

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM SECADOR CONTÍNUO TIPO
TÚNEL UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

WILLIAN ANDERSON LEHMKUHL

Florianópolis, Dezembro de 2004.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM SECADOR CONTÍNUO TIPO
TÚNEL UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**

WILLIAN ANDERSON LEHMKUHL

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

**ESPECIALIDADE CIÊNCIAS TÉRMICAS
sendo aprovada em sua forma final**

Vicente de Paulo Nicolau, Dr. - Orientador

José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

José Antônio Bellini da Cunha Neto – Dr. Presidente

Anselmo Ortega Boschi, Ph.D. - UFSCar

Orestes Estevan Alarcon – Dr. Eng.

**“Não há nenhum mérito em sermos melhores do que os outros.
O verdadeiro mérito consiste em sermos melhores
do que éramos”.**

**Aos meus pais Silvio e Rose,
aos meus irmãos Robson e Sylvia e,
a minha namorada Zaira,
dedico este trabalho
e os dias que passei longe deles.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Vicente de Paulo Nicolau, mistagogo e paracleto nas horas decisivas.

Ao “elemento” Rafael Fernando Hartke, por compartilhar de sua iniciativa e inteligência privilegiadas; aos companheiros de jornada Alessandro Pedro Dadan, Lúcio Souto da Fonseca, Tales Gottlieb Jahn e Wagner Mitio Kawaguti, pela troca de idéias e experiências, pelo aprendizado e expectativas comuns.

Aos meus colegas do LabCET, pelo grande apoio e companheirismo ao longo dos últimos anos; ao grande ser humano Heitor Camargo e ao colega Luis Eduardo de Lima Kido, que tantas vezes deixaram de seus afazeres para arrumarem a nossa rede de computadores.

Aos profissionais e bolsistas do LabTermo, Edevaldo Reinaldo, Everton, Diego Weber, Rodolfo de Lorenzi, Talita Possamai e Vinícius Fornazieri, pelos ensinamentos, camaradagem e toda a ajuda prestada.

À Universidade Federal de Santa Catarina, aos seus profissionais e colaboradores, pelo convívio e pelas oportunidades oferecidas, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica. Aos professores da banca examinadora, pelas sugestões, críticas e pela contribuição final que deram ao trabalho.

À RedeGásEnergia, pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa. Ao Prof. Arno Bollmann, que com sua visão de futuro e grande habilidade, pavimentou o caminho para a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico na área do gás natural em Santa Catarina.

À Cerâmica Heinig, de Brusque-SC e à Cerâmica Candelária, de Candelária-RS, por acreditarem nos resultados de nosso trabalho e por permitirem a nossa interferência em seus equipamentos.,

Àqueles que, discreta ou anonimamente, direta ou indiretamente, contribuíram para a consecução deste trabalho.

SUMÁRIO

SIMBOLOGIA	xi
RESUMO	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. HISTÓRIA DA CERÂMICA.....	18
1.3. DEFINIÇÃO DE CERÂMICA	20
1.3.1. CLASSIFICAÇÃO	20
1.4. PANORAMA ENERGÉTICO DA INDÚSTRIA CERÂMICA.....	21
1.5. PANORAMA DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA NACIONAL	26
1.6. INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA EM SANTA CATARINA	28
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1. MATÉRIAS-PRIMAS PARA CERÂMICA VERMELHA.....	30
2.2. COMPOSIÇÃO DAS ARGILAS	31
2.3. ADITIVOS	31
2.4. MASSAS CERÂMICAS.....	32
2.5. PROCESSO PRODUTIVO DA CERÂMICA VERMELHA.....	32
2.6. A ETAPA DE SECAGEM	35
2.6.1. UMIDADE RESIDUAL	35
2.6.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA VELOCIDADE DE SECAGEM	38
2.6.3. MEIOS DE SECAGEM.....	39
2.7. SECADORES	42
2.7.1. SECADORES CONTÍNUOS TIPO TÚNEL.....	43
2.7.2. REGULAGEM DE SECADORES CONTÍNUOS	44
2.7.3. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NOS SECADORES CONTÍNUOS.....	46
2.8. NOVAS TECNOLOGIAS.....	47
2.8.1. SECADORES CONTÍNUOS RÁPIDOS.....	47
2.8.2. SECAGEM EM AUTOCLAVE: <i>AIRLESS DRYING</i>	48
2.9. FENÔMENO DA SECAGEM DA ARGILA.....	50
2.9.1. INTRODUÇÃO.....	50
2.9.2. FASES DA SECAGEM.....	52
2.9.3. RETRAÇÃO	52
2.10. RACHADURAS E DESCOLORAÇÃO	52
2.10.1. INTRODUÇÃO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	57

