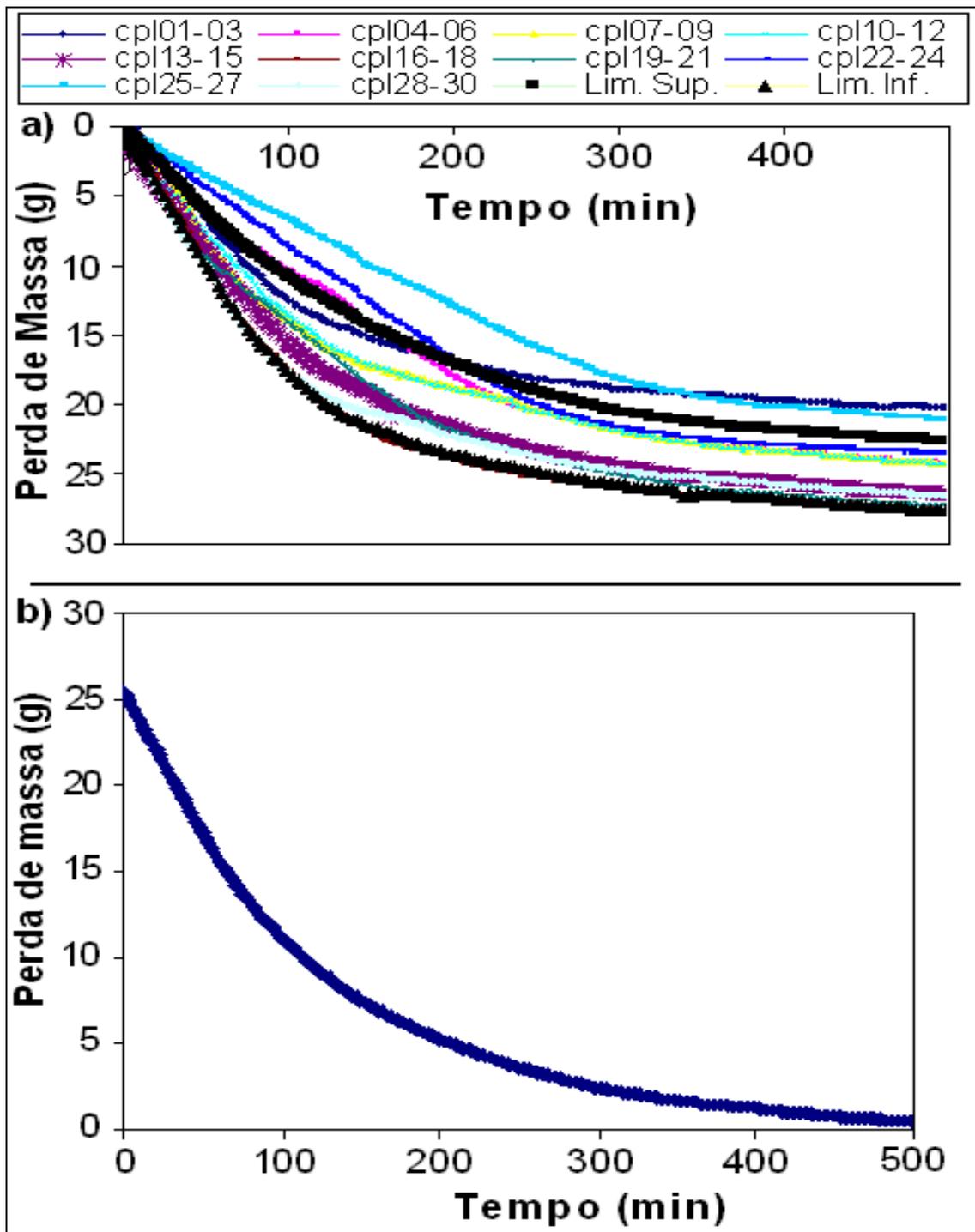


Figura 6.34 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 10% de chamota.
a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

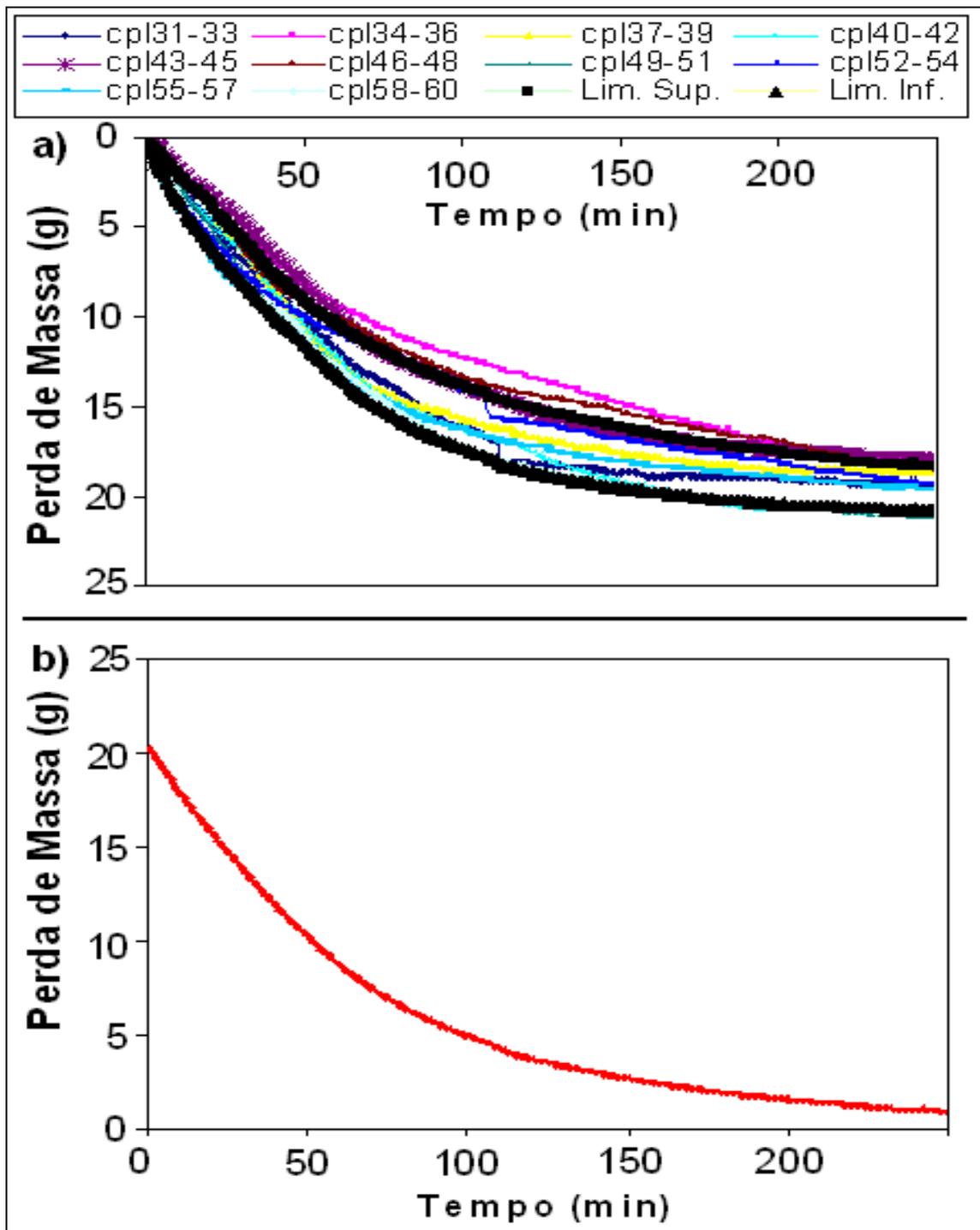


Figura 6.35 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 10% de chamota.
 a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

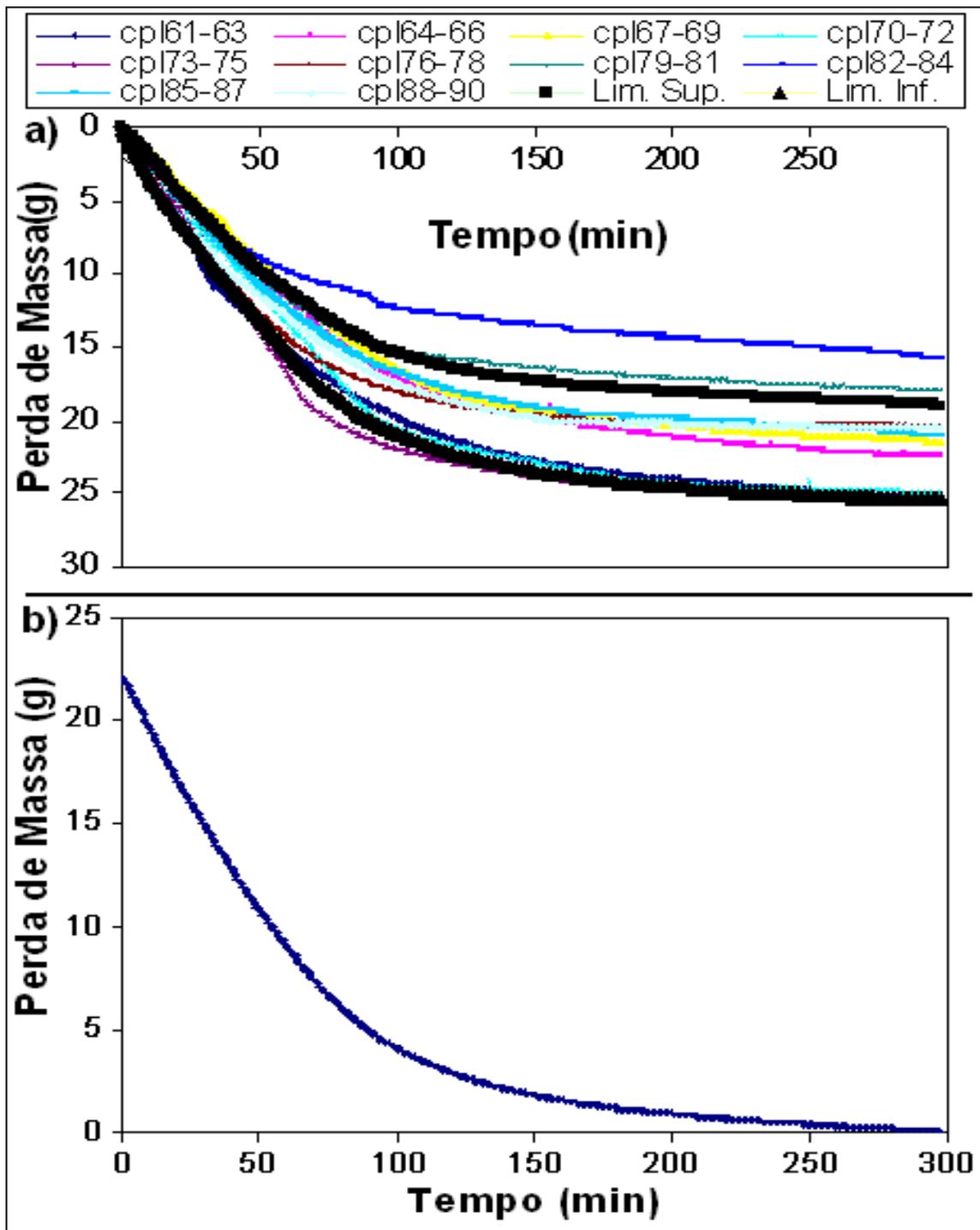


Figura 6.36 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 10% de chamota.
 a) Curvas de perda de massa; b) Perda média de massa.

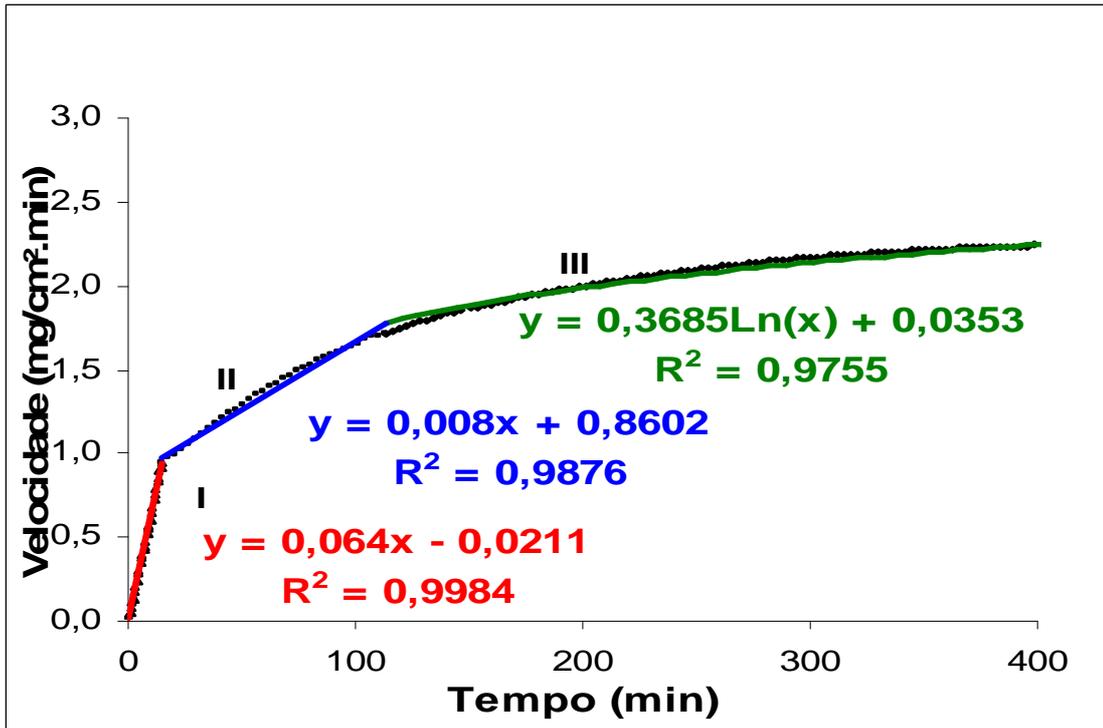


Figura 6.37 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 40°C da massa cerâmica com 10% de chamota e suas respectivas equações de regressão linear.

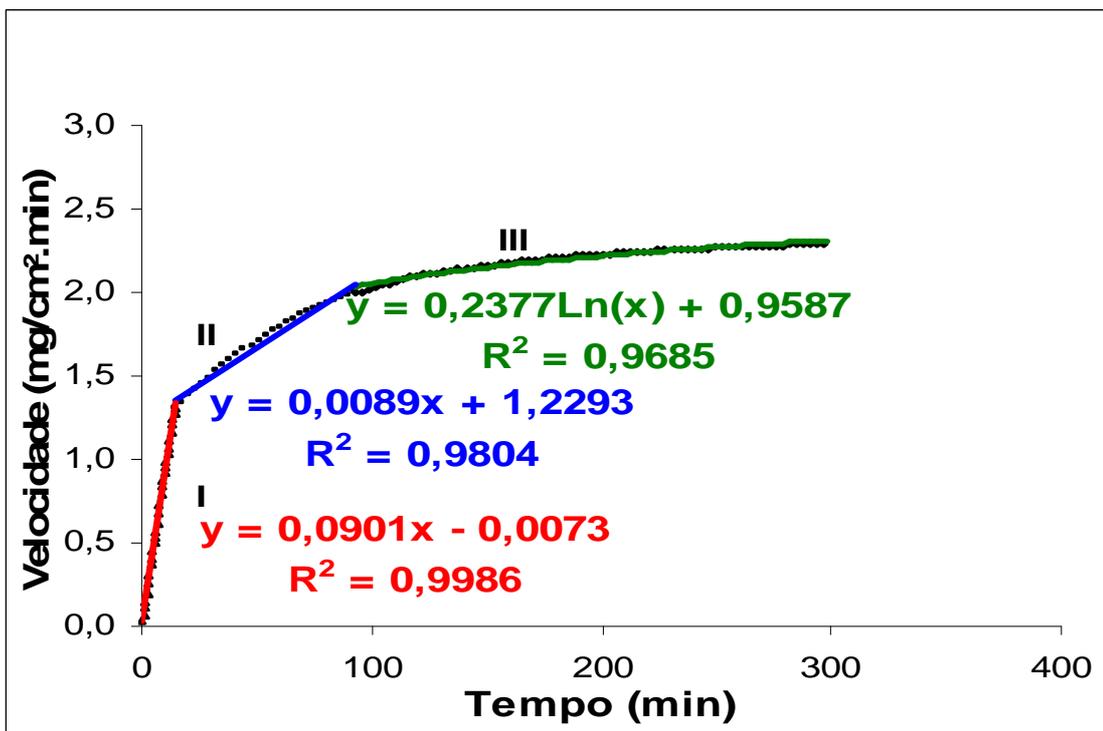


Figura 6.38 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 50°C da massa cerâmica com 10% de chamota e suas respectivas equações de regressão linear.