2.10.2. REDUZINDO A SUSCETIBILIDADE ÀS FISSURAS DE SECAGEM	57
2.10.3. OCORRÊNCIA DA DESCOLORAÇÃO DE SECAGEM.....	61
2.10.4. CONCLUSÃO.....	65
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	66
3.1. ESTUDO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE ARGILA	66
3.1.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	66
3.1.2. APARATO EXPERIMENTAL	67
3.1.3. RESULTADOS	68
3.1.4. DISCUSSÃO.....	72
3.2. MEDIÇÕES EM CAMPO.....	73
3.2.1. CURVAS DE SECAGEM.....	73
3.3. REFORMA DE UM SECADOR	76
3.3.1. INTRODUÇÃO.....	76
3.3.2. ALTERAÇÕES NO SECADOR.....	79
3.4. SECAGEM E PRODUÇÃO.....	84
3.5. BALANÇO TÉRMICO DO SECADOR.....	85
3.6. CONCLUSÃO	86
CAPÍTULO 4 -ANÁLISE NUMÉRICA	87
4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA	87
4.1.1. METODOLOGIA	87
4.1.2. BALANÇOS DE ENERGIA.....	87
4.1.3. BALANÇOS DE MASSA	102
4.1.4. BALANÇO GLOBAL DE ENERGIA	105
4.2. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	107
4.2.1. ERRO NUMÉRICO DO BALANÇO GLOBAL E TOLERÂNCIA	107
4.3. RESULTADOS OBTIDOS COM O PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	109
4.3.1. RESULTADOS NUMÉRICOS	109
4.3.2. CONDIÇÕES OPERACIONAIS ALTERNATIVAS.....	115
4.4. O COEFICIENTE DE DIFUSÃO.....	120
4.5. DISCUSSÃO.....	123
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - ENERGIA TÉRMICA CONSUMIDA NA FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	23
FIGURA 1.2 - ENERGIA TÉRMICA UTILIZADA NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA.....	23
FIGURA 1.3 – OFERTA INTERNA DE ENERGIA NO BRASIL	25
FIGURA 1.4 – MÉDIA DA OFERTA INTERNA DE ENERGIA NO MUNDO	25
FIGURA 1.5 – USOS DO GÁS NATURAL NO BRASIL	26
FIGURA 1.6 – CONCENTRAÇÃO DAS EMPRESAS DE CERÂMICA VERMELHA EM SANTA CATARINA	28
FIGURA 2.1 - FLUXOGRAMA APLICADO AOS PROCESSOS PRODUTIVOS	35
FIGURA 2.2. – REABSORÇÃO DE UMIDADE PELO PRODUTO SECO.....	37
FIGURA 2.3. – REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA A SECO.	37
FIGURA 2.4 – CONDIÇÕES TERMOHIGROMÉTRICAS INTERNAS EM SECADORES CONTÍNUOS.	45
FIGURA 2.5 - SECADOR TIPO AUTOCLAVE.	48
FIGURA 2.6 – CICLO DE UM SECADOR TIPO AUTOCLAVE.	49
FIGURA 2.7 – GRADIENTE DE UMIDADE NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA PEÇA.....	51
FIGURA 2.8 – TRINCAS NA ZONA DE MAIOR RETRAÇÃO.	52
FIGURA 2.9 – FASES DA SECAGEM: CURVA DE SECAGEM E DIAGRAMA DE SCHERWOOD.	54
FIGURA 2.10 – FASES DA RETRAÇÃO	55
FIGURA 2.11 – CURVA DE BIGOT	56
FIGURA 2.12 – QUOCIENTE ENTRE A TENSÃO SUPERFICIAL E A VISCOSIDADE CINEMÁTICA.	59
FIGURA 2.13 – SECAGEM COM DIFERENTES TEMPERATURAS-LIMITE DE RESFRIAMENTO.	60
FIGURA 2.14 – ESCÓRIAS DE SECAGEM EM TIJOLOS.	62
FIGURA 2.15 – DIFUSÃO NO SENTIDO DO GRADIENTE DE CONCENTRAÇÃO.	63
FIGURA 2.16 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM NA DESCOLORAÇÃO.	64
FIGURA 3.1- TIPO DE AMOSTRAS PREPARADAS.....	67
FIGURA 3.2 – APARATO EXPERIMENTAL.	68
FIGURA 3.3 – CURVA DE SECAGEM OBTIDA COM DIFERENTES CONTEÚDOS INICIAIS DE ÁGUA.....	69
FIGURA 3.4 – TAXAS DE SECAGEM OBTIDAS COM DIFERENTES CONTEÚDOS INICIAIS DE ÁGUA.....	69
FIGURA 3.5 – INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA CURVA DE SECAGEM	70
FIGURA 3.6 – INFLUÊNCIA DA CARGA DE COMPACTAÇÃO NA CURVA DE SECAGEM.....	71
FIGURA 3.7 - TAXAS DE SECAGEM OBTIDAS PARA DIFERENTES CARGAS DE COMPACTAÇÃO.....	71
FIGURA 3.8 – SECADORES DA CERÂMICA CANDELÁRIA - RS	73
FIGURA 3.9 – SECADOR DA CERÂMICA HEINIG - SC	73
FIGURA 3.10 – PESAGEM DAS AMOSTRAS NAS MEDIÇÕES EM CAMPO.....	74
FIGURA 3.11 - CURVA DE SECAGEM DAS PEÇAS. INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO DIRETA.	74
FIGURA 3.12 - CURVA DE SECAGEM DE PEÇAS. INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR.....	76
FIGURA 3.13 – MEDIÇÃO DA UMIDADE RELATIVA.	78