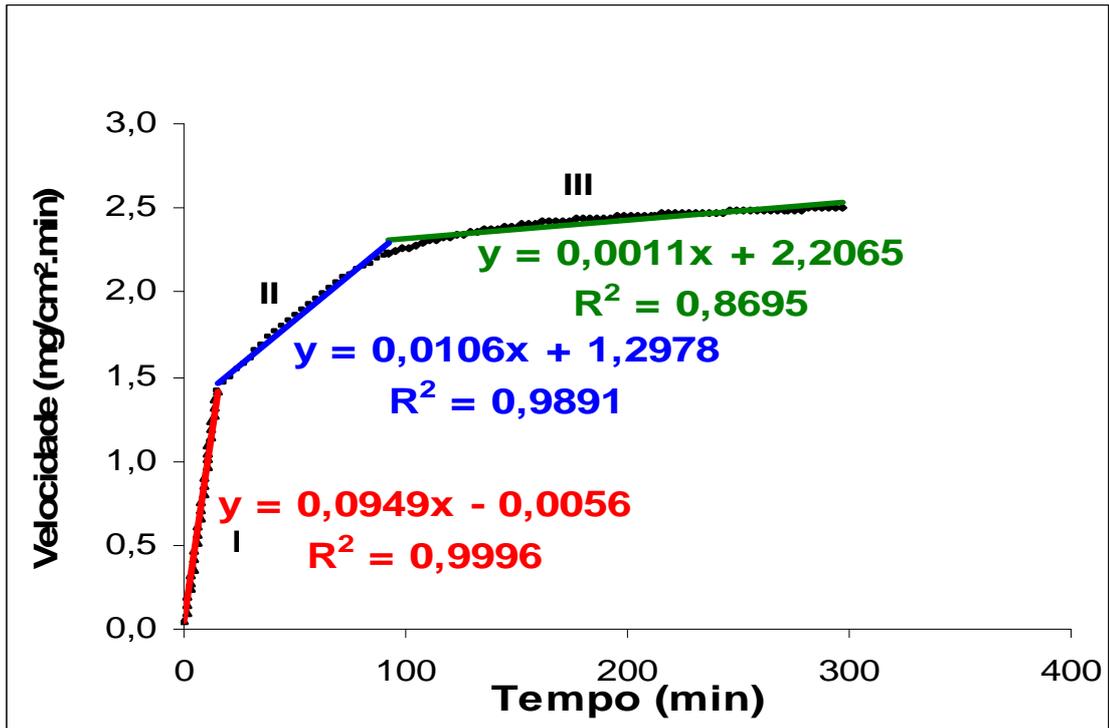


Figura 6.39 - Fases das Curvas de velocidade de secagem a 60°C da massa cerâmica com 10% de chamota e suas respectivas equações de regressão linear.

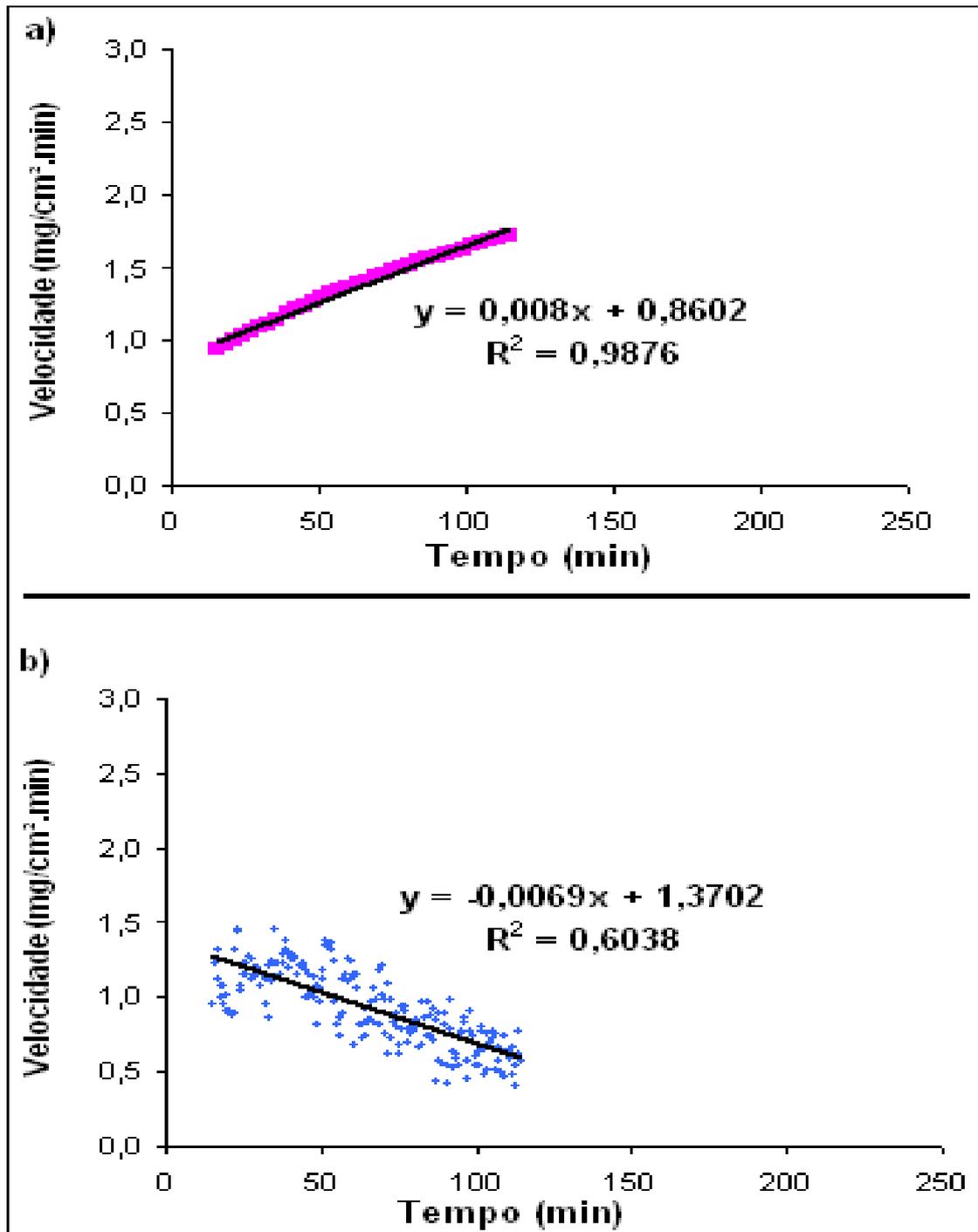


Figura 6.40 - Curvas de secagem a 40°C da massa cerâmica com 10% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

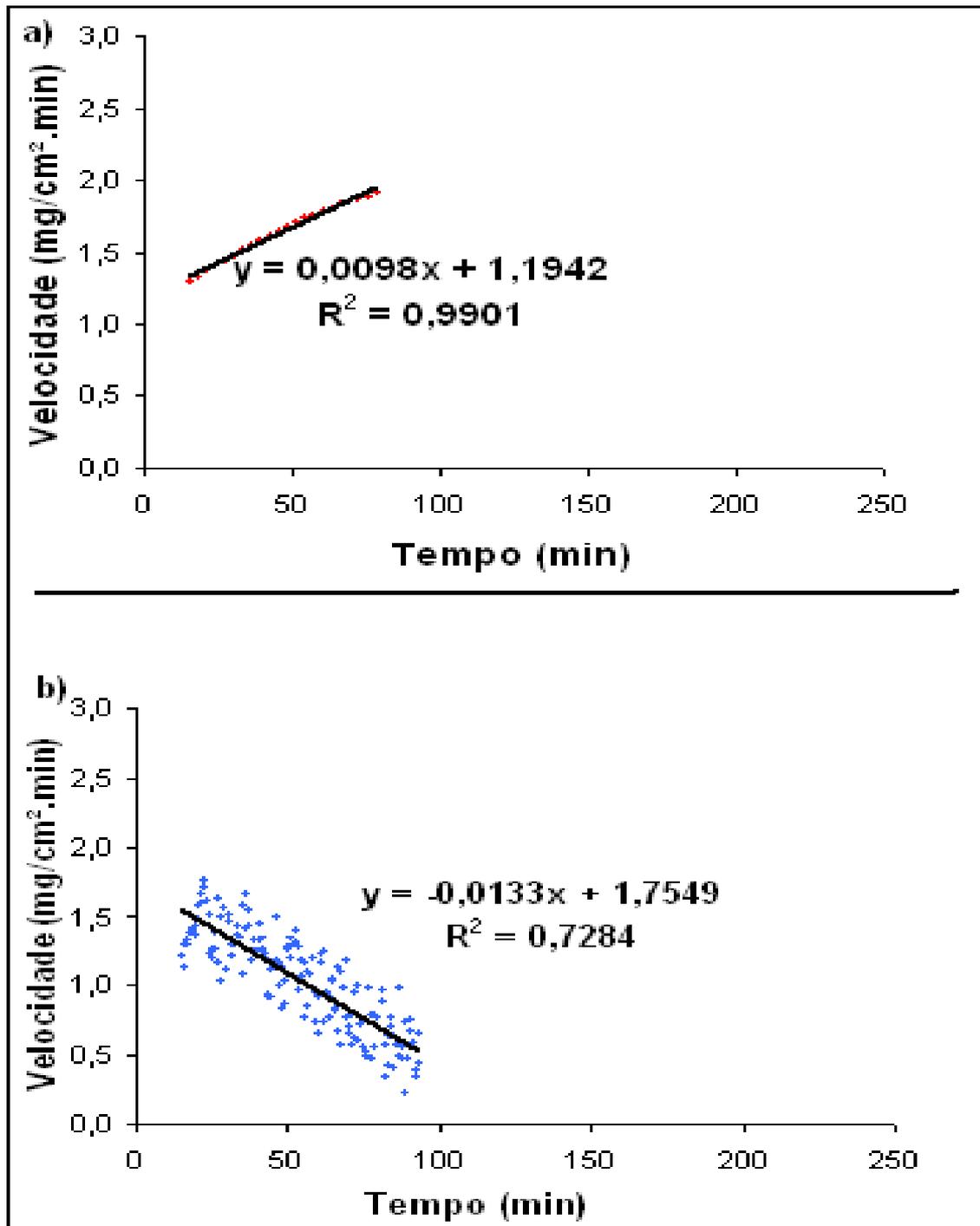


Figura 6.41 - Curvas de secagem a 50°C da massa cerâmica com 10% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

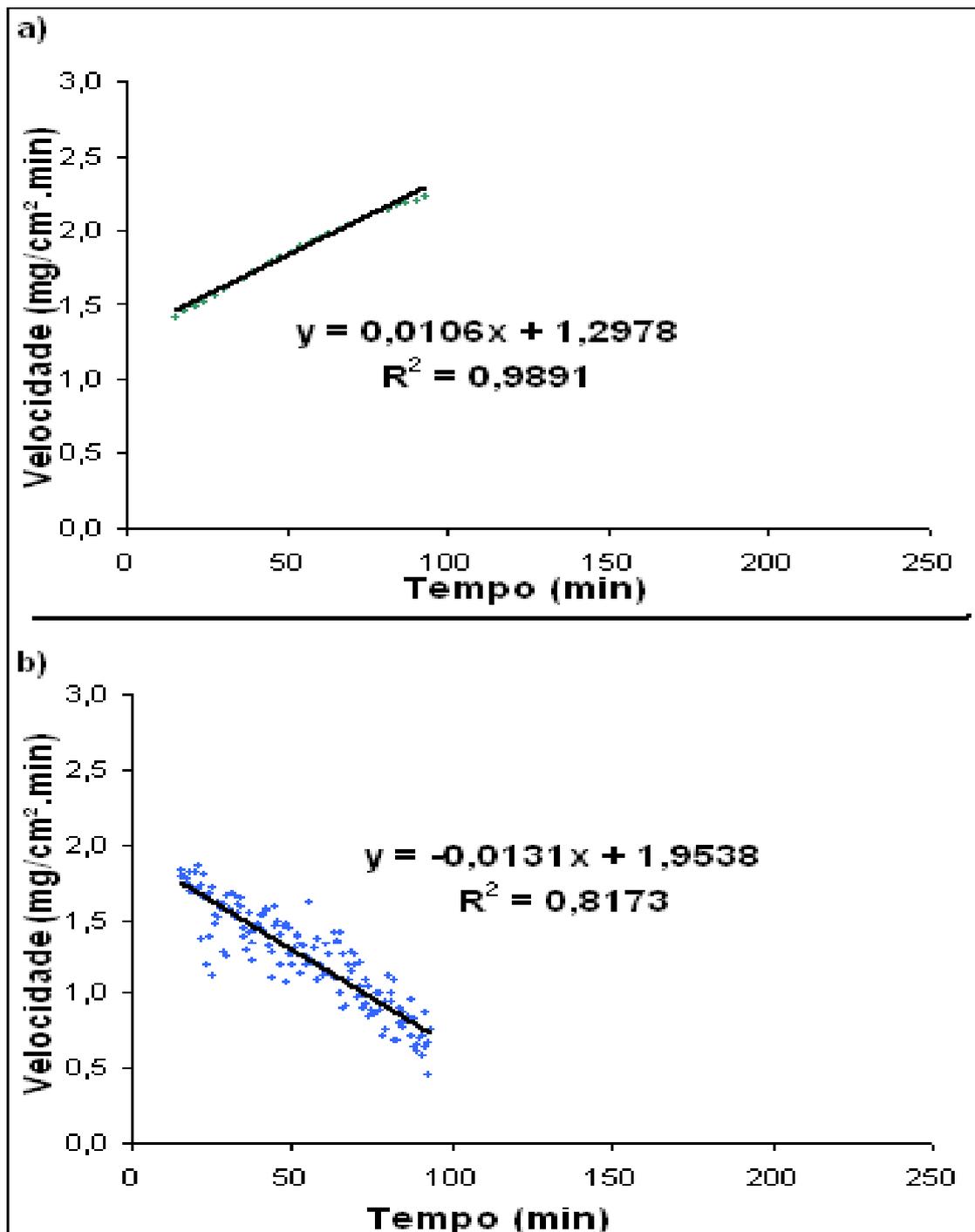


Figura 6.42 - Curvas de secagem a 60°C da massa cerâmica com 10% de chamota. Fase II: Velocidade de secagem e regressão linear. a) Velocidade acumulada (cada 3 minutos); b) Velocidade instantânea (cada 30 segundos).

Para o cálculo dos limites da fase II de secagem (velocidade acumulada a cada 3 minutos – item a das Figuras 6.40, 6.41 e 6.42), com as fases vizinhas (I e III), fez-se uma regressão linear, através da equação da reta, avaliando-se o fator estatístico de correlação dos dados (R^2), tendo-se o cuidado para que à medida que se aumentasse o intervalo dessa fase, esse fator se mantivesse em torno de 0,99, o que implicaria em pequena dispersão dos dados em relação a sua média. Uma vez satisfeita essa condição, definiram-se os valores correspondentes ao tempo e à massa que delimitam esse intervalo.

Para o cálculo das velocidades instantâneas, refinou-se a malha de cálculo, diminuindo-se o intervalo de tempo de 3 minutos para 30 segundos e aplicou-se novamente a equação 4.8, chegando-se aos valores de velocidade apresentados no item “b” dessas figuras. Constatou-se que a velocidade instantânea diminui de forma uniforme e linear em função do tempo, segundo a linha de tendência caracterizada pela equação da reta. Para a previsão do tempo de secagem, foram calculadas as velocidades médias nesses intervalos de fase II, obtendo-se assim um patamar de velocidade constante e característico, conforme mostrado na Figura 4.19 (BARBA, 1997).

6.4.2 Comparação entre as secagens a 40°C, 50°C e 60°C

O gráfico da Figura 6.43 faz uma comparação da perda de massa através da umidade remanescente na massa cerâmica com 10% de chamota, em função do tempo de secagem, para as diferentes temperaturas de secagem praticadas (40°C, 50°C e 60°C), mantendo-se constante as demais características psicrométricas. Pode-se notar que o teor de umidade remanescente na temperatura de 60°C, foi menor que para a temperatura de 50°C, que por sua vez foi menor que para temperatura de 40°C. Isso pode ser explicado pelo aumento da entalpia do ar, que por sua vez aumenta a temperatura no interior da massa cerâmica, ocasionando uma saída da água com maior intensidade.

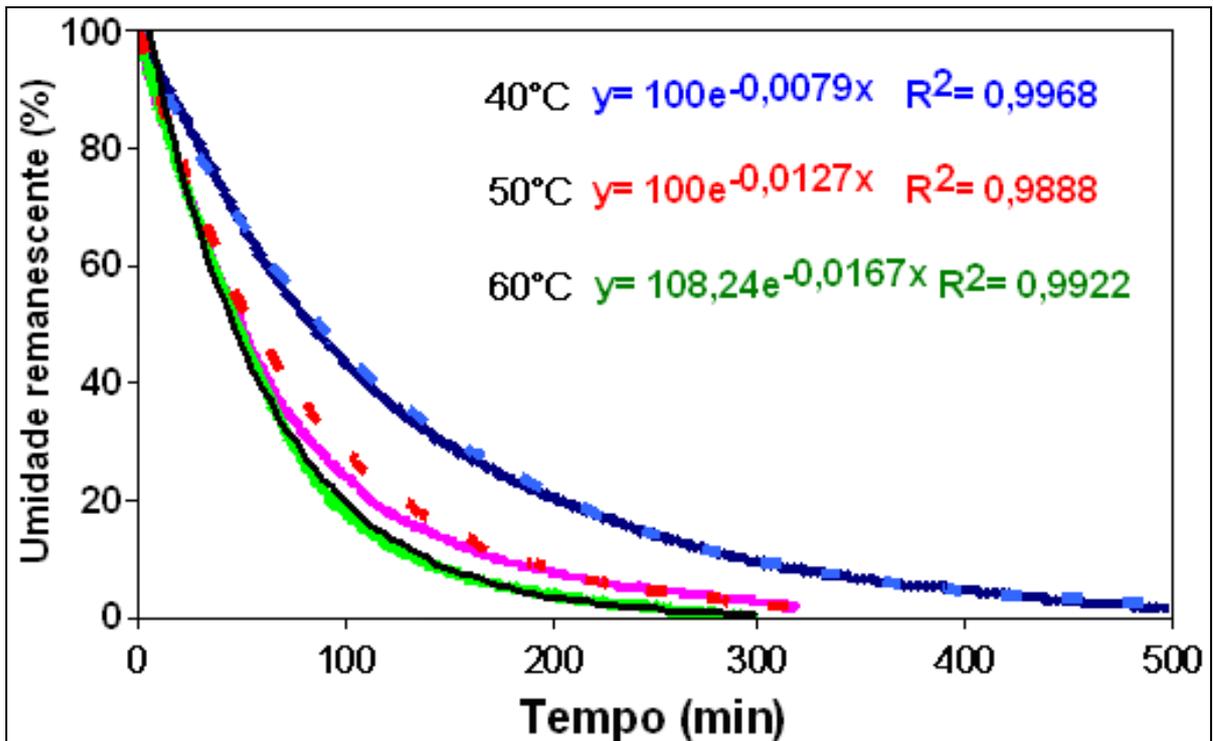


Figura 6.43 - Comparação entre a umidade remanescente em função do tempo, para as massas cerâmicas com 10% de chamota, submetidas a secagem a 40°C, 50°C e 60°C.