FIGURA 3.14 – UMIDADE RELATIVA DA ATMOSFERA DO SECADOR E VARIAÇÃO DA MASSA DA AMOSTRA.	78
FIGURA 3.15 – CONFIGURAÇÃO ORIGINAL DO SECADOR.	80
FIGURA 3.16 – CONFIGURAÇÃO ATUAL DO SECADOR.	80
FIGURA 3.17 – SITUAÇÃO 1: SECAGEM NA CONFIGURAÇÃO ORIGINAL.	81
FIGURA 3.18 – SITUAÇÃO 2: SECAGEM APÓS AS MODIFICAÇÕES.	81
FIGURA 3.19 – VISTA LATERAL DO SECADOR ATUAL.	82
FIGURA 3.20 – VISTA SUPERIOR DO SECADOR, MOSTRANDO O FLUXO DE CARGA E O FLUXO DOS GASES.	82
FIGURA 3.21 – SITUAÇÃO 2: CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO SECADOR APÓS AS REFORMAS.	83
FIGURA 3.22 – PERFIS DE TEMPERATURA: 1- ANTES DA REFORMA; 2- APÓS A REFORMA.	83
FIGURA 4.1 - BALANÇO DE ENERGIA DE UM ELEMENTO DE CARGA.	88
FIGURA 4.2 - BALANÇO DE ENERGIA DE UM ELEMENTO AR.	89
FIGURA 4.3 - BALANÇO DE ENERGIA DAS SUPERFÍCIES DA PAREDE LATERAL.	96
FIGURA 4.4 - BALANÇO DE ENERGIA DAS SUPERFÍCIES DA PAREDE SUPERIOR.	99
FIGURA 4.5 - BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE INTERNA DA PAREDE INFERIOR.	101
FIGURA 4.6 - BALANÇO DE MASSA DA CARGA DE PEÇAS.	102
FIGURA 4.7 - BALANÇO DE MASSA DO AR.	105
FIGURA 4.8 - PROCESSO DE CONVERGÊNCIA DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO.	108
FIGURA 4.9 - TEMPERATURA DA CARGA AO LONGO DO SECADOR.	111
FIGURA 4.10 - UMIDADE RELATIVA DO AR NO INTERIOR DO SECADOR.	112
FIGURA 4.11 - TEMPERATURAS DA CARGA PARA DIVERSAS VAZÕES DE AR QUENTE.	116
FIGURA 4.12 - UMIDADE RELATIVA NO INTERIOR DO SECADOR PARA DIVERSAS VAZÕES DE AR QUENTE.	117
FIGURA 4.13 - VAZÃO DE LÍQUIDO NO INTERIOR DO SECADOR PARA DIVERSAS VAZÕES DE AR QUENTE.	117
FIGURA 4.14 - VAZÃO DE VAPOR NO INTERIOR DO SECADOR PARA DIVERSAS VAZÕES DE AR QUENTE.	118
FIGURA 4.15 - PARCELA DE ENERGIA CONSUMIDA NA MUDANÇA DE FASE DE LÍQUIDO PARA VAPOR.	119
FIGURA 4.16 - DIFERENÇA DE ENERGIA DO AR SECO ENTRE A ENTRADA E SAÍDA DO SECADOR.	119
FIGURA 4.17 - PARCELA DA DIFERENÇA DE ENERGIA DO AR SECO CONSUMIDA NA EVAPORAÇÃO.	120
FIGURA 4.18 - VAZÃO DE LÍQUIDO NO INTERIOR DO SECADOR PARA DIVERSOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO.	121
FIGURA 4.19 - VAZÃO DE VAPOR NO INTERIOR DO SECADOR PARA DIVERSOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO.	121
FIGURA 4.20 - UMIDADE RELATIVA NO INTERIOR DO SECADOR PARA DIVERSOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO.	122
FIGURA 4.21 - POTÊNCIA CONSUMIDA NA EVAPORAÇÃO PARA DIVERSOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO.	123

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – PESO DA ENERGIA NOS CUSTOS DO SETOR DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO (SC).....	22
TABELA 1.2 – DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA NA FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS (SC).....	22
TABELA 1.3 – CONSUMO MUNDIAL DE GÁS NATURAL.....	24
TABELA 1.4 – RESUMO DO PANORAMA DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA NACIONAL.....	27
TABELA 1.5 - PANORAMA DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA NACIONAL.....	29
TABELA 2.1- CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SECADORES CONTÍNUOS.....	46
TABELA 2.2 – PERCENTUAL DE ÁGUA DO PONTO CRÍTICO.....	56
TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS PREPARADAS.....	67
TABELA 3.2- EFICIÊNCIA DA SECAGEM ANTES E DEPOIS DA REFORMA DO SECADOR.....	84
TABELA 3.3 – AUMENTO DE PRODUÇÃO DO SECADOR APÓS A REFORMA.....	85
TABELA 3.4 – RESUMO DOS BALANÇOS DE MASSA DE AR E DE ENERGIA – SITUAÇÃO 1: ANTES DA REFORMA.....	86
TABELA 3.5 – RESUMO DOS BALANÇOS DE MASSA DE AR E DE ENERGIA – SITUAÇÃO 2: APÓS A REFORMA.....	86
TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO SECADOR SIMULADO.....	110
TABELA 4.2 - ENTRADAS DE ENERGIA NO SECADOR. SIMULAÇÃO-PADRÃO.....	112
TABELA 4.3 - SAÍDAS DE ENERGIA NO SECADOR. SIMULAÇÃO-PADRÃO.....	113
TABELA 4.4 – CONSUMO ESPECÍFICO DO SECADOR. SIMULAÇÃO-PADRÃO.....	113
TABELA 4.5 – ENTRADAS DE ENERGIA NO SECADOR REAL.....	114
TABELA 4.6 – SAÍDAS DE ENERGIA NO SECADOR REAL.....	114
TABELA 4.7 – CONSUMO ESPECÍFICO DO SECADOR REAL.....	114
TABELA 4.8 – COMPARATIVO DAS SIMULAÇÕES.....	115
TABELA 4.9 – CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA DE UM SECADOR CONTÍNUO TIPO TÚNEL.....	115

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

Símbolo	Significado	Unidade
$altura_{in}$	Altura interna do secador	m
$A_{carga,superior}$	Área superior da carga	m ²
$A_{carga,lateral}$	Área lateral da carga	m ²
$A_{carga,total}$	Área total da carga	m ²
$A_{esquerda,in}$	Área da superfície interna da parede lateral esquerda	m ²
$A_{esquerda,out}$	Área da superfície externa da parede lateral esquerda	m ²
$A_{esquerda,med}$	Área da superfície média da parede lateral esquerda	m ²
$A_{direita,in}$	Área da superfície interna da parede lateral direita	m ²
$A_{direita,out}$	Área da superfície externa da parede lateral direita	m ²
$A_{direita,med}$	Área da superfície média da parede lateral direita	m ²
$A_{superior,in}$	Área da superfície interna da parede superior	m ²
$A_{superior,out}$	Área da superfície externa da parede superior	m ²
$A_{superior,med}$	Área da superfície média da parede superior	m ²
$A_{inferior,in}$	Área da superfície interna da parede inferior	m ²
cp_{ar}	Calor específico do ar	J/kg K
cp_{carga}	Calor específico da carga	J/kg K
cp_{liq}	Calor específico do líquido	J/kg K
cp_{vapor}	Calor específico do vapor	J/kg K
$difusao(i, j)$	Coefficiente de difusão de vapor da peça para o ar no vol. i, j	kg/m ² ·s
$espessura_{esquerda}$	Espessura da parede lateral esquerda	m
$espessura_{direita}$	Espessura da parede lateral direita	m
$espessura_{superior}$	Espessura da parede superior	m
$espessura_{inferior}$	Espessura da parede inferior	m
$entalplv(i, j)$	Entalpia de vaporização da água no volume de controle i, j	J/kg K
$fator_{forma\ da\ terra}$	Fator de forma da terra (de um sólido semi-infinito)	m
h	Coefficiente de transmissão de calor por convecção	W/m ² K
$h_{carga}(i, j)$	h carga no volume de controle i, j	W/m ² K
$h_{esquerda,in}(i)$	h da superf. interna da parede lateral esquerda no volume i	W/m ² K
$h_{esquerda,out}$	h da superfície externa da parede lateral esquerda	W/m ² K