De outra maneira, a Figura 6.44 apresenta uma comparação entre as velocidades “instantâneas” de secagem em relação ao tempo, para os corpos cerâmicos com a presença de 10% de chamota na massa cerâmica, quando submetidos às temperaturas de secagem de 40°C, 50°C e 60°C. Nota-se que se atinge maiores velocidades de perda de massa quando submetidos às maiores temperaturas de secagem. Nota-se ainda que para a mesma temperatura, 40°C, 50°C ou 60°C, a velocidade de secagem tende a diminuir linearmente com o tempo, sendo que a velocidade diminui mais drasticamente ao longo do tempo, para as maiores temperaturas de secagem (maior declividade das retas), cujo final da fase atinge-se em um menor período de tempo.

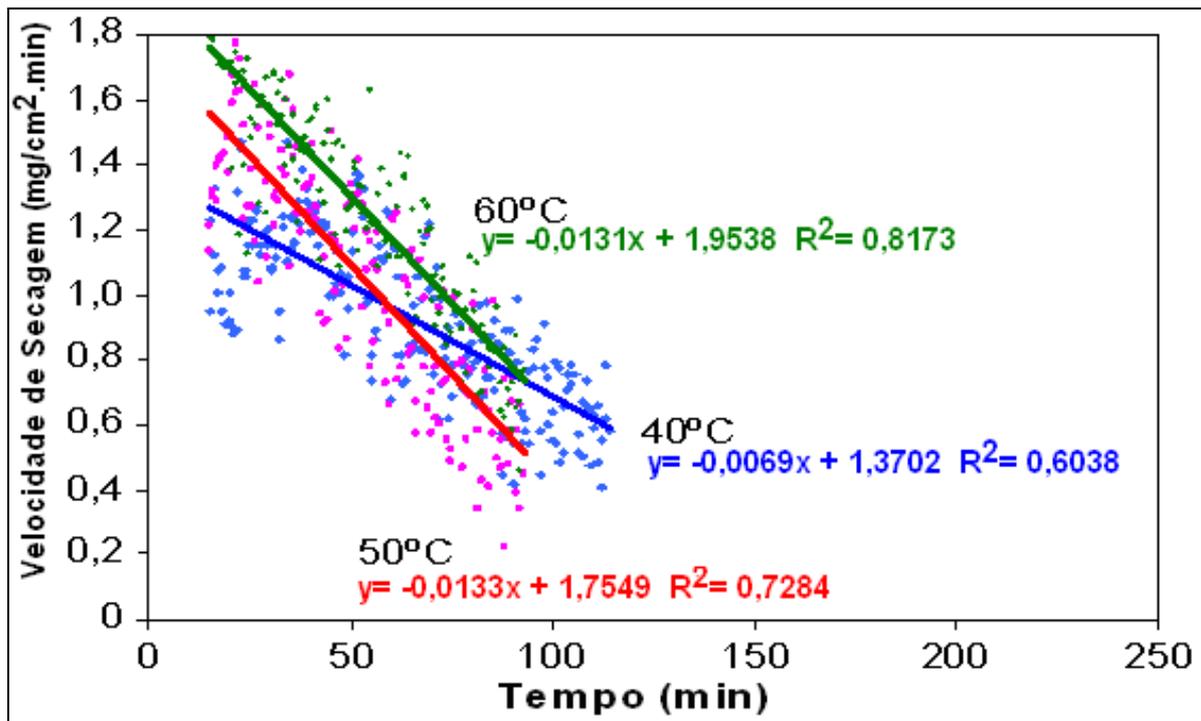


Figura 6.44 - comparação entre as velocidades “instantânea” de perdas de massa em função do tempo de secagem para argila com 10% de chamota e 90% de argila nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.

6.5 EFEITO DA TEMPERATURA DE SECAGEM

As Figura 6.45, Figura 6.46 e Figura 6.47 apresentam uma comparação das velocidades de secagem respectivamente às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, para as massas cerâmicas formuladas com 0%, 5%, 8% e 10% de chamota. Da mesma forma, são indicados em cada gráfico os valores da regressão linear representativa da velocidade de secagem em função do tempo. Interessante observar que os tempos de secagem sofreram significativa redução em função do aumento da temperatura de secagem.

De outra forma, para as 3 temperaturas de secagem investigadas, os gráficos indicam que a velocidade de secagem no início do período é maior quanto maior a adição de chamota na composição devido ser um elemento não plástico e poroso, facilitando a saída de água durante o processo. Para maiores tempos de secagem, a velocidade de perda de massa tende a diminuir para qualquer das composições, sendo que diminui de forma mais intensa para as composições que possuem

maiores teores de chamota. Dessa forma, quanto maior a percentagem de chamota na composição, mais rápido se atinge o período final dessa fase de secagem.

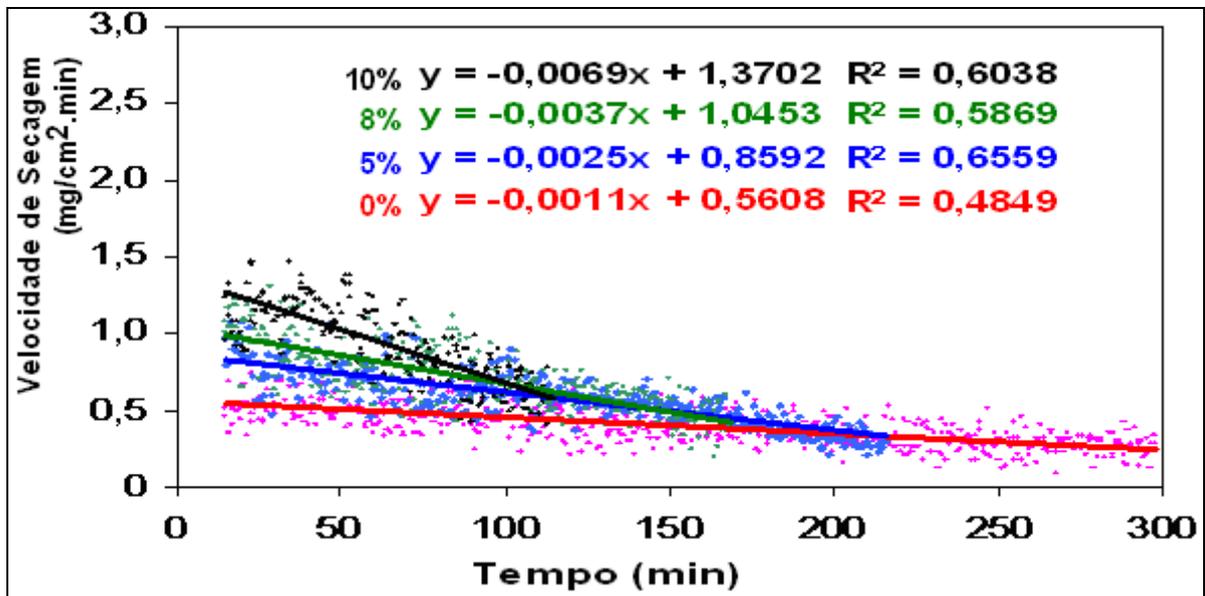


Figura 6.45 - Comparação entre as velocidades de secagem em função do tempo de secagem à temperatura de 40°C para as massas cerâmicas com 0%, 5%, 8% e 10% de chamota em sua formulação.

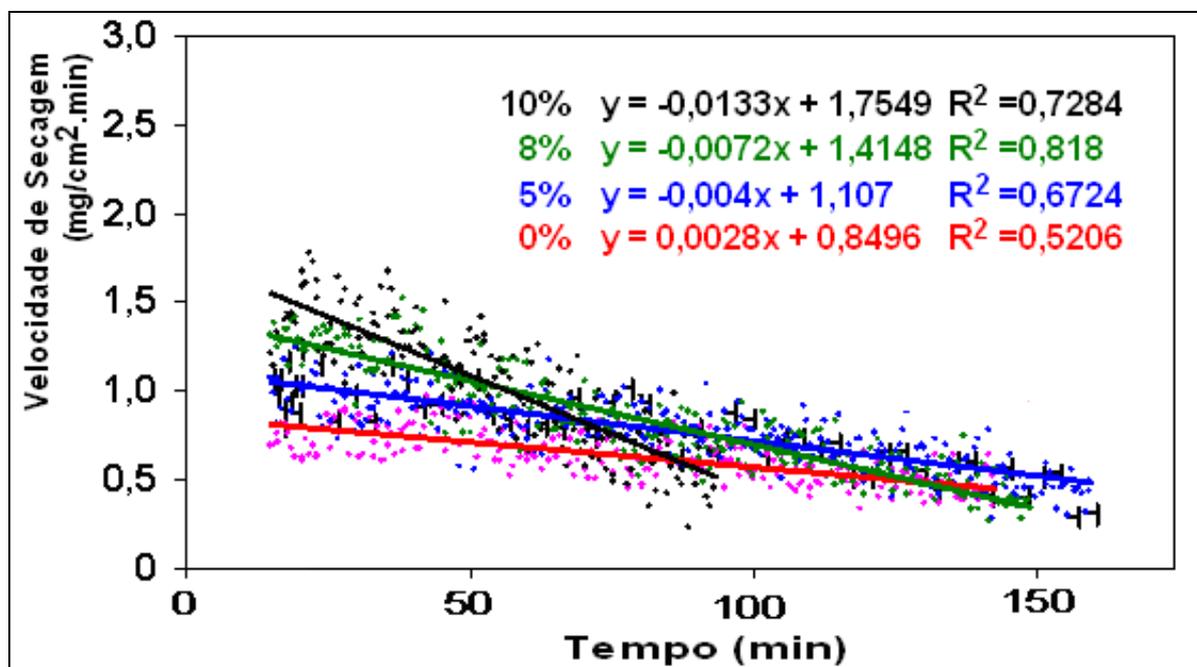


Figura 6.46 - Comparação entre as velocidades de secagem em função do tempo de secagem à temperatura de 50°C para as massas cerâmicas com 0%, 5%, 8% e 10% de chamota em sua formulação.

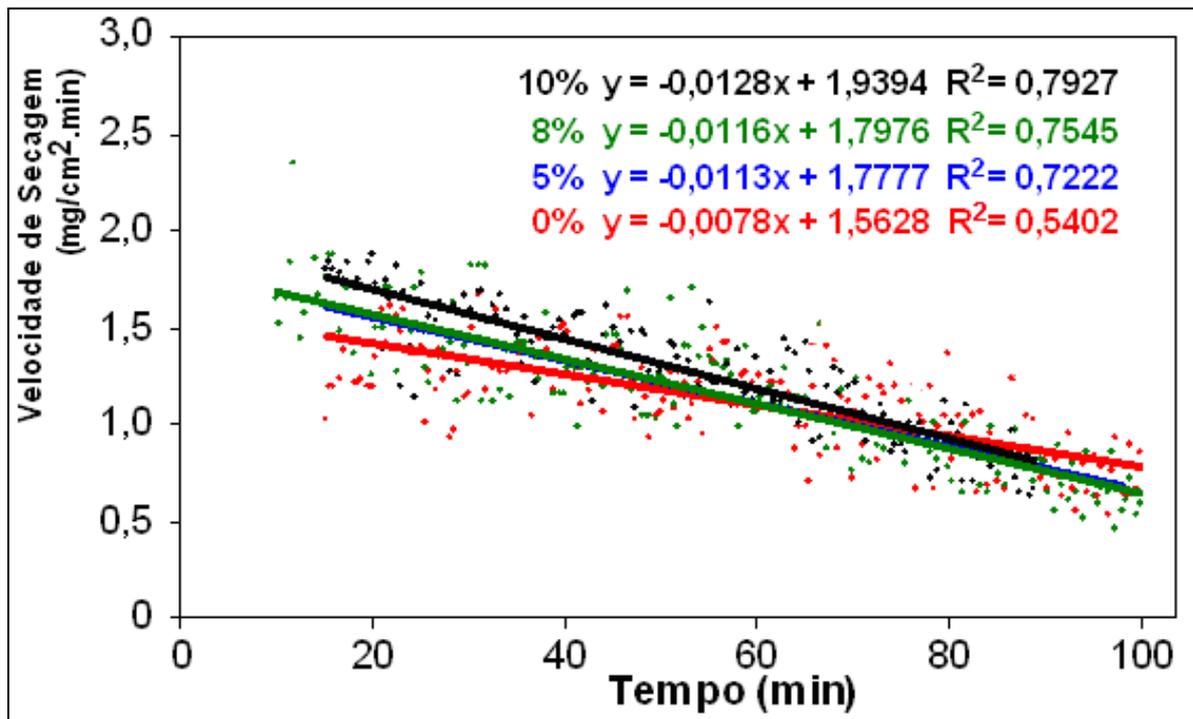


Figura 6.47 - Comparação entre as velocidades de secagem em função do tempo de secagem à temperatura de 60°C para as massas cerâmicas com 0%, 5%, 8% e 10% de chamota em sua formulação.

6.6 AVALIAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM

6.6.1 Perda de massa em função do tempo de secagem

Conforme descrito, a secagem é uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação de materiais cerâmicos, onde a compreensão de seus mecanismos envolvidos permite uma melhor compreensão dos defeitos e da forma de como evitá-los. Segundo Barba, (1997), é na fase II da secagem que a retração é proporcional à perda de massa. Dessa forma, avaliando-se a proporcionalidade das perdas de massa analisadas e também suas velocidades, foi determinado o tempo crítico de secagem ao qual essa proporcionalidade se manteve constante. O gráfico de barras constante na Figura 6.48 relaciona esses tempos críticos de secagem em função da temperatura e do teor de chamota na massa cerâmica. Nota-se que o tempo crítico de secagem diminui à medida que se aumenta a temperatura quando se mantém constante o teor de chamota na massa cerâmica. Essa constatação se caracteriza, devido ao aumento da entalpia do ar circulante sobre os corpos cerâmicos, que tende a acelerar o processo de secagem. Para temperaturas mais baixas, é maior o efeito da chamota na redução do tempo de secagem. Para uma

temperatura de secagem de 40°C, 10% de chamota na massa cerâmica permite reduzir o tempo de secagem na fase II a quase um terço (298 min sem chamota, para 114 min, com 10% de chamota). Para as todas as temperaturas investigadas, o tempo crítico de secagem diminui à medida que se aumenta a quantidade de chamota na massa cerâmica. Esse fenômeno se explica principalmente pela natureza da chamota, por ser partículas sólidas, inertes e não-plástica, o que facilita a saída da água do interior até a superfície, durante o processo de secagem.

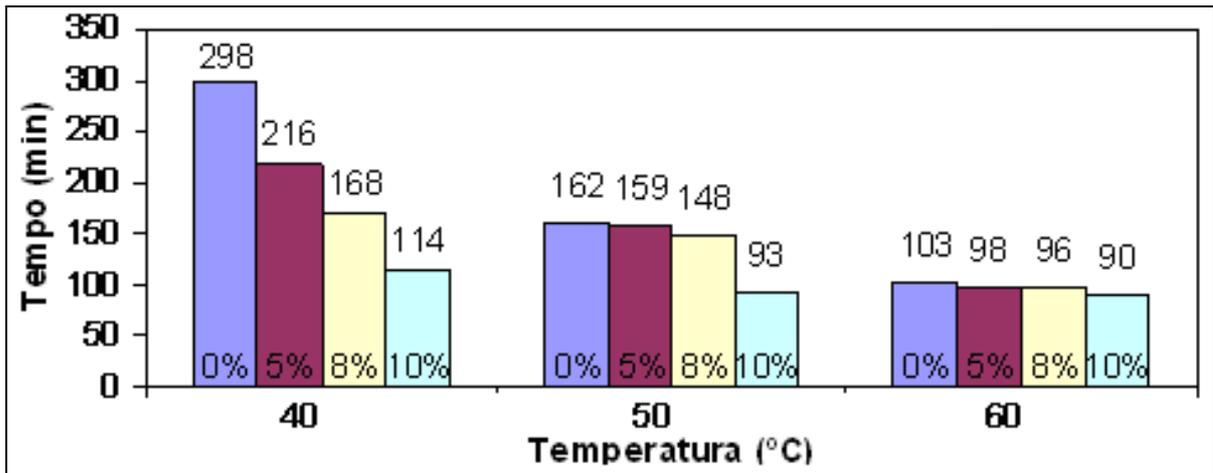


Figura 6.48 - Tempo crítico de secagem na fase de perda de massa constante (fase II), para os diferentes teores nas massas cerâmicas em função da temperatura de secagem.