$h_{\text{direita,in}}(i)$	h da superfície interna da parede lateral direita no volume i	W/m ² K
$h_{\text{direita,out}}$	h da superfície externa da parede lateral direita	W/m ² K
$h_{\text{superior,in}}(i)$	h da superfície interna da parede superior no volume i	W/m ² K
$h_{\text{superior,out}}$	h da superfície externa da parede superior	W/m ² K
$h_{\text{inferior,in}}(i)$	h da superfície interna da parede inferior no volume i	W/m ² K
$largura_{\text{in}}$	Largura interna do secador	m
m_{carga}	Vazão de carga no volume de controle	kg/s
$m_{\text{liq}}(i, j)$	Vazão de líquido no volume de controle i, j	kg/s
$m_{\text{evap}}(i, j)$	Vazão de evaporado no volume de controle i, j	kg/s
$m_{\text{evap,total}}(i)$	Vazão total de evaporado no volume de controle i	kg/s
$m_{\text{ar}}(i)$	Vazão de ar no volume de controle i	kg/s
$m_{\text{ar,in}}(i)$	Entrada de ar transversal no volume de controle i	kg/s
$m_{\text{ar,out}}(i)$	Saída de ar transversal no volume de controle i	kg/s
$m_{\text{vapor}}(i)$	Vazão de vapor no volume de controle i	kg/s
$m_{\text{vapor,in}}(i)$	Entrada de vapor transversal no volume de controle i	kg/s
$m_{\text{vapor,out}}(i)$	Saída de vapor transversal no volume de controle i	kg/s
$p_{\text{sat,carga}}(i, j)$	Pressão do vapor sat. interface liq.-vap. da carga no volume i, j	Pa
$p_{\text{sat,ar}}(i)$	Pressão de saturação do vapor no ar no volume de controle i	Pa
$p_{\text{sup,ar}}(i)$	Pressão do vapor superaquecido no ar no volume de controle i	Pa
$p_{\text{sat,amb}}$	Pressão de saturação do vapor no ar ambiente	Pa
$p_{\text{sup,amb}}$	Pressão do vapor superaquecido no ar ambiente	Pa
$qt_{\text{in,carga}}$	Taxa de energia total entrando com a carga	W
$qt_{\text{in,liq}}$	Taxa de energia total entrando com o líquido	W
$qt_{\text{in,ar}}$	Taxa de energia total entrando com o ar	W
$qt_{\text{in,vapor}}$	Taxa de energia total entrando com o vapor	W
$qt_{\text{in,ar in}}$	Taxa de energia total entrando com o ar lateral	W
$qt_{\text{in,vapor in}}$	Taxa de energia total entrando com o vapor lateral	W
qt_{in}	Taxa de energia total entrando no secador	W
$qt_{\text{out,carga}}$	Taxa de energia total saindo com a carga	W
$qt_{\text{out,liq}}$	Taxa de energia total saindo com o líquido	W
$qt_{\text{out,ar}}$	Taxa de energia total saindo com o ar	W
$qt_{\text{out,vapor}}$	Taxa de energia total saindo com o vapor	W

$qt_{out,ar\ out}$	Taxa de energia a total saindo com o ar lateral	W
$qt_{out,vapor\ out}$	Taxa de energia total saindo com o vapor lateral	W
$qt_{out,entalplv}(i, j)$	Taxa de energia consumida pela evaporação no volume i, j	W
$qt_{out,entalplv}$	Taxa de energia total consumida pela evaporação de líquido	W
$qt_{out,esquerda\ out}(i)$	Taxa de energia saindo pela sup. externa parede esquerda	W
$qt_{out,esquerda\ out}$	Taxa de energia total saindo pela sup. externa da parede esq.	W
$qt_{out,direita\ out}(i)$	Taxa de energia saindo pela sup. externa da parede direita	W
$qt_{out,direita\ out}$	Taxa de energia total saindo pela sup. externa da parede direita	W
$qt_{out,superior\ out}(i)$	Taxa de energia saindo pela sup. externa da parede superior	W
$qt_{out,superior\ out}$	Taxa de energia total saindo pela sup. externa do teto	W
$qt_{out,inferior\ out}(i)$	Taxa de energia saindo pela sup. interna da parede inferior	W
$qt_{out,inferior\ out}$	Taxa de energia total saindo pela superfície interna do piso	W
qt_{out}	Taxa de energia total saindo no secador	W
$tijolos_{vagoneta}$	Número de tijolos por vagoneta	-
$T_{carga}(i, j)$	Temperatura da carga no volume de controle i, j	K
$T_{ar}(i)$	Temperatura do ar no volume de controle i, j	K
$T_{ar,carga}(i, j)$	Diferença de temp. entre o ar e a carga no volume i, j	K
$T_{ar,in}(i)$	Temp. do ar entrando transversalmente no volume i, j	K
T_{amb}	Temperatura do ambiente externo ao secador	K
T_{terra}	Temperatura da terra abaixo do secador	K
T_{ref}	Temperatura de referência	K
$T_{parede,in}(i)$	Temp. da superfície interna da parede lateral no volume i, j	K
$T_{parede,out}(i)$	Temp. da superfície externa da parede lateral no volume i, j	K
$T_{superior,in}(i)$	Temp. da superfície interna da parede superior no volume i, j	K
$T_{superior,out}(i)$	Temp. da superfície externa da parede superior no volume i, j	K
$T_{inferior,in}(i)$	Temp. da superfície interna da parede inferior no volume i, j	K
$vagonetas_{dia}$	Número de vagonetas entrando no secador por dia	-
$(T_L - T_R)$	Diferença psicrométrica de temperatura	K
y	Conteúdo de água (relativo à massa do produto seco)	%
$w_{sat,carga}(i, j)$	Umidade abs. interface líquido-vapor da carga no volume i, j	kg/kg
$w_{ar}(i)$	Umidade absoluta do ar no volume de controle i	kg/kg
w_{amb}	Umidade absoluta do ar ambiente	kg/kg

Alfabeto Grego:

Símbolo	Significado	Unidade
α	Coeficiente de condutividade hidráulica	kg _w /m.s
ϵ_{carga}	Emissividade da carga	-
$\epsilon_{\text{esquerda, in}}$	Emissividade da superfície interna da parede lateral esquerda	-
$\epsilon_{\text{esquerda, out}}$	Emissividade da superfície externa da parede lateral esquerda	-
$\epsilon_{\text{direita, in}}$	Emissividade da superfície interna da parede lateral direita	-
$\epsilon_{\text{direita, out}}$	Emissividade da superfície externa da parede lateral direita	-
$\epsilon_{\text{superior, in}}$	Emissividade da superfície interna da parede superior	-
$\epsilon_{\text{superior, out}}$	Emissividade da superfície externa da parede superior	-
$\epsilon_{\text{inferior, in}}$	Emissividade da superfície interna da parede inferior	-
$\mu(T)$	Viscosidade dinâmica da água	kg/m.s
k_{esquerda}	Condutividade térmica da parede lateral esquerda	W/mK
k_{direita}	Condutividade térmica da parede lateral direita	W/mK
k_{superior}	Condutividade térmica da parede superior	W/mK
k_{inferior}	Condutividade térmica da parede inferior	W/mK
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² .K ⁴
$\sigma(T)$	Tensão superficial	N/m
$\phi_{\text{ar}}(i)$	Umidade relativa do ar no volume de controle i	%
ϕ_{amb}	Umidade relativa do ar ambiente	%
ρ	Densidade Relativa	-

RESUMO

Uma das etapas mais importantes do processo de fabricação de produtos cerâmicos é a etapa de secagem. Esta etapa deve, de maneira geral, estar sincronizada com o processo de queima, caso contrário pode se tornar o gargalo para o aumento da produção. A secagem pode se dar de forma natural (ao ar livre) ou forçada, em equipamentos denominados secadores. Atualmente, o projeto, a construção e a regulagem destes equipamentos levam em conta muito mais o empirismo do que a compreensão fenomenológica. De maneira geral, são utilizados nos secadores combustíveis baratos ou uma parcela de energia que é recuperada dos fornos, os quais, não raro, utilizam um combustível mais nobre. Neste caso, o mau balanceamento entre a quantidade de energia total retirada e a quantidade de energia recuperada durante o resfriamento das peças, pode aumentar, consideravelmente, o consumo de combustível do forno. É apresentado um estudo do fenômeno da secagem, uma avaliação experimental das principais variáveis envolvidas no processo e a elaboração de um programa de simulação computacional para o projeto e a análise de secadores contínuos do tipo túnel. Com o auxílio do programa computacional é possível calcular o tempo de secagem, a capacidade de um secador, a energia requerida, a vazão de ar necessária, etc. Resultados experimentais obtidos através de testes de laboratório e atividades em campo são apresentados. Este trabalho foi desenvolvido dentro do contexto das pesquisas de desenvolvimento tecnológico para a aplicação de gás natural na indústria de cerâmica vermelha.

Palavras-chave: Processo de Secagem; Cerâmica Vermelha; Simulação Computacional.

ABSTRACT

One important step of ceramic products manufacturing is the drying procedure. The clay drying procedure must be synchronized with the clay firing procedure, otherwise it may become a limitation to the production enhance. The current adjusting and project of dryers are rather based on empirical knowledges. This work presents a study of clay drying phenomena and the experimental evaluation of the main variables of the process. The obtained data and parameters are used in a computational simulation program created, which serve as tool for project and analysis of continuous kiln dryers. The computational simulation program can be used to estimate the drying duration, the required thermal power, the air flow rate, etc. Experimental results are presented by laboratory and industrial tests. This work was developed in the context of applied researches on natural gas.

Keywords: Drying Process; Structural Ceramic; Computational Simulation.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

A chegada do Gás Natural foi recebida com entusiasmo pelo setor cerâmico catarinense, a despeito das instabilidades de preços inerentes à indústria de petróleo e gás. A indústria cerâmica, e a cadeia produtiva que dela deriva, tem importância estratégica no contexto sócio-econômico brasileiro, sobretudo catarinense. Ademais, o setor cerâmico constitui um imenso mercado, ainda não totalmente desenvolvido, para a utilização de Gás Natural.

O amplo uso de gás pode, com ganhos de escala, reduzir os custos marginais deste insumo e, assim, torná-lo mais competitivo. Mas, para haver um amplo uso, é preciso antes um custo competitivo em relação aos combustíveis atualmente utilizados. Então, como fechar a equação econômica? Neste contexto, o papel das instituições de pesquisa é desenvolver estudos e tecnologias que permitam às empresas, sobretudo às pequenas e médias, se capacitarem para esta etapa de transição, otimizando seus processos e reduzindo seus custos. Na matriz de custos das empresas cerâmicas o custo com o combustível representa um valor expressivo. Assim, faz-se mister a otimização de todos os processos que dependam do energético, ou que estejam com ele relacionados.

As indústrias brasileiras que atuam no setor de cerâmica vermelha apresentam, via de regra, um grande atraso tecnológico e de gestão. Em sua maioria são empresas de pequeno porte e familiares. Esta característica implica em baixo grau de conhecimento e escassez de recursos, necessários para um melhor rendimento dos processos de fabricação. Nos processos de secagem e de queima, o principal combustível usado têm sido a lenha e seus derivados, destacando-se a serragem. Também têm sido utilizados o óleo combustível (BPF) e o carvão mineral em menor escala. A crescente disponibilidade de Gás Natural, já utilizado no setor de forma incipiente, faz com que as empresas tenham a oportunidade de alcançar um novo patamar tecnológico, auxiliadas pelas instituições de pesquisa e de fomento. Algumas indústrias mais desenvolvidas, que fabricam produtos de alto valor agregado — como os produtos esmaltados — necessitam de um combustível “limpo”. Este fato justifica o

uso de GLP por estas indústrias, sendo que nestas, o Gás Natural vem ganhando espaço.