A Figura 6.49 mostra de forma tridimensional e em superfície esses tempos de secagem, onde se relaciona a velocidade entre as temperaturas de 40°C, 50°, e 60°C e as composições de 0% 5% e 10%.

A partir desses tempos críticos, aplicados às Equação 4.8 e Equação 4.9 (item 4.6), pode-se calcular a velocidade média atuante para cada formulação, vindo a simplificar e facilitar sua aplicação para a estimativa de secagem para os massas cerâmicas investigadas. A tabela 6.1 mostra as equações da velocidade de secagem em função do tempo de acordo com a temperatura e a composição de chamota.

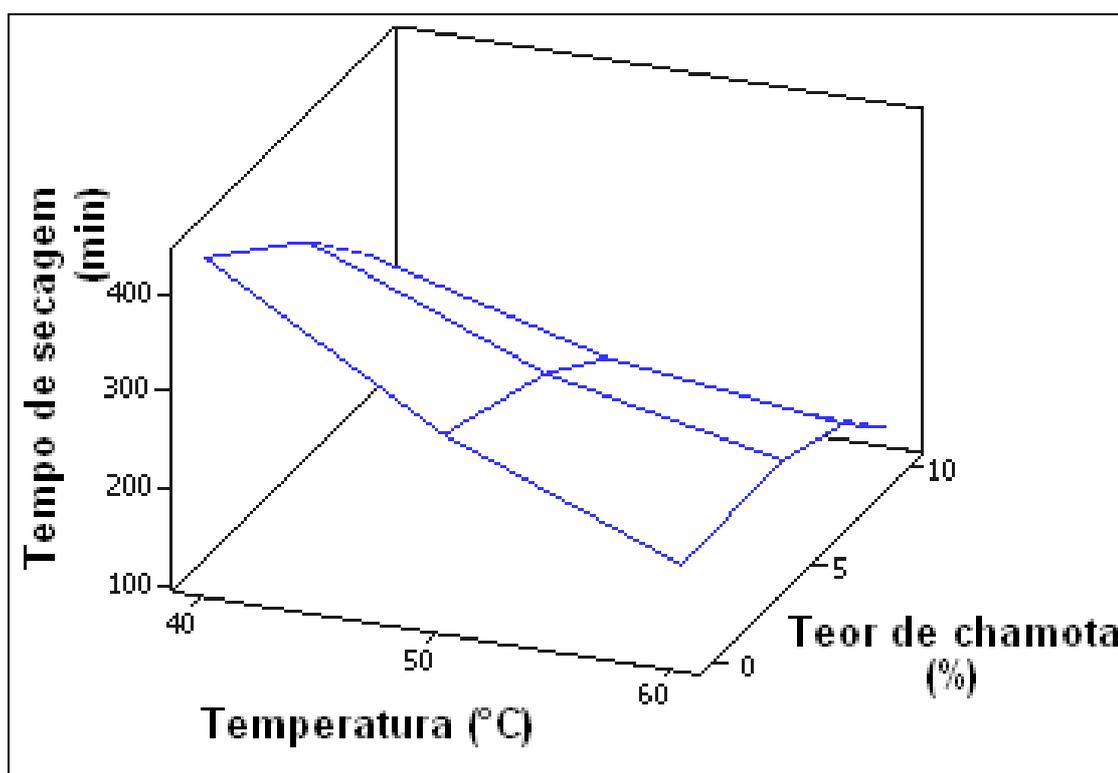


Figura 6.49 - Vista em superfície do tempo de secagem em função da percentagem de chamota e da temperatura de secagem.

Tabela 6.1 - Equações da velocidade de secagem em função do tempo de acordo com a temperatura e a composição de chamota (fase II).

Teor de Chamota (%)	Temperaturas (°C)		
	40	50	60
0	$0,0010 * t + 0,5658$	$0,0028 * t + 0,8496$	$0,0078 * t + 1,5628$
5	$0,0025 * t + 0,8592$	$0,0040 * t + 1,107$	$0,0113 * t + 1,7777$
8	$0,0037 * t + 1,0453$	$0,0072 * t + 1,4148$	$0,0116 * t + 1,7976$
10	$0,0069 * t + 1,3702$	$0,0133 * t + 1,7549$	$0,0128 * t + 1,9394$

O gráfico da Figura 6.50 apresenta um histograma das velocidades médias obtidas, onde se observam que seus valores aumentam à medida que se aumenta a adição da chamota na massa cerâmica, mantendo-se constante a temperatura de secagem. Da mesma forma, para a mesma composição, a velocidade de secagem aumenta em função do aumento da temperatura.

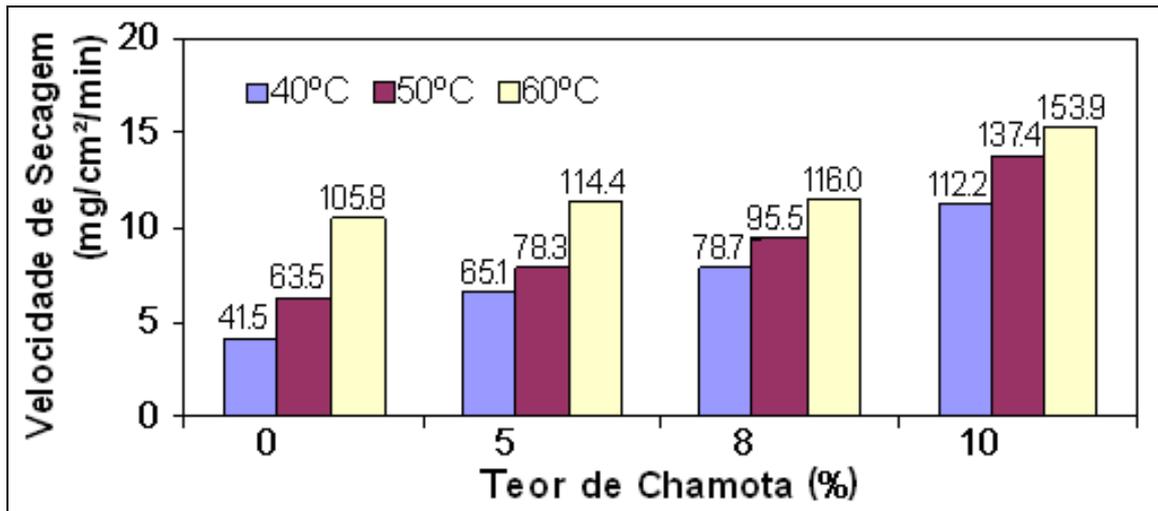


Figura 6.50 - Velocidade média de secagem em função da temperatura e do teor de chamota na massa cerâmica.

De uma forma mais prática, cada velocidade média, de acordo com sua composição e temperatura de secagem, poderá ser representada no gráfico padrão do ciclo de secagem (Figura 4.17), conforme citado por Barba (1977), onde a velocidade média calculada no experimento assume o patamar do gráfico, ou seja, a velocidade de perda de massa constante (fase II).

De posse desses resultados experimentais obtidos para a velocidade média de secagem e desmembrando-se a Equação 4.8, chega-se a Equação 6.1 que serve de base para o cálculo da previsão do tempo de secagem da massa cerâmica investigada, nas condições experimentais aqui praticadas.

$$t_2 - t_1 = \frac{M_d}{A} \int_{w_1}^{w_2} \frac{dW}{V} \quad \text{Equação 6.1}$$

Assim, utilizando-se os valores médios por peça da umidade total (M_d), da área exposta ao meio de secagem (A), bem como da velocidade média experimental (V) e da variação da umidade (dW), conseqüente da umidade final a ser atingida, calcula-se o tempo de permanência das peças no secador para que a secagem atinja o final da segunda fase (perda de massa constante), evitando desperdício de tempo e obtendo-se economia, principalmente de energia consumida no processo. Dessa forma, a Equação 6.1 pode prevê o tempo de secagem para qualquer faixa de umidade que se queira atingir até o seu limite de tempo máximo, considerado como o tempo crítico.

6.6.2 Análise das curvas de Bigot

De forma paralela e visando qualificar o processo de secagem, fez-se necessário o controle da retração dos corpos cerâmicos em função de sua perda de massa. Assim, esse material cerâmico foi medido e pesado ao final da secagem e também após terem sido colocados em estufa. Dessa forma, foram montadas curvas de Bigot (Figuras 6.51, 6.52 e 6.53) para as diversas composições entre argila e chamota quando foram submetidas aos vários ambientes de secagem. O gráfico da Figura 6.51 é utilizado para indicar a separação entre a água de plasticidade e a água intersticial.

Nota-se que à medida que se aumenta a quantidade de chamota na composição, para quaisquer das temperaturas analisadas (40°C, 50°C ou 60°C), diminui a retração da massa cerâmica no final da secagem. Esse fato se explica devido à substituição de partículas mais finas (argila) por partículas maiores (chamota), fazendo com que haja uma facilitação para a evaporação da água de plasticidade. Não menos importante é o fato de a chamota não ter água de plasticidade em seu interior, não sofrendo assim a retração característica de secagem para uma argila.

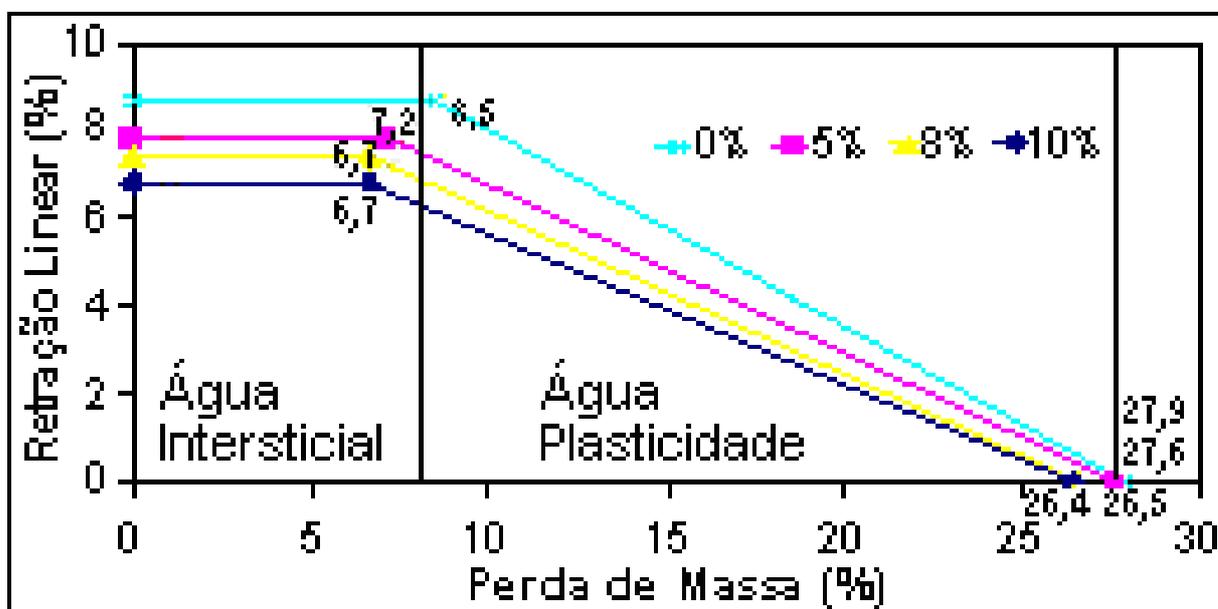


Figura 6.51 - Curva de Bigot para a temperatura de secagem de 40°C.

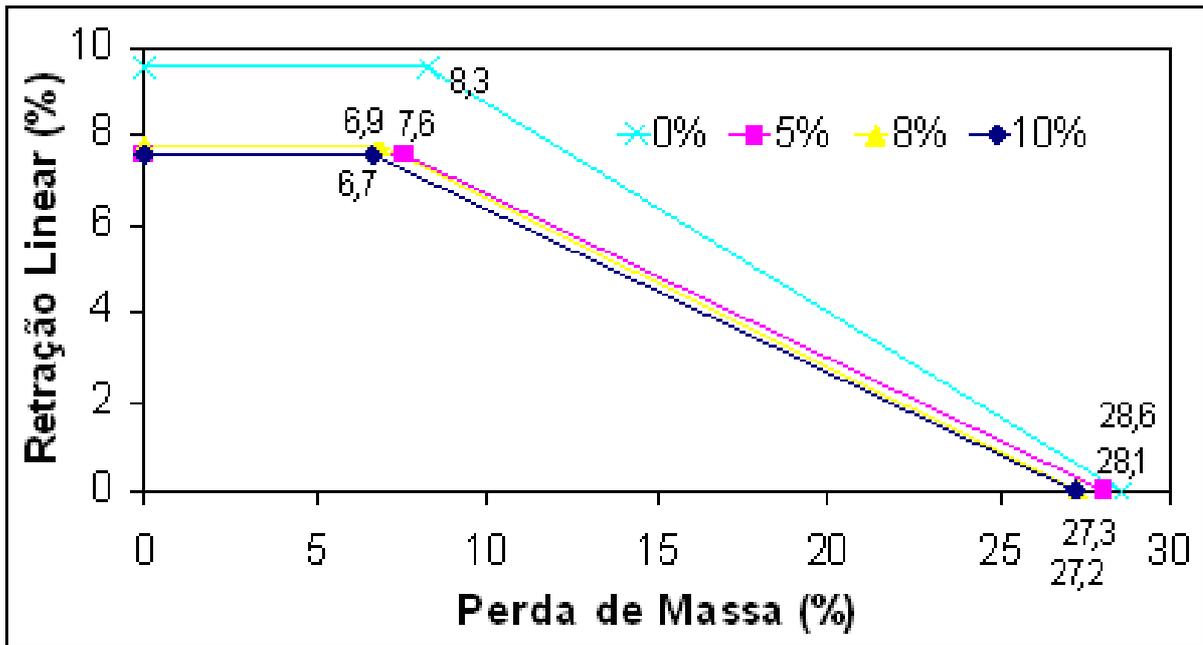


Figura 6.52 - Curva de Bigot para a temperatura de secagem de 50°C.

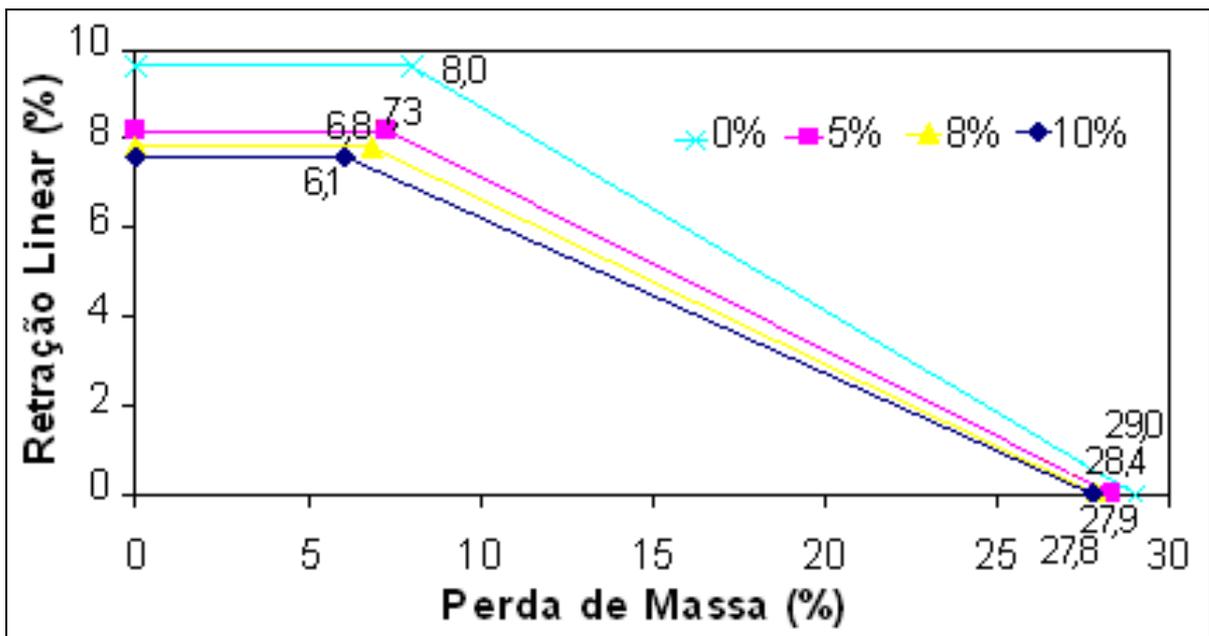


Figura 6.53 - Curva de Bigot para a temperatura de secagem de 60°C.

6.6.3 Resistência Mecânica: Tratamento Estatístico

A Figura 6.54 apresenta os gráficos da análise estatística de Weibull, constando da linearização da resistência mecânica em função da probabilidade para as várias composições, bem como a presença de suas equações de regressão linear. O anexo “F” mostra detalhes dessas curvas, plotadas individualmente.