Como o processo de fabricação dos produtos da indústria de cerâmica vermelha exige uma grande demanda energética, este trabalho visa à racionalização do consumo da energia empregada no processo de secagem, bem como o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie na avaliação e no projeto de secadores. Com este objetivo, apresenta a elaboração de um programa de simulação computacional, em linguagem *Fortran*, e a utilização do mesmo nas simulações do comportamento térmico de um secador contínuo do tipo túnel. Paralelamente a esta atividade, foram realizadas medições em campo e testes de laboratório, de maneira a comparar os resultados do programa com dados experimentais. Deste modo tem-se como contribuição final a proposição de melhorias a serem implementadas no processo de secagem e nos secadores, visando um aumento da qualidade dos produtos, bem como uma redução no desperdício de energia.

1.2. História da Cerâmica

Cerâmica é a denominação comum a todos os artigos ou objetos produzidos com argila e que são queimados ao fogo. O nome procede da palavra grega *keramos* que significa argila. Toda uma região de Atenas tinha esse nome em função dos ceramistas que lá residiam - *kerá – meikos*. Da Idade Antiga à Idade Média, a história da cerâmica e da terracota confundiu-se em certo sentido, com a própria história da civilização: os vasos, as taças ou as ânforas, são em muitos casos, os únicos elementos sobre os quais podemos reconstruir o grau de evolução, os hábitos, a religião e até as mudanças de povos já desaparecidos.

A arte da cerâmica prosperou entre quase todos os povos ao mesmo tempo, refletindo nas formas e nas cores, o ambiente e a cultura dos diversos países. De acordo com Read (1968), antes de possuir escrita, literatura ou mesmo uma religião, o homem possuía já esta arte. No Mediterrâneo surgiu um aparelho que permitia fazer vasos perfeitos, de superfície lisa e espessura uniforme, num tempo relativamente breve. Era formada por uma roda de madeira movida por um pedal e foi criado em cerca de 2.000 a.C.

A capacidade da argila de ser moldada quando misturada em proporção correta de água, e de endurecer após a queima, permitiu que ela fosse utilizada na construção de casas, de vasilhames, na construção de urnas funerárias e até como "papel" para

escrita. Dutos cerâmicos foram utilizados a 4.000 a.C no antigo Egito e na Ilha de Creta, em obras de irrigação, drenagem, transporte de água e coleta de esgotos. Outras manifestações importantes na história da cerâmica deixaram os Babilônicos e os Assírios, que utilizavam cerâmica com ladrilhos esmaltados em azul, cinza azulado e creme e, ainda, relevos decorados (século VI a.C.), bem como os Persas, com sua fabricação de objetos em argila cozida em alto brilho e cores obtidas misturando óxidos metálicos, método usado ainda nos nossos dias.

Há cerca de 2.000 anos, isto é, bem antes da descoberta do Brasil pelos portugueses, já existiam em nosso território populações que fabricavam cerâmicas. O mais antigo centro de cerâmica do Brasil encontra-se na Ilha de Marajó, onde foi criado um estilo próprio: o marajoara. No México, os maias, os astecas e os toltecas produziram grande quantidade de ânforas, finamente esculpidas e pintadas. No Peru os incas, ou mesmo os povos que os precederam no domínio do país, deram vida a um artesanato excepcionalmente hábil e rico em personalidade.

Com o tempo, a cerâmica foi evoluindo e ganhando os nossos dias, mas não sem contar com os esforços de povos de todas as épocas e lugares. A manufatura de tijolos era encarada por muitos artesãos do velho mundo como um processo secreto. Os “pedreiros-livres” foram um dos primeiros grupos de artesãos a formar uma organização para manter estes segredos do processo de fabricação e confiná-los para uso do próprio grupo. Estas organizações especializadas eram chamadas de “corporações de ofício” e foram os precursores dos modernos sindicatos.

A invenção da máquina a vapor na Inglaterra no ano de 1760 e, a subsequente Revolução Industrial, trouxeram a chance de se utilizar a potência dirigida das máquinas para fabricar tijolos. A primeira máquina de fabricar tijolos foi patenteada em 1800. A esmaltação industrial teve início por volta de 1830, na Europa Central.

A cerâmica hoje extrapola o dia a dia para auxiliar na área científica: na medicina, vem sendo utilizada na prótese de ossos; é ainda o material utilizado quando existe a necessidade de um produto resistente a altas temperaturas, além de aplicações específicas como cerâmicas de alta tecnologia.

1.3. Definição de Cerâmica

Segundo a ABC (2003), cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

1.3.1. Classificação

O setor cerâmico é amplo e heterogêneo, o que induz a dividi-lo em sub-setores ou segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Utilizando a classificação adotada pela ABC (2003), tem-se:

Cerâmica Vermelha – compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e adorno. As lajotas muitas vezes são enquadradas neste grupo, porém, o mais correto é em materiais de revestimento. A cor vermelha que caracteriza esses produtos é resultante da oxidação de compostos de ferro, presentes ou liberados pela argila, que é a matéria-prima utilizada em sua fabricação, durante a queima. A intensidade da cor varia não só em função da quantidade de óxido de ferro que compõe o produto, como também da presença de outros minerais e da atmosfera oxidante do tratamento térmico.

Cerâmica Branca - compreende materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor e que eram assim agrupados pela cor branca de massa, necessárias por razões estéticas e/ou técnicas. Subgrupos: louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos, cerâmica artística, cerâmica técnica.

Materiais Refratários - Produtos que têm por finalidade suportar elevadas temperaturas nas condições específicas de processo e de operação de equipamentos industriais, que em geral envolvem esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações. Classificação: sílica, sílico-aluminoso, aluminosos, mulita, magnésiano-cromítico, cromítico-magnésiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

Materiais de Revestimento – São aqueles materiais utilizados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas, piscinas, etc., tais como azulejos, pastilhas, porcelanato, grês e outras designações.