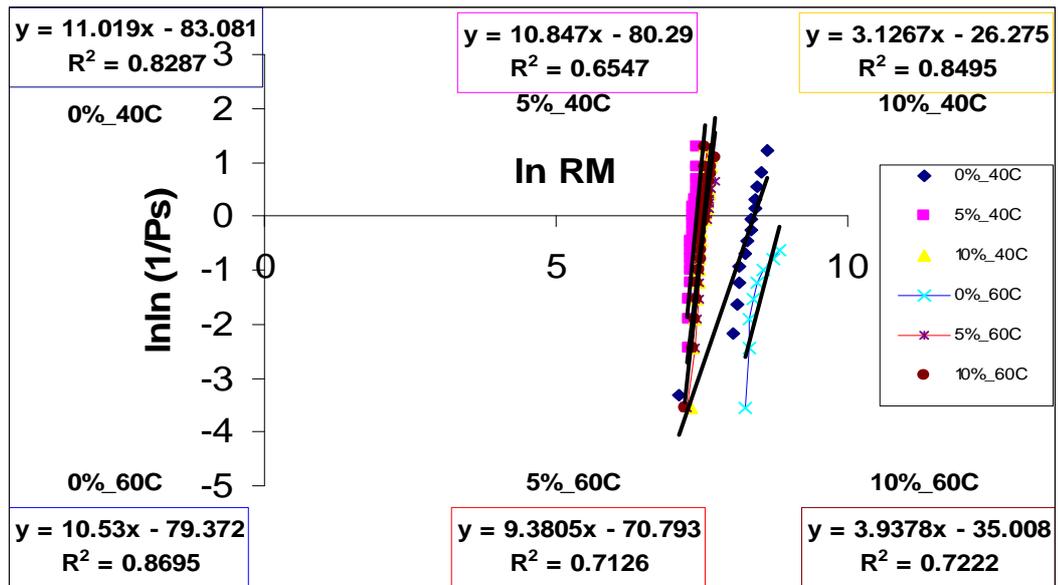


Figura 6.54 - Gráfico da resistência mecânica segundo a distribuição de Weibull.

A partir dessas informações, montou-se a tabela 6.2 onde constam as equações lineares, o módulo adimensional de Weibull (m) e a resistência média mecânica para cada composição.

Tabela 6.2 - Relação do Fator estatístico de Weibull (m) e da resistência média para diversas composições analisadas.

Composições	Equações de Regressão Linear	Fator módulo Weibull (m)	Resistência (MPa)
0%_40°C	$y = 11,019x - 83,081$ $R^2 = 0,83$	10,84	7,47
5%_40°C	$y = 10,847x - 80,29$ $R^2 = 0,65$	11,01	7,3
10%_40°C	$y = 3,1267x - 26,275$ $R^2 = 0,85$	3,12	8,2
0%_60°C	$y = 10,53x - 79,372$ $R^2 = 0,87$	10,53	7,5
5%_60°C	$y = 9,3805x - 70,793$ $R^2 = 0,71$	9,39	7,46
10%_60°C	$y = 3,9378x - 35,008$ $R^2 = 0,72$	3,9	8,84

Nota-se na tabela que a resistência média após a secagem, não tem diferença significativa entre as diversas composições. Porém, os valores do fator de módulo de Weibull (m), diminuíram quando da utilização de 10% de chamota, o que significa que há uma maior dispersão dos valores de resistência, devido provavelmente a uma distribuição mais homogênea dos defeitos na microestrutura

dos corpos de prova, o que leva ao aumento dos pontos de concentração de tensões no entorno dos materiais não plásticos (chamota).

A Figura 6.55 mostra imagem por microscopia óptica, por onde é possível supor essas partículas de chamota atuando como pontos de concentração de tensões, interligando seus grãos, devido a uma série de fatores como é o caso do tamanho, distribuição e percentual de partículas, tendo como consequência maior velocidade de extração de água, diminuindo assim sua resistência.

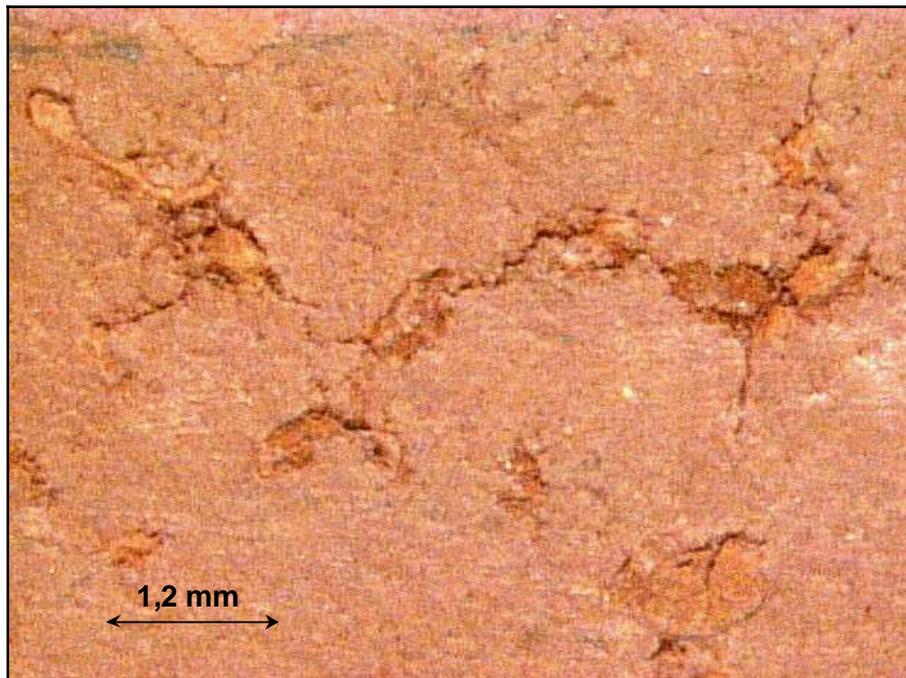


Figura 6.55 - Micrografia por microscopia óptica da massa cerâmica com 10% de chamota, após secagem (VICENZI e BERGMANN, 2009).

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, é possível inferir as seguintes conclusões:

- As equações de previsão do tempo de secagem constituem uma nova forma de monitoração e acompanhamento, que poderão ser utilizadas para massas cerâmicas em função do teor de chamota, submetidas às mesmas condições de secagem, prevendo de modo eficaz e otimizado o momento em que será desativada a fonte térmica de secagem, evitando dessa forma desperdício de tempo e energia;

- As curvas de Bigot, que retratam as relações entre a perda de massa e a retração, representam excelentes indicadores quando de sua utilização, auxiliando de forma direta no entendimento e interpretação dos fenômenos ocorridos no processo de secagem, porém limitando-se a encontrar o tempo exato em que uma fonte de energia térmica possa ser desativada para completar o ciclo de secagem de forma otimizada, pois baseia-se em retração nem sempre fácil de aferir;

- A resistência dos corpos-de-prova, representadas através do método estatístico de Weibull, demonstrou ser um indicador eficaz, no sentido de acompanhar a qualidade dos produtos obtidos após secagem.

- Foi possível desenvolver um aparato experimental para controlar de forma confiável as características psicrométricas do ar, bem como a aferição das perdas de massa registradas durante o processo de secagem dos produtos cerâmicos;

- A velocidade de perda de massa instantânea tende a diminuir de forma retilínea e uniforme, durante a fase conhecida como perda de massa constante (fase II), quando fixadas quaisquer das temperaturas de secagem e também quando fixadas quaisquer das composições entre massa cerâmica e chamota;

- Uma vez fixada a proporção de chamota na massa cerâmica, a diferença entre a velocidade de perda de massa no início e no final da fase II no processo de secagem aumenta à medida que se aumenta a temperatura;

- À velocidade média de secagem aumenta à medida que se aumenta a temperatura, mantendo-se constante a composição entre chamota e massa cerâmica, diminuindo dessa forma o tempo de secagem;

- A velocidade média de secagem aumenta à medida que se aumenta a percentagem de chamota na massa cerâmica, mantendo-se constante a temperatura, diminuindo dessa forma o tempo crítico de secagem;

- As curvas de velocidade de secagem em função do tempo comportaram-se de maneira similar em qualquer das composições analisadas, ou seja, frente às maiores temperaturas de secagem, aumenta-se a velocidade inicial de perda de massa. À medida que o tempo passa, diminui a velocidade de secagem sendo mais intensa essa redução, para as maiores temperaturas.

- Foi possível determinar as equações de previsão do tempo crítico de secagem para o período de perda de massa constante (velocidade média), a partir dos dados coletados durante o processo de secagem.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização deste trabalho, é possível sugerir os seguintes temas para trabalhos investigativos futuros:

- Determinação do tempo crítico de secagem, controlando-se as características psicrométricas do ar, assim como a perda de massa, variando-se a espessura dos corpos-de-prova;

- Determinação das percentagens de contribuição que cada face do corpo-de-prova contribui na secagem do corpo cerâmico, utilizando-se do isolamento das demais faces;

- Estudo de otimização energética e rendimento do sistema de secagem, utilizando-se do balanço de energias atuantes nos materiais cerâmicos, relacionando-a com a energia consumida e com a energia desperdiçada durante do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180/84**.
- ÁLBARO, A. J. L.. **A operação de prensagem**: considerações técnicas e sua aplicação industrial parte IV: Extração da peça e resistência mecânica a verde. Cerâmica industrial, Março/Abril, 2001.
- AMARAL, D. e al., **Custos de secagem de sementes de milho em espigas**. UEM, Paraná, Brasil. (<http://www.sbea.org.br/numero15/trab9.htm>). Acessado em 06/08/2003.
- BARBA, A. e al., **Matérias-Primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**, ITC, Instituto de Tecnología Cerámica, Universitat Jaume I de Castelló, 1977.
- BELTRAN, V., FERRANDO, E., J. GARCIA, J., SÁNCHEZ, E., **Tile & Brick Int.** 11, 3 (1995) 169.
- BROSNAN, A. D., ROBINSON, G.C., **Introduction to Drying of Ceramics**. The American Ceramic Society, Westerville, Ohio, United State of America. 2003.
- BUENO, A. D., LAMBERTS, R., PHILIPPI P.C., **Higroscopicidade em Telhas de Cerâmica: Efeitos sobre o Comportamento térmico**. UFSC Santa Catarina. Acessado em 06/08/2003.
- COSTA, ENIO CRUZ. **Termodinâmica**. Porto Alegre, RS. Ed. Globo S.A. 1977. 259P.
- COSTA, T., LANÇA R. – **Escoamento em Meios Porosos**. Escola Superior de Tecnologia: Universidade do Algarve, 2001. 37 pg.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN W.A., **Solar Engineering of thermal processes**. New York, Ed. John Wiley & Sons, 1980.
- FACINCANI, E. **Tecnología Cerámica – Los Ladrillos**. 2ª ed. Grupo Editoriale Faenza Editrice Ibérica S. L., 1993.
- GRUPO DE FÍSICA NUCLEAR DA MATÉRIA CONDENSADA, **Notas de aula**. Universidade de Coimbra. Lisboa. 2002. (<http://fnmc.fis.uc.pt/ruivilao/ensino/>). Acessado em 08/08/2003.

- GUIMARÃES, D. S., **Desenvolvimento de software para a simulação de secagem a baixas temperaturas**. Dissertação Mestrado. Pelotas, Brasil, 2001.
- HOLMAN, J. P., **Heate transfer**. NewYork, Ed. McGraw-Hill, 1963.
- INNOCENTINI, M.D.M. et all, **Efeito da distribuição granulométrica na secagem de concretos refratários**. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo. Cerâmica vol.47 oct./nov./dec. 2001.
- ISERHARD, J.L.R.F, **Contribuição ao Estudo da Viabilidade da Cura do Concreto por energia Solar**. Dissertação de Mestrado - UFRGS . Porto Alegre, 2000
- KEEY, R. B. **Introduction to industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978, 376 p.
- KINGERY, W. D.. **Introdution to ceramics**. New York, John Wiley & Sons, 1976. p.788.
- MARTINELLI Jr, L.C., **Transferências de Calor – parte I – Unijuí, RS**. 56p.
- MENDES, N. - **Modelos de previsão da transferência de calor e umidade em elementos porosos de edificações** - Tese de doutorado – UFSC, 1997.
- MENG, B. **Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters**. Materials and Structures, v. 27, p. 125-134, 1994.
- MORAES, J. E., **Manual do Gás Natural**. Ed. COASE, 1996.
- PRACIDELLI S., MELCHIADES F. G., **Importância da Composição granulométrica de Massas para a Cerâmica Vermelha, Cerâmica Industrial 02, Jan/Abril, 1997, p. 31-35**.
- QUINTEIRO, E., BOSHI,A. O., PAULA G.R., **Efeito do Teor de Umidade e da Pressão de Prensagem sobre as características de Revestimentos Cerâmicos**. São Carlos, São Paulo Acessado em 06/08/2003. (<http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/>).
- RANDALL M., **Fundamentals of Sintering**. Engineering Science and Mechanics Department, República Federal da Alemanha, 1991. p. 260 – 269.
- REED, J.S., **Introduction to the principles of ceramic processing**. New York. Alfred University. 1988. Ed. John Wiley. 48p.
- ROBINSON GILBERT C. **Introduction to Drying of Ceramics**,

- ROUQUEROL, F., ROUQUEROL, J. **Adsorption by Powders and Porous Solids**, Science Direct, 1999, P. 27-50.
- RUTHVEN, D.M., **Encyclopedia of separation of technology**, 1, Kirk_othmer 1ª.Ed. John Willey & Sons. New York, 1997.
- SANTOS, P.S., **Ciência e Tecnologia de Argilas - Fundamentos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. Ed. Edgard Blücher Ltda, 1989.
- SATO, N. M. N., AGOPYAN, V., **Análise da Porosidade e de Propriedades de transporte de Massa em Concretos**. São Paulo, 1998. (<http://publicacoes.pcc.usp.br/>). Acessado em 06/08/2003.
- SOUZA E SILVA, J. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Universidade Federal de Viçosa. Minas gerais. Ed. Aprenda Fácil, 2000.
- THOMPSON, J. F., **Principles of Rice Drying**. (http://www.kcomfg.com/_docs/PDFs/Principles_of_Rice_Drying.pdf) Acessado em 05/08/2003.
- VICENZI, J., BERGMANN C. P., **Adição de Chamota em uma Massa Cerâmica à Base de Argila Vermelha: Efeito na Secagem Pré-Queima**. Cerâmica Industrial, 14(2) Março/Abril, 2009.

ANEXOS

ANEXO A – Testes relativos ao sistema de vaporização

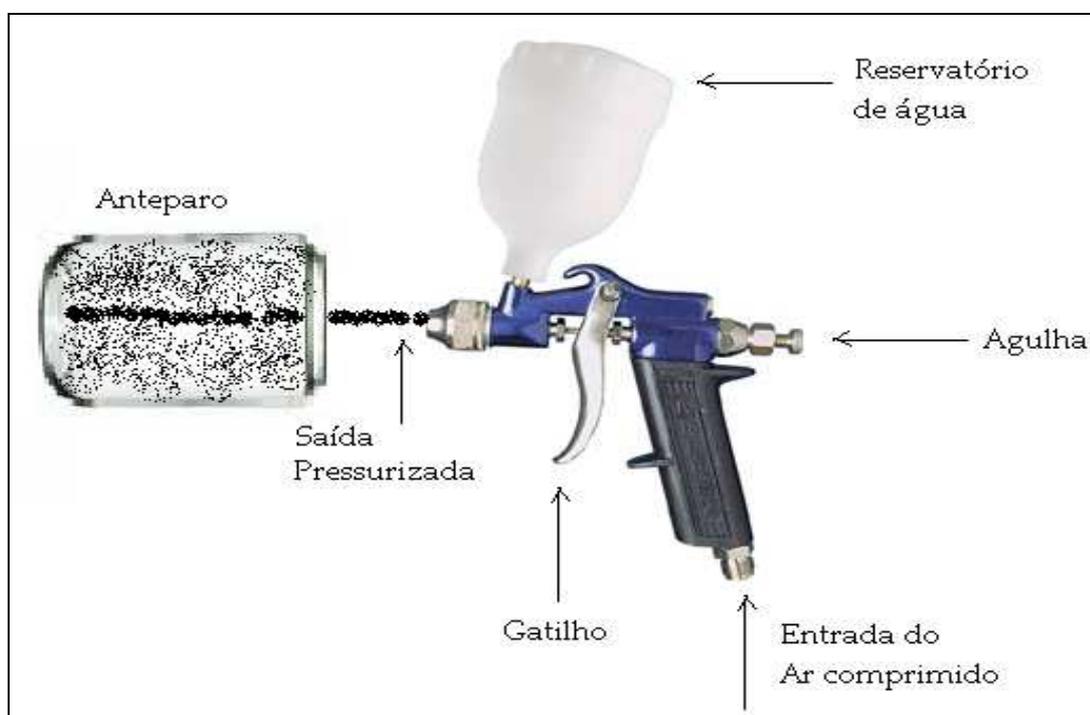


Figura A.1 - Vaporização da água tipo gravidade, aplicada sobre um anteparo.

Os testes basearam-se no princípio de funcionamento da bomba manual de pintura, que fará base do sistema de vaporização. A Figura A-1 mostra essa pistola em detalhes.