Fritas – Frita (ou vidrado fritado) é um vidro moído, fabricado a partir da fusão de diferentes matérias-primas. É aplicado na superfície do corpo cerâmico que, após a queima, adquire aspecto vítreo. Este acabamento tem por finalidade melhorar a estética, tornar a peça impermeável e aumentar a resistência mecânica.

1.4. Panorama Energético da Indústria Cerâmica

Na indústria de revestimentos cerâmicos, a evolução verificada no desenvolvimento de novos produtos, processos e equipamentos (secadores e fornos a rolos), foi marcada pela busca e obtenção de tempos de processamento térmico menores, com reduzido consumo de energia nos processos de secagem e de queima. Esta evolução implicou na substituição de secadores e fornos que utilizavam combustíveis líquidos derivados do petróleo (óleo diesel, óleos combustíveis residuais), por outros concebidos para queima de combustíveis gasosos. Os fornos e secadores de projeto mais recente, que utilizam gás combustível, permitem o contato direto dos produtos de combustão com o material cerâmico, proporcionando maior eficiência ao processamento térmico. Nos fornos mais antigos que utilizavam combustíveis líquidos, o contato direto dos produtos de combustão nem sempre era possível, sobretudo nos produtos decorados, em função do risco de deposição de partículas combustíveis nas superfícies decoradas, ou mesmo o ataque de produtos de combustão (SO_2/SO_3) no material cerâmico. O contato direto dos produtos de combustão com o material cerâmico, associado à implementação do processo de monoqueima, significa uma sensível redução do consumo específico (kJ/kg de produto), bem como do índice de rejeitos, o que pode resultar em menores custos operacionais. No entanto, os combustíveis gasosos são considerados mais nobres do que os anteriormente utilizados e, em alguns casos, mais caros, existindo restrições legais à sua utilização (caso do GLP), ou à sua disponibilidade (caso do Gás Natural).

Com relação às vantagens comparativas, o setor apresenta um cenário bastante promissor em função da grande disponibilidade de matérias-primas, do bom nível de qualidade atingido e do potencial de mercado interno, alimentado pelo déficit habitacional existente. As perspectivas de ampliação das exportações também são

promissoras. Neste sentido, as alterações na matriz energética do setor e os respectivos custos associados desempenham papel importante, em função da participação do custo da energia nos custos totais da produção.

Tornar o gás natural viável para os todos os ceramistas é explicado pelo peso que a energia térmica tem na composição de custos do setor, indicado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Peso da energia nos custos em cerâmica de revestimento (SC), Barbosa Jr. (2000)

Energia	Década de 80	Década de 90	Varição
Energia Térmica S/ GN	30%	12%	-60%
Energia Térmica C/ GN	20%	8%	-60%
Energia Elétrica	5%	6%	20%
Térmica + Elétrica C/ GN	25%	14%	-44%

The diagram shows a double-headed arrow between the 'Energia Térmica S/ GN' row (30% in the 80s, 12% in the 90s, -60% variation) and the 'Térmica + Elétrica C/ GN' row (25% in the 80s, 14% in the 90s, -44% variation). A box to the right of the arrow contains the text '- 33%', indicating the percentage change in the total energy cost contribution.

Tabela 1.2 – Energia consumida em cerâmicas de revestimento (SC), Barbosa Jr. (2000)

	kWh/ton _{produto}	kcal/kg _{produto}	kJ/kg _{produto}
Moagem a seco	12,0	-	-
Moagem úmida descontínua	17,1	-	-
Moagem úmida contínua	18,7	-	-
Prensa	16,5	-	-
Atomizador	06,4	465	1.944
Secador horizontal	10,1	118	423
Secador vertical	08,4	107	447
Forno túnel	21,0	708	2.959
Forno a rolo	17,9	625	2.612

Segundo dados de Mallol sobre a indústria espanhola (2000), 99% da energia térmica consumida no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos são empregados em três etapas: secagem de barbotina por atomização, secagem e queima de peças conformadas. Analisando-se a distribuição de energia térmica consumida nas distintas etapas do processo produtivo (Figura 1.1), verifica-se que a etapa com maior consumo de energia térmica é a queima (50-60% do total), seguida pela secagem por atomização (30-40%) e finalmente a secagem da peça compactada (5-10%). Portanto, o consumo teórico específico de todo o processo pode ser estimado em um valor médio de 1.200 kcal/kg de produto acabado (5.016 kJ/kg), distribuídos em 350 kcal/kg de pó atomizado (1.463 kcal/kg), 135 kcal/kg de peças secas (564 kJ/kg) e 655 kcal/kg de produto queimado (2.738 kJ/kg).

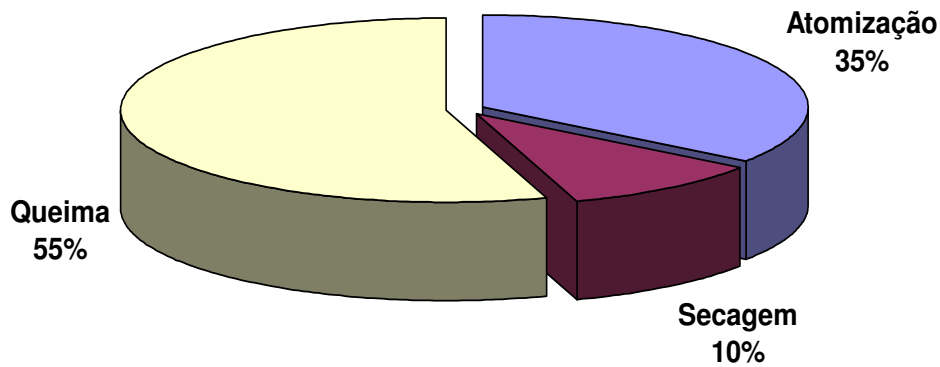


Figura 1.1 – Energia térmica consumida na fabricação de revestimentos cerâmicos (Mallol, 2000).

Na indústria de cerâmica vermelha, Más (2002) mostra através de cálculos simplificados que a etapa de secagem pode representar mais de 40% da energia térmica total utilizada na fabricação dos produtos, utilizando-se secadores contínuos do tipo túnel. Isto significa que o consumo específico de energia térmica para o processo de produção pode praticamente dobrar, caso os secadores não utilizem energia recuperada dos fornos. Para a etapa de queima realizada em fornos contínuos do tipo túnel, Más (2002) apresenta o consumo específico de cerca de 550 kcal/kg de produto (2.300 kJ/kg).

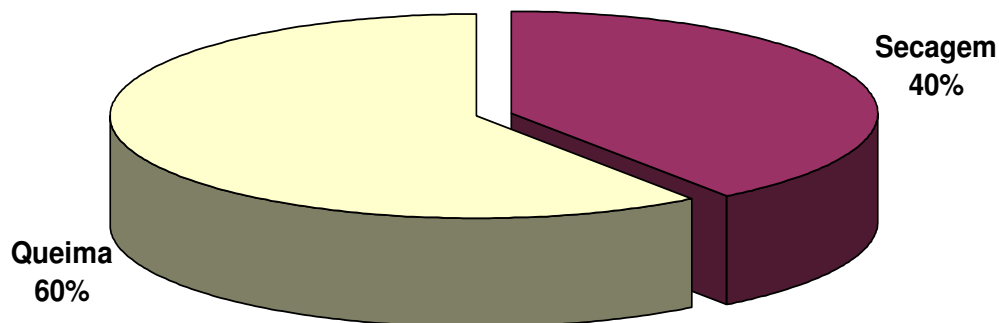


Figura 1.2 – Energia térmica utilizada na indústria de cerâmica vermelha (Más, 2002).

Em geral, a energia térmica no Brasil é gerada através da queima de lenha, carvão, óleo diesel, óleos combustíveis (BPF, Xisto, Raro, etc), álcool, gasolina e também por meio de derivados de hidrocarbonetos como o gás liquefeito de petróleo, o GLP. Muito pouco se aproveita dos 316 bilhões de metros cúbicos de gás natural que o país possui.

Segundo o portal GásEnergia (2005) na internet, as reservas provadas nacionais de gás natural estão atualmente em 316 bilhões de metros cúbicos e serão expandidas, podendo atingir 657 bilhões de metros cúbicos, duplicando a oferta do combustível nos próximos dez anos e subsidiando o abastecimento do mercado brasileiro por um período de 20 a 30 anos. Este mercado nacional foi, até aqui, abastecido pelas reservas da Petrobrás no Brasil e na Bolívia.

A Tabela 1.3 apresenta a distribuição do consumo mundial de gás natural, onde os Estados Unidos, Europa e Eurásia somam cerca de 70% do consumo mundial. O Brasil vem atrás de países como Argentina, Venezuela e México.

Tabela 1.3 – Consumo mundial de gás natural (Abreu, 2003).

Região	Consumo (10 ⁹ Nm ³ /ano)			Participação (%)	Crescimento (%aa.)
	1980	1990	2002	2002	1990 a 2002
América do Norte	644,5	646,5	790,3	31,2	1,7
Estados Unidos	566,5	552,5	667,5	26,3	1,6
Canadá	52,2	66,8	80,7	3,2	1,6
México	25,8	27,2	42,1	1,7	3,7
América do Sul	35,0	58,4	98,0	3,9	4,4
Argentina	11,5	20,3	30,3	1,2	3,4
Brasil	1,0	3,8	13,7	0,5	11,3
Venezuela	14,8	22,0	27,3	1,1	1,8
Outros	7,7	12,3	26,7	1,1	6,7
Europa e Eurásia	648,0	993,0	1.043,8	41,2	0,4
Oriente Médio	35,3	97,5	205,7	8,1	6,4
África	18,5	38,1	67,4	2,7	4,9
Ásia e Pacífico	70,6	160,6	330,3	13,0	6,2
Total Mundial	1.451,9	1.994,4	2.535,5	100,0	2,0
Taxa de Crescimento (%aa.)		3,2	2,0		

Hoje a participação do gás natural responde por 7,5% da matriz energética brasileira e um dos grandes desafios da Petrobrás é consolidar um crescimento progressivo que possibilite chegar a 15% em 2015. Estima-se que até 2010 haverá um crescimento de 14,2% ao ano do mercado de gás natural. Também no ano de 2015, a oferta de gás natural ao mercado brasileiro deverá atingir patamares superiores a 100 milhões de metros cúbicos diários, o triplo da oferta atual.

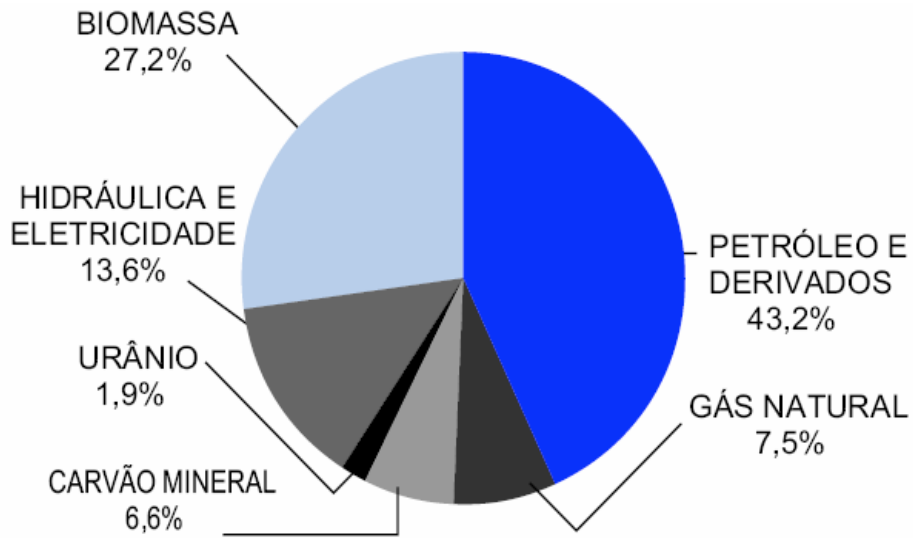


Figura 1.3 – Oferta interna de energia no Brasil (BEN, 2003).