O teste de vaporização foi realizado objetivando maximizar, o rendimento em termos de quantidade de vapor. O ar comprimido chega até a pistola, em sua base, quando então é acionado o gatilho. ao mesmo tempo a água cai do reservatório por gravidade. Nesse momento essa água se pressuriza e se transforma em pequenas gotículas, que chocando-se contra um anteparo, transforma-se em vapor. A quantidade de vapor, encontra-se diretamente ligada à regulação da agulha da pistola, que regula o volume de água a cair do reservatório. O gráfico da Figura A-2 informa sobre o rendimento, ou seja, a quantidade do vapor de água gerado em relação ao volume total de água gasto para sua geração, em função da variação da pressão manométrica da câmara de vaporização, após fixação de uma distância entre bomba de evaporação e o anteparo.

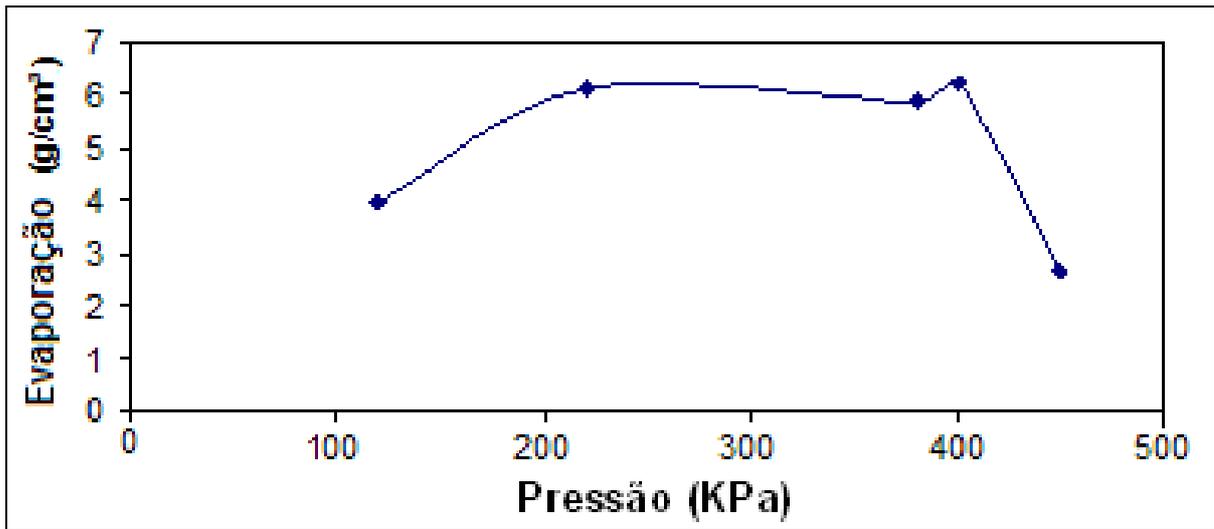


Figura A.2 - Taxa de evaporação da água em função da pressão manométrica.

ANEXO B - Testes de Rendimento do sistema de Secagem

B.1 – Teste do sistema de aquecimento sem material cerâmico

O sistema de aquecimento do ar foi testado de forma isolado e vazio, visando a obtenção de seu melhor rendimento. Foram colocados termopares no interior do sistema de aquecimento (estufa) que uma vez estabilizada sua temperatura, partiu-se para a aferição da temperatura na saída do sistema. Através da relação entre a temperatura de saída com a temperatura no interior do sistema de aquecimento, obteve-se seu rendimento. A Figura B.1 mostra esse rendimento em função da temperatura interna do sistema.

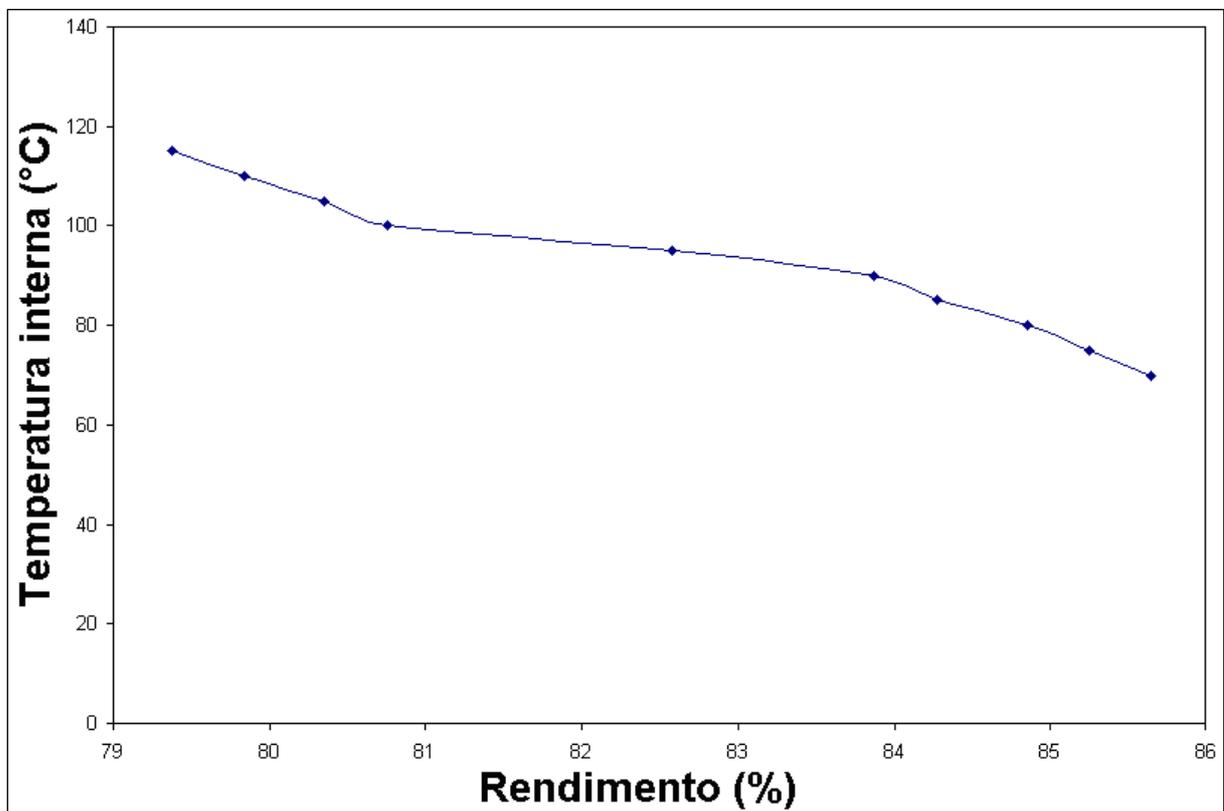


Figura B.1 - Rendimento da câmara de aquecimento.

Conforme pode ser visualizado na Figura B.2, o ar chega ao secador na pressão atmosférica com a temperatura e a umidade relativa na entrada do sistema de aquecimento (ponto 1) ganha entalpia devido seu aquecimento e desloca-se paralelo ao eixo das abcissas (ponto 2). agora dotado de maior temperatura e menor umidade relativa passa pelo corpo-de-prova a ser secado (nesse caso água pura),

removendo a umidade, resfriando-se e aumentando sua umidade relativa cujo deslocamento segue paralelo às linhas de entalpia (ponto 3), carregando consigo a umidade retirada dos materiais cerâmicos, aumentando assim sua razão de mistura e sua pressão parcial de vapor. Essa análise foi realizada a todos os ambientes a que seriam submetidos os corpos cerâmicos a serem secados, permitindo assim consolidar o desempenho e dar credibilidade quando da execução do experimento.

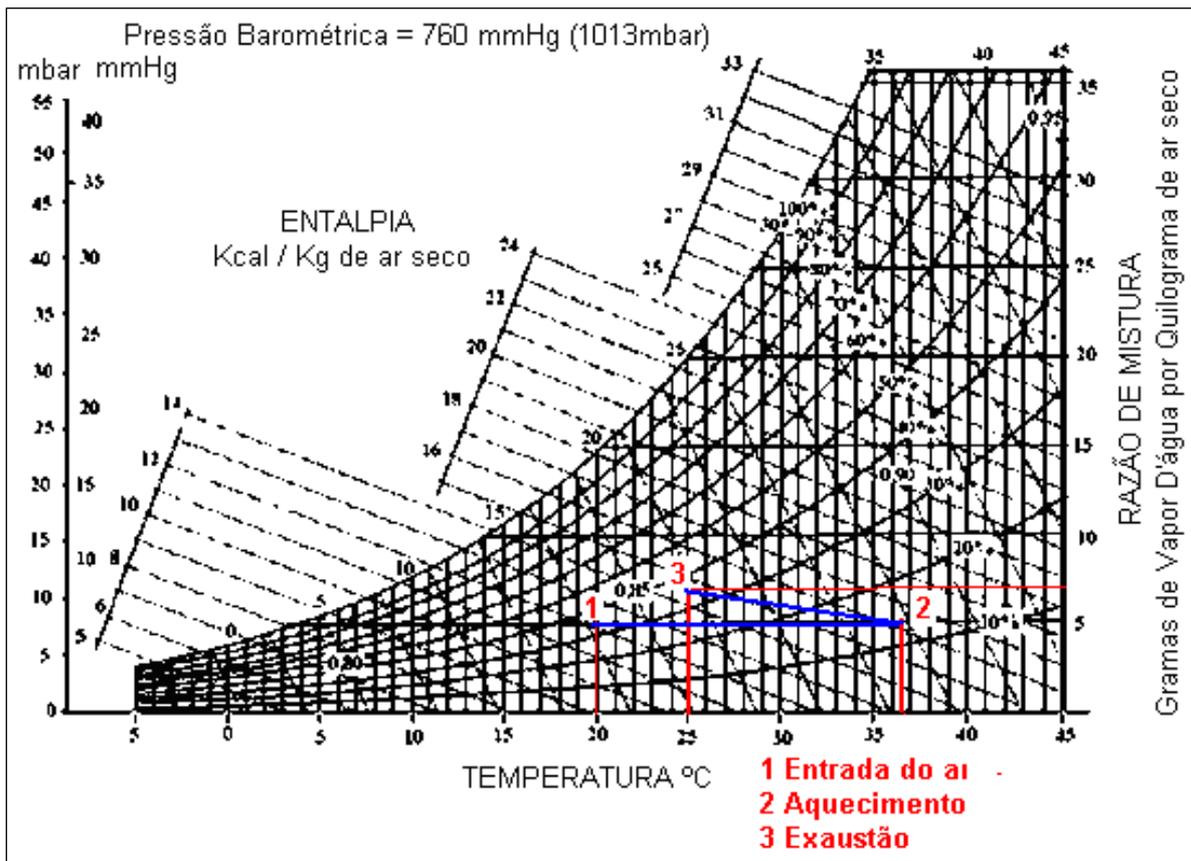


Figura B.2 - Modelo de carta psicrométrica utilizada para avaliação do desempenho do secador.

ANEXO C – Análise no Picnômetro : Argila com 5% de Chamote

Date: 07/11/2008

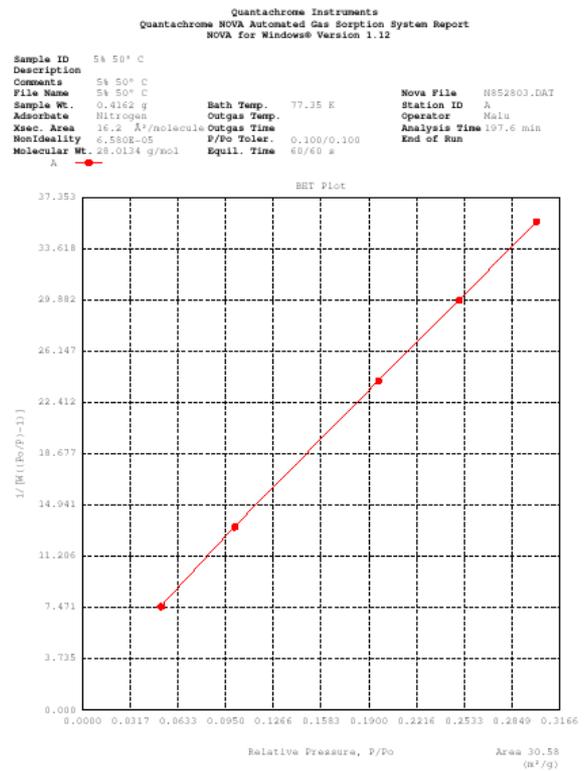
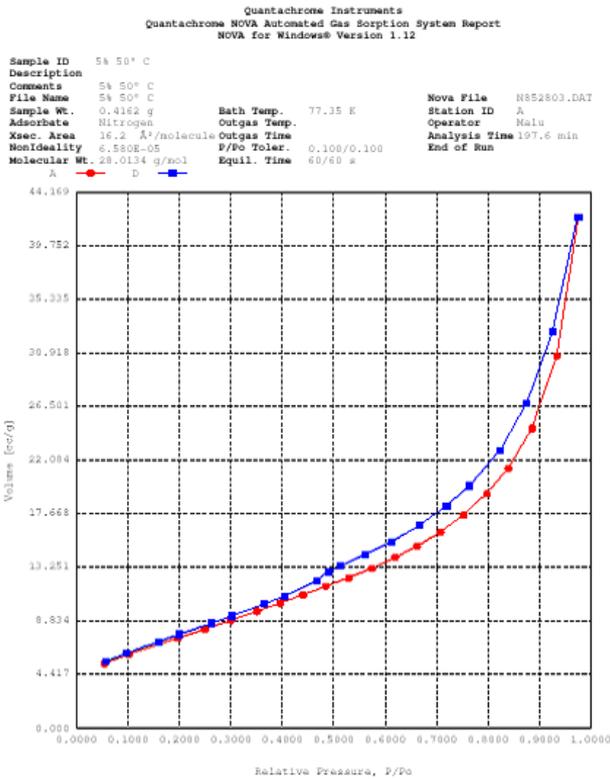
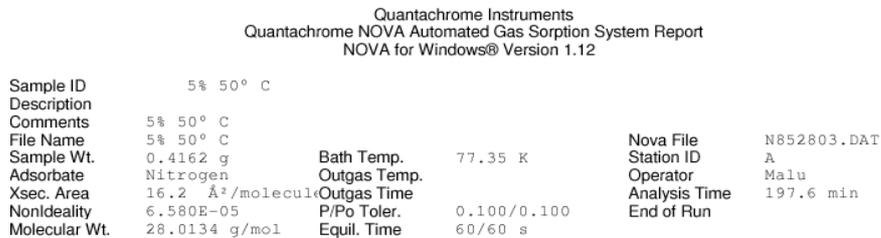


Figura C.1 - a) Adsorção e Dessorção.

b) Adsorção BET

Date: 07/11/2008

Page 1



MULTIPOINT BET

P/Po	Volume [cc/g] STP	1/(W((Po/P)-1))
5.2106e-02	5.8600	7.506E+00
1.0089e-01	6.7431	1.331E+01
1.9654e-01	8.1720	2.395E+01
2.5018e-01	8.9507	2.983E+01
3.0152e-01	9.7093	3.557E+01

Area = 3.058E+01 m²/g
Slope = 1.121E+02
Y - Intercept = 1.835E+00
Correlation Coefficient = 0.999933
C = 6.208E+01

Figura C.2 - Porosidade e área superficial.

ANEXO D – Análise no Picnômetro : Argila com 8% de Chamote

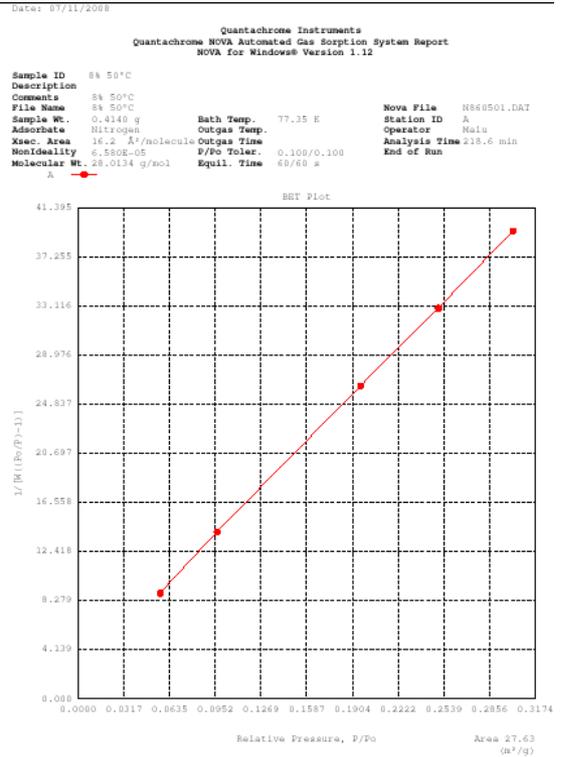
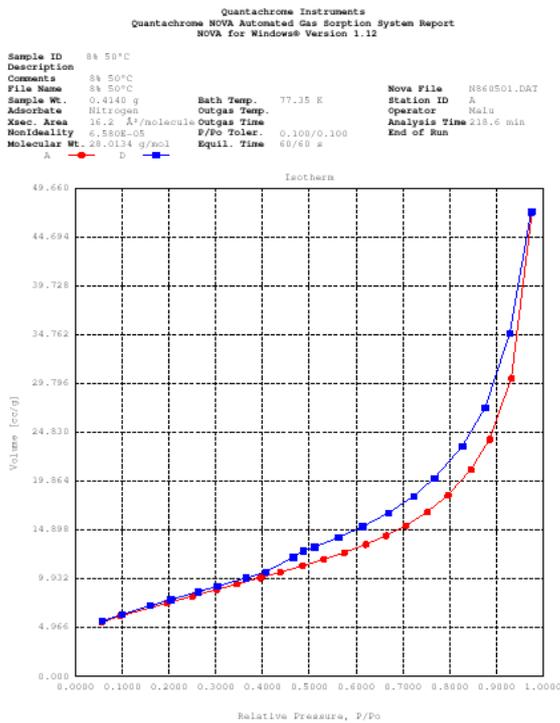


Figura D.1 - a) Adsorção e Dessorção. b) Adsorção BET

Date: 07/11/2008

Page 1

Quantachrome Instruments
Quantachrome NOVA Automated Gas Sorption System Report
NOVA for Windows® Version 1.12

Sample ID	8% 50°C		
Description	8% 50°C		
Comments	8% 50°C		
File Name	8% 50°C		
Sample Wt.	0.4140 g	Bath Temp.	77.35 K
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Temp.	Malu
Xsec. Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	218.6 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler.	0.100/0.100
Molecular Wt.	28.0134 g/mol	Equil. Time	60/60 s
	A	D	B

MULTIPOINT BET

P/Po	Volume [cc/g] STP	1/(W((Po/P)-1))
5.7070e-02	5.4640	8.863E+00
9.6577e-02	6.0968	1.403E+01
1.9654e-01	7.4250	2.636E+01
2.5033e-01	8.1202	3.290E+01
3.0226e-01	8.7919	3.942E+01

Area = 2.763E+01 m²/g

Slope = 1.241E+02

Y - Intercept = 1.905E+00

Correlation Coefficient = 0.999967

C = 6.617E+01

Figura D.2 - Porosidade e área superficial.

ANEXO E – Análise no Picnômetro : Argila com 10% de Chamote

Date: 07/11/2008

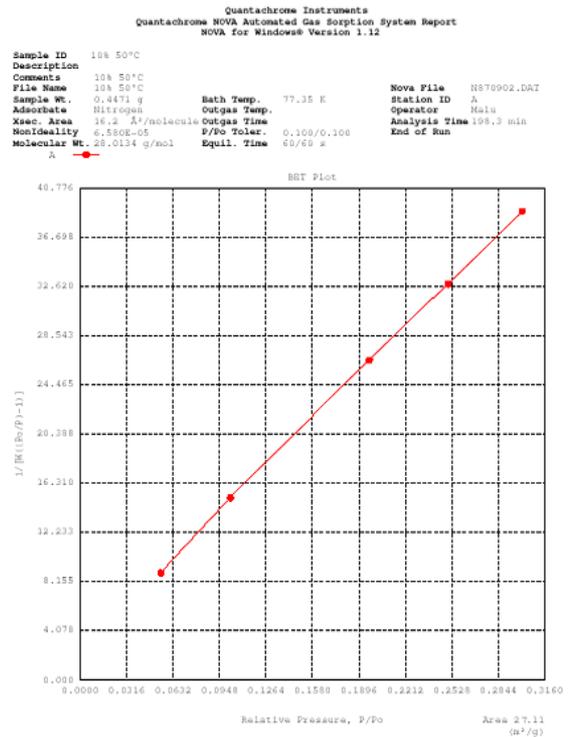
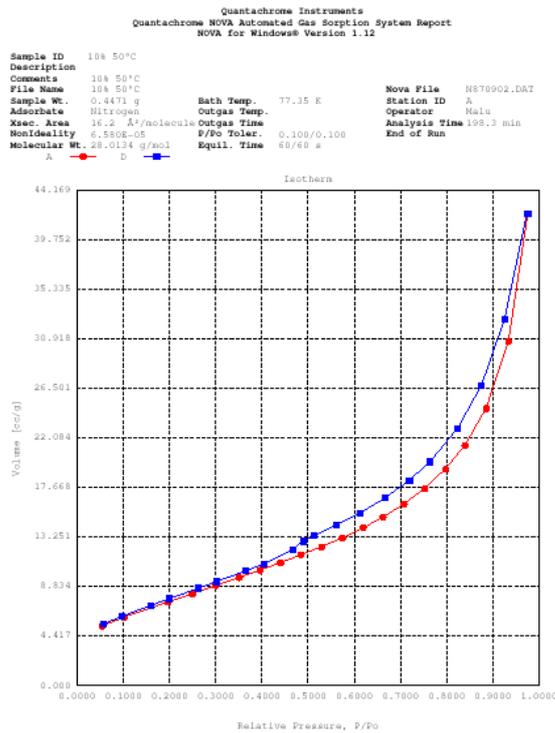


Figura E.1 - a) Adsorção e Dessorção. b) Adsorção BET

Date: 07/11/2008

Page 1

Quantachrome Instruments
Quantachrome NOVA Automated Gas Sorption System Report
NOVA for Windows® Version 1.12

Sample ID	10% 50°C	Nova File	N870902.DAT
Description	10% 50°C	Station ID	A
Comments	10% 50°C	Operator	Malu
File Name	10% 50°C	Analysis Time	198.3 min
Sample Wt.	0.4471 g	Bath Temp.	77.35 K
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Temp.	
Sec. Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler.	0.100/0.100
Nonideality	6.580E-05	Equil. Time	60/60 s
Molecular Wt.	28.0134 g/mol		

MULTIPOINT BET

P/Po	Volume [cc/g] STP	1/(W((Po/P)-1))
5.4949e-02	5.2698	8.828E+00
1.0236e-01	6.0556	1.507E+01
1.9677e-01	7.3977	2.650E+01
2.5017e-01	8.1465	3.277E+01
3.0095e-01	8.8699	3.883E+01

Area = 2.711E+01 m²/g

Slope = 1.215E+02

Y - Intercept = 2.409E+00

Correlation Coefficient = 0.999863

C = 5.143E+01

Figura E.2 - Porosidade e área superficial.

ANEXO F - Análise estatística da resistência mecânica segundo Weibull

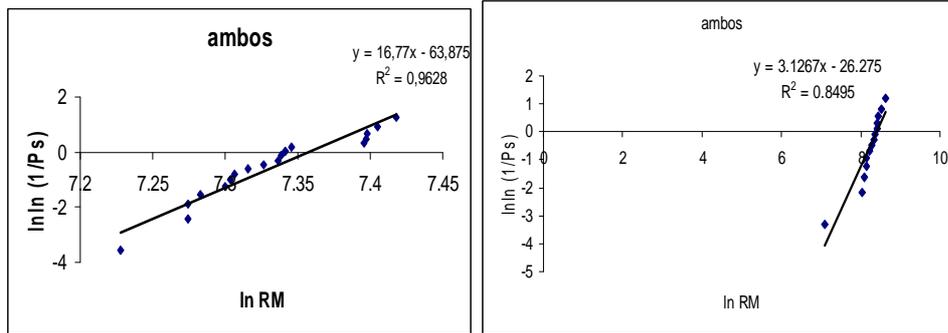


Figura F.1 - a) Resistência 0% 40°C b) Resistência 5% 40°C

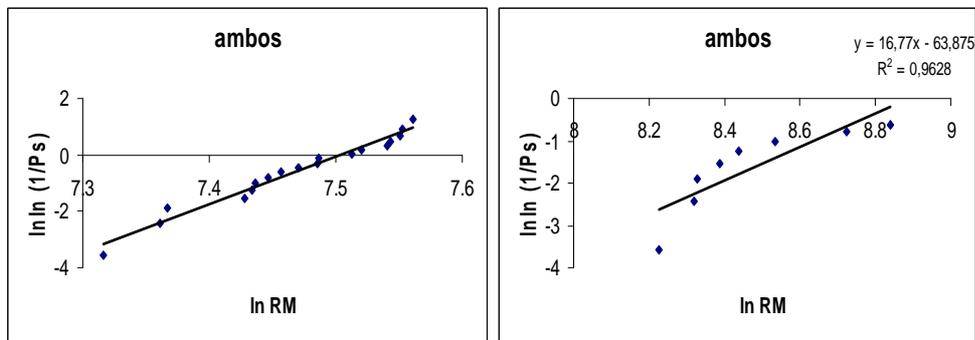


Figura F.2 - a) Resistência 10% 40°C b) Resistência 0% 60°C

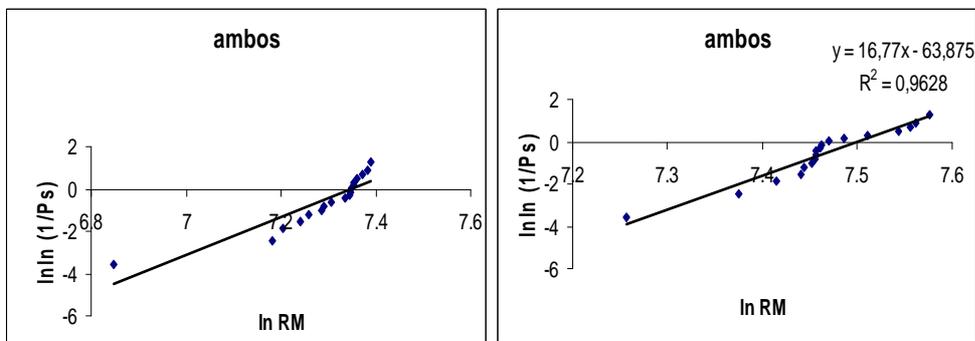


Figura F.3 - a) Resistência 5% 60°C b) Resistência 10% 60°C



Figura F.4 - Detalhe da prensa hidráulica utilizada no corpo-de-prova submetido à flexão a quatro pontos.

ANEXO G - Equações de energia e avaliação do desempenho do secador através do Ensaio em Branco, utilizando-se somente água no interior do secador

Para cálculo da quantidade de calor Q cedida ou retirada (Q_{sar}) a uma certa massa m de água, que está constituída de certo calor específico c e que eleva ou diminui sua temperatura de ΔT utiliza-se a equação fundamental da calorimetria, identificada na Equação g.1: A Tabela G-I nos mostra o calor específico de alguns materiais a 30°C.

$$Q = m \cdot \int c_p \cdot \Delta T \quad (g.1)$$

Tabela G.1 - Tabela com calor específico para a água, ar e argila.

Material	Calor específico (cal/g°C)
Água	1,00
Vapor d'água	0,46
Ar seco	0,24
Argila	0,22

Teoricamente, a variação do calor específico da água e de seu vapor poderão ser negligenciados na faixa de temperatura de secagem, ou seja, adotados como um valor constante para o intervalo (tabela G.1).

O calor latente de vaporização da água (Q) pode ser calculado através do produto entre a massa de água (m_{H_2O}) e o seu calor latente de vaporização da água (L), conforme Equação g.2:

$$Q = m_{H_2O} L \quad (g.2)$$

Partindo-se da equação de equilíbrio entre as energias: cedida pelo ar e absorvida pela água: $g_1 = g_2$, tem-se:

$$m_{ar} c_{ar} (T_o - T_c) = m_{H_2O} L \quad (g.3)$$

onde:

m_{ar} = massa do ar de secagem;

m_{H_2O} = massa de água a ser evaporada;

L = calor latente de vaporização da água.

Em função da utilização prática e experimental através da utilização de ar comprimido, a massa de ar pode ser verificada através da Equação g.4.

$$m_{ar} = v_{ar} \rho_{ar} = \rho_{ar} v_{az} t \quad (g.4)$$

onde:

v_{ar} = volume do ar de secagem;

ρ_{ar} = massa específica do ar de secagem;

v_{az} = vazão ou fluxo fornecido pelo compressor;

t = tempo

Com a Equação g.4 inserida na Equação g.3, foi obtida a Equação g.5, que serviu de base para o acompanhamento dos ensaios preliminares (Ensaio em Branco):

$$\rho_{ar} v_{az} t c_{ar} (T_o - T_c) = L (m_{i_{H_2O}} - m_{f_{H_2O}}) \quad (g.5)$$

onde:

$m_{i_{H_2O}}$ - Massa inicial de água no processo de secagem.

$m_{f_{H_2O}}$ - Massa final de água no processo de secagem

Os ensaios em branco foram realizados para várias temperaturas de secagem, visando aferir o desempenho estabilidade e confiabilidade do sistema de secagem, tendo como elemento de secagem a água. A tabela G.2 mostra um exemplo de um ensaio que serve de modelo específico para os demais ensaios realizados. em suas colunas temos: O termopar T.11 registra a temperatura do ar ambiente. após passar pelo sistema de aquecimento, o ar chegou até a entrada da estufa, conforme registra o termopar T.13. Ao passar pela lâmina de água, no interior da câmara de secagem, os termopares T.10 e T.16 na câmara de exaustão, registraram as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido. Com esses valores foi possível calcular a Umidade relativa, a perda de massa em gramas de água por quilograma de ar. Nas duas últimas colunas da tabela, nota-se o registro das perdas de massa parcial instantânea e acumulada. A constância dos valores para os

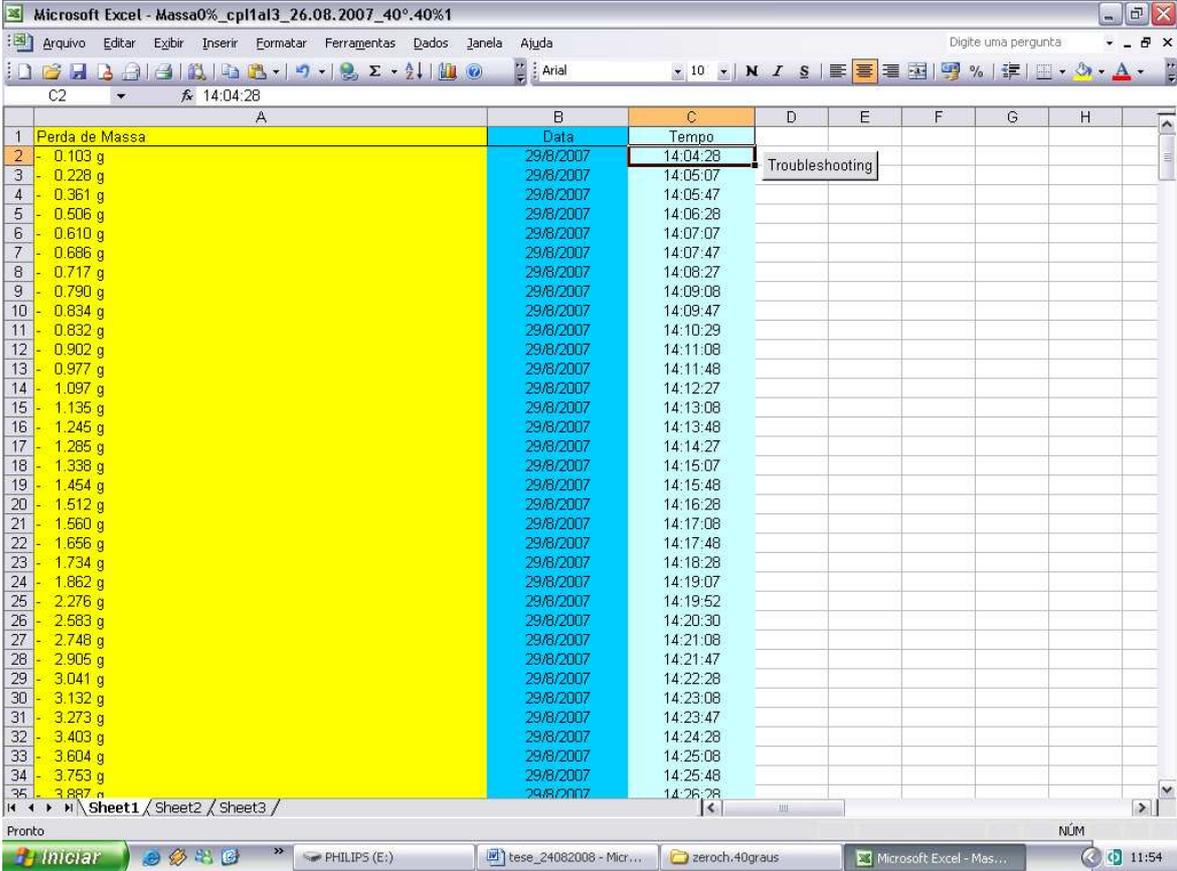
experimentos ao longo do tempo, garantiram a credibilidade do sistema de secagem projetado e desenvolvido para a secagem dos corpos-de-prova cerâmicos, possibilitando o desenvolvimento dos ensaios de maneira confiável.

Tabela G.2 - Modelo utilizado para avaliação do rendimento do sistema de secagem em seus vários ambientes.

		Ensaio de Rendimento do Secador									
		Tbs(ex austão)	Tbs(am biente)	Tbs(se cador)	Tbu(ex austão)	exaustão U.R. (%)	Exaustão Umid.ab s(Kg/Kg)	Exaustão Umidade (g/Kg)	Umidade do Ar (g)	Perda de umidade parcial	Perda de massa acumula
Data	Hora	T10 - °C	T11 - °C	T13 - °C	T15 - °C	psicro	psicro	*1000	Vol.=.107m³ em 3'		
31-Jul-07	11:33:21 AM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.408	2.407
31-Jul-07	11:36:21 AM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.533	2.94
31-Jul-07	11:39:21 AM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.599	3.539
31-Jul-07	11:42:21 AM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.551	4.09
31-Jul-07	11:45:21 AM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.559	4.649
31-Jul-07	11:48:21 AM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.552	5.201
31-Jul-07	11:51:21 AM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.508	5.709
31-Jul-07	11:54:21 AM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.396	6.105
31-Jul-07	11:57:21 AM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.47	6.575
31-Jul-07	12:00:21 PM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.439	7.014
31-Jul-07	12:03:21 PM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.408	7.422
31-Jul-07	12:06:21 PM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.432	7.854
31-Jul-07	12:09:21 PM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.398	8.252
31-Jul-07	12:12:21 PM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.373	8.625
31-Jul-07	12:15:21 PM	24	20	34	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.417	9.042
31-Jul-07	12:18:21 PM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.459	9.501
31-Jul-07	12:21:21 PM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.383	9.884
31-Jul-07	12:24:21 PM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.395	10.279
31-Jul-07	12:27:21 PM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.411	10.69
31-Jul-07	12:30:21 PM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.364	11.054
31-Jul-07	12:33:21 PM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.366	11.42
31-Jul-07	12:36:21 PM	24	20	35	16	42.1	0.0077	7.7	0.82	0.365	11.785

ANEXO H – Modelo utilizado para a coleta da perda de massa em tempo real

Observa-se na coluna A, o registro das perdas de massa em gramas. Já na coluna B consta a data da realização do experimento. por último na coluna C, constam os dados relativos aos momentos em que foram registradas as perdas de massa, no caso, a cada trinta (30) segundos.



The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Perda de Massa	Data	Tempo					
2	- 0.103 g	29/8/2007	14:04:28					
3	- 0.228 g	29/8/2007	14:05:07	Troubleshooting				
4	- 0.361 g	29/8/2007	14:05:47					
5	- 0.506 g	29/8/2007	14:06:28					
6	- 0.610 g	29/8/2007	14:07:07					
7	- 0.686 g	29/8/2007	14:07:47					
8	- 0.717 g	29/8/2007	14:08:27					
9	- 0.790 g	29/8/2007	14:09:08					
10	- 0.834 g	29/8/2007	14:09:47					
11	- 0.832 g	29/8/2007	14:10:29					
12	- 0.902 g	29/8/2007	14:11:08					
13	- 0.977 g	29/8/2007	14:11:48					
14	- 1.097 g	29/8/2007	14:12:27					
15	- 1.135 g	29/8/2007	14:13:08					
16	- 1.245 g	29/8/2007	14:13:48					
17	- 1.285 g	29/8/2007	14:14:27					
18	- 1.338 g	29/8/2007	14:15:07					
19	- 1.454 g	29/8/2007	14:15:48					
20	- 1.512 g	29/8/2007	14:16:28					
21	- 1.560 g	29/8/2007	14:17:08					
22	- 1.656 g	29/8/2007	14:17:48					
23	- 1.734 g	29/8/2007	14:18:28					
24	- 1.862 g	29/8/2007	14:19:07					
25	- 2.276 g	29/8/2007	14:19:52					
26	- 2.583 g	29/8/2007	14:20:30					
27	- 2.748 g	29/8/2007	14:21:08					
28	- 2.905 g	29/8/2007	14:21:47					
29	- 3.041 g	29/8/2007	14:22:28					
30	- 3.132 g	29/8/2007	14:23:08					
31	- 3.273 g	29/8/2007	14:23:47					
32	- 3.403 g	29/8/2007	14:24:28					
33	- 3.604 g	29/8/2007	14:25:08					
34	- 3.753 g	29/8/2007	14:25:48					
35	- 3.887 g	29/8/2007	14:26:28					

Tabela H.1 - Modelo de planilha que representa as perdas de massa quando da secagem dos corpos cerâmicos, registradas em função da data e do tempo.

ANEXO I – Coleta de Temperaturas para cada experimento realizado.

Nota-se na coluna A o registro da data em que foi realizado o ensaio. Na coluna B encontra-se registrado o momento em que as temperaturas foram aferidas. **no caso** foram coletadas a cada 3 minutos. A coluna G registrou as temperaturas do termopar T5, que estava colocado na entrada da câmara de secagem, ou seja, medindo a temperatura do ar atuante diretamente sobre os corpos-de-prova. As colunas L e R, registraram os valores dos termopares T10 e T16, colocados na saída da câmara de secagem (câmara de exaustão) aferindo respectivamente as temperaturas de bulbo seco (Tbs) e temperatura de bulbo úmido (Tbu), cujos valores levam à determinação da Umidade relativa. A coluna O termopar T13, registrou os valores das temperaturas entre os 3 corpos-de-prova, no interior da câmara de secagem. Os demais termopares constantes na planilha registraram a temperatura ambiente.

Tabela I.1 - Modelo de planilha que representa a captação das Temperaturas, quando da secagem dos corpos cerâmicos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1							Termopares 0%chamote_40°C_40%U.R												
2																			
3																			
4																			
5	Data	Hora	T1 - °C	T2 - °C	T3 - °C	T4 - °C	T5 - °C	T6 - °C	T7 - °C	T8 - °C	T9 - °C	T10 - °C	T11 - °C	T12 - °C	T13 - °C	T14 - °C	T15 - °C	T16 - °C	
6	29/8/2007	12:22:11 PM	18	18	19	19	36	19	19	39	18	36	19	18	39	18	22	26	
7	29/8/2007	12:25:11 PM	19	19	19	19	38	19	20	40	18	36	19	18	39	18	22	26	
8	29/8/2007	12:28:11 PM	18	19	19	19	38	19	19	39	18	36	19	18	39	18	22	26	
9	29/8/2007	12:31:11 PM	18	19	19	19	38	19	19	39	18	36	19	18	38	18	22	26	
10	29/8/2007	12:34:11 PM	18	19	19	19	38	19	19	39	19	36	19	18	38	18	22	26	
11	29/8/2007	12:37:11 PM	19	19	19	19	37	19	19	39	18	35	19	18	38	18	22	26	
12	29/8/2007	12:40:11 PM	19	19	19	19	37	19	19	39	18	36	19	18	38	18	22	26	
13	29/8/2007	12:43:11 PM	19	19	19	19	37	19	19	39	18	35	19	18	38	18	22	26	
14	29/8/2007	12:46:11 PM	18	19	19	19	37	19	19	39	18	36	19	18	38	18	22	26	
15	29/8/2007	12:49:11 PM	19	19	19	19	38	19	19	39	18	36	19	18	39	18	22	26	
16	29/8/2007	12:52:11 PM	19	19	19	19	38	19	19	40	18	36	19	18	39	19	22	26	
17	29/8/2007	12:55:11 PM	19	19	19	19	38	19	19	40	18	36	19	18	39	18	22	26	
18	29/8/2007	12:58:11 PM	19	19	19	19	39	19	19	40	18	38	19	18	39	18	22	26	
19	29/8/2007	1:01:11 PM	19	19	19	19	39	19	19	41	18	37	19	19	40	19	21	24	
20	29/8/2007	1:04:11 PM	19	19	19	20	39	20	19	25	19	27	19	19	33	18	21	22	
21	29/8/2007	1:07:11 PM	19	19	19	19	40	20	19	26	18	27	19	19	33	18	21	22	
22	29/8/2007	1:10:11 PM	19	19	19	19	40	19	19	26	18	27	19	18	33	18	21	22	
23	29/8/2007	1:13:11 PM	19	19	19	19	40	19	19	26	18	27	19	19	33	18	21	22	
24	29/8/2007	1:16:11 PM	19	19	19	19	40	20	19	26	18	27	19	19	34	18	21	22	
25	29/8/2007	1:19:11 PM	19	19	19	19	40	19	19	27	18	27	19	19	34	18	21	22	
26	29/8/2007	1:22:11 PM	19	19	19	19	41	19	19	27	18	27	19	18	34	18	21	22	
27	29/8/2007	1:25:11 PM	19	19	19	19	41	19	19	27	18	27	19	18	34	18	21	22	
28	29/8/2007	1:28:11 PM	19	19	19	19	41	19	19	27	19	28	19	19	34	18	21	22	
29	29/8/2007	1:31:11 PM	19	19	19	19	41	19	19	27	18	28	19	19	34	18	21	22	
30	29/8/2007	1:34:11 PM	19	19	19	19	41	20	19	27	19	28	19	19	35	18	21	22	
31	29/8/2007	1:37:11 PM	19	19	19	20	41	20	19	28	19	28	19	19	35	19	21	23	
32	29/8/2007	1:40:11 PM	19	19	20	20	41	20	20	28	19	28	20	19	35	19	21	23	
33	29/8/2007	1:43:11 PM	19	20	20	20	42	20	20	28	19	28	20	19	35	19	21	21	
34	29/8/2007	1:46:11 PM	19	19	20	20	42	20	20	28	19	29	20	19	35	19	21	22	
35	29/8/2007	1:49:11 PM	19	19	20	20	42	20	20	28	19	30	20	19	35	19	21	22	
36	29/8/2007	1:52:11 PM	19	19	19	20	42	20	20	29	19	30	20	19	35	19	21	23	
37	29/8/2007	1:55:11 PM	19	19	20	20	42	20	20	30	19	30	20	19	35	19	21	23	
38	29/8/2007	1:58:11 PM	19	20	20	20	42	20	20	30	19	32	20	19	36	19	21	22	
39	29/8/2007	2:01:11 PM	19	20	20	20	42	20	20	30	19	32	20	19	36	19	21	22	
40	29/8/2007	2:04:11 PM	19	19	20	20	42	20	20	31	19	32	20	19	36	19	21	22	
41	29/8/2007	2:07:11 PM	19	19	20	20	42	20	20	31	19	33	20	19	36	19	21	22	
42	29/8/2007	2:10:11 PM	19	19	20	20	42	20	19	32	19	33	20	19	36	19	21	23	

ANEXO J – Dimensões dos Corpos-de-prova para cada Formulação.

A coluna A contém o número do ensaio. na coluna B encontra-se a identificação do corpo-de-prova. Na coluna C a temperatura (°C) com que foi realizado o ensaio. Nas colunas D e E os pesos: úmido e seco (gramas) no ambiente de secagem. Nas colunas F, G e H, as dimensões (cm) quando úmidos: comprimento, largura e espessura, respectivamente. Colunas I, J e K as dimensões (cm) após a secagem: comprimento, largura e espessura, respectivamente. Coluna L encontra-se o peso (g) após secagem na estufa a 105°C após 24 horas. Colunas M, N e O as dimensões (cm) após sair da estufa: comprimento, largura e espessura, respectivamente.

Tabela J.1 - Modelo de planilha contendo as dimensões e peso dos corpos-de-prova quando úmidos e secos. No caso estão expostos parte dos dados coletados para 5% de chamota 40°C com 40% de umidade relativa.

4	Ensaio	C.P.	Temperatura	Peso		Dimensões(úmido)			Dimensões(seco)			Estufa	Dimensões(Estufa)			Área (Úmido (cm²))
5				úmido	seco	comprimento	largura	espessura	comprimento	largura	espessura	Peso Seco	comprimento	largura	espessura	Área
6		III01	40°	26.5339	19.531	4.94	3.04	1.06	4.59	2.77	0.97	19.002	4.58	2.73	0.94	46
7	61	III02	40°	26.2607	19.5631	4.89	3.03	1.04	4.48	2.73	0.94	18.771	4.4	2.71	0.93	46
8		III03	40°	22.6256	16.7431	4.27	3.03	1.05	3.92	2.74	0.95	16.189	3.92	2.75	0.94	41
9		III04	40°	27.9188	20.7764	5.17	3	1.04	4.72	2.73	0.95	19.936	4.71	2.72	0.94	48
10	62	III05	40°	26.0978	21.2912	5.14	3.03	1.04	4.72	2.73	0.94	20.106	4.72	2.72	0.94	48
11		III06	40°	27.2987	20.643	5.03	2.99	1.04	4.65	2.75	0.95	19.511	4.65	2.72	0.94	46
12		III07	40°	26.4387	19.0256	4.94	3.01	1.04	4.5	2.73	0.94	18.883	4.5	2.72	0.94	46
13	63	III08	40°	26.742	19.2619	4.91	3	1.04	4.52	2.74	0.94	19.077	4.52	2.71	0.93	45
14		III09	40°	27.5194	19.8059	5.06	3.01	1.04	4.64	2.76	0.94	19.665	4.63	2.73	0.93	47
15		III10	40°	27.4885	20.3328	5.02	3.01	1.04	4.64	2.77	0.96	19.697	4.64	2.73	0.94	46
16	64	III11	40°	27.2343	20.632	4.94	3	1.04	4.56	2.76	0.96	19.47	4.56	2.73	0.94	46
17		III12	40°	26.6061	20.0948	4.83	3.02	1.03	4.46	2.73	0.97	19.032	4.46	2.73	0.95	45
18		III13	40°	26.8847	20.2897	5.08	3.04	1.03	4.68	2.78	0.95	20.018	4.68	2.72	0.94	47
19	65	III14	40°	27.1645	19.7533	4.98	3.03	1.03	4.58	2.76	0.95	19.412	4.58	2.72	0.94	46
20		III15	40°	27.0831	19.6827	4.95	3.05	1.05	4.55	2.75	0.96	19.377	4.55	2.73	0.96	46
21		III16	40°	27.1006	20.2724	5.14	3.04	1.05	4.78	2.76	0.95	20.134	4.78	2.73	0.94	48
22	66	III17	40°	26.4945	20.5116	5.22	3.06	1.05	4.84	2.74	0.95	20.351	4.84	2.73	0.94	49
23		III18	40°	27.1235	20.3046	5.16	3.02	1.03	4.74	2.74	0.95	20.154	4.74	2.73	0.94	48
24		III19	40°	26.833	19.3882	4.89	3	1.04	4.55	2.75	0.96	19.1	4.55	2.74	0.94	45
25	67	III20	40°	26.7192	19.4876	4.9	3.01	1.03	4.57	2.75	0.96	19.114	4.59	2.72	0.94	45
26		III21	40°	26.9835	19.756	4.98	3	1.04	4.56	2.75	0.97	19.36	4.59	2.73	0.95	46

GLOSSÁRIO

Entalpia: refere-se à energia, ou seja, numa mistura de ar seco com vapor d'água será a energia contida nesse ar úmido, por unidade de massa de ar seco, correspondente a uma determinada temperatura de referência. Em termos práticos, interessa a diferença de entalpia, em relação à entalpia absoluta.

Pressão de vapor: consiste na pressão exercida pelo vapor de água, cuja intensidade depende de sua concentração. A quantidade de vapor em determinada atmosfera é limitada para o valor de cada temperatura, onde temperaturas mais elevadas permitem uma maior quantidade de vapor em relação a temperaturas mais baixas. O ar diz-se saturado quando possui quantidade máxima de vapor para determinada temperatura, sendo que a pressão correspondente é dita máxima ou de saturação. Caso a pressão não seja suficiente para saturar o ar, tem-se a pressão parcial de vapor.

Razão de mistura: consiste na relação entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco, para dado volume da mistura.

Temperatura de bulbo seco: temperatura medida diretamente com um termômetro comum ou termopar.

Temperatura de bulbo molhado: temperatura medida através da utilização de um termômetro ou termopar, coberto com um tecido embebido em água.

Temperatura do ponto de orvalho: temperatura que o ar úmido torna-se saturado, ou seja, o vapor d'água começa a condensar-se, devido a um processo de resfriamento.

Com relação à umidade (massa de vapor d'água), relacionam-se as seguintes propriedades:

Umidade específica: consiste na relação entre a massa de vapor d'água e a massa do ar úmido.

Umidade absoluta: consiste na relação entre a massa de vapor d'água e o volume ocupado pelo ar úmido.

Volume específico: refere-se ao volume de vapor, ocupado por unidade de massa de ar seco.

Umidade relativa: consiste na relação entre a pressão parcial de vapor exercida pelas moléculas de água presentes no ar e a pressão de saturação, na mesma temperatura¹, cujas equações são informadas abaixo:

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo P_v dado pela equação 2

$$P_v = p_{vsm} - [A.P.(T - T_m)] \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

- P_v = Pressão de vapor d'água no ar (mmHg);
- P_{vsm} = Pressão máxima de vapor na temp. bulbo molhado, (mmHg);
- A = Constante psicrométrica, $6,7 \times 10^4$ °C;
- P = Pressão atmosférica local, (mmHg);
- T = Temperatura do ar, (°C);
- T_m = Temperatura de bulbo molhado, (°C).
- P_{vs} = pressão de vapor saturado, (mbar);

$$P_{vs} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad (\text{Equação 3})$$

onde P_{vs} = pressão de vapor saturado, (mbar);

T = temperatura do ar, °C.

$$P_{vsm} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5T_m}{237,3+T_m}} \quad (\text{Equação 4})$$

onde P_{vsm} = pressão máxima de vapor, (mbar);

T_m = temperatura de bulbo molhado, °C.

A umidade relativa pode ainda ser determinada analiticamente, uma vez conhecida a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho, pelas equações abaixo citadas. ¹:

¹ SOUZA E SILVA, J. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Universidade Federal de Viçosa. Minas gerais. Ed. Aprenda Fácil, 2000.

$$UR = \exp \left\{ 5417 \cdot \left[\left(\frac{1}{T} \right) - \left(\frac{1}{T_{po}} \right) \right] \right\} \quad (\text{Equação 5})$$

onde:

UR = Umidade relativa do ar;

T = Temperatura do ar, K;

T_{po} = Temperatura do ponto de orvalho, K.

Uma forma mais simples de se calcular a umidade relativa do ar consiste na utilização da Equação 6.

$$UR(\%) = \frac{RM}{RM_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

onde:

RM = Razão de mistura existente;

$RM_{m\acute{a}x}$ = Razão de mistura máxima.

IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada.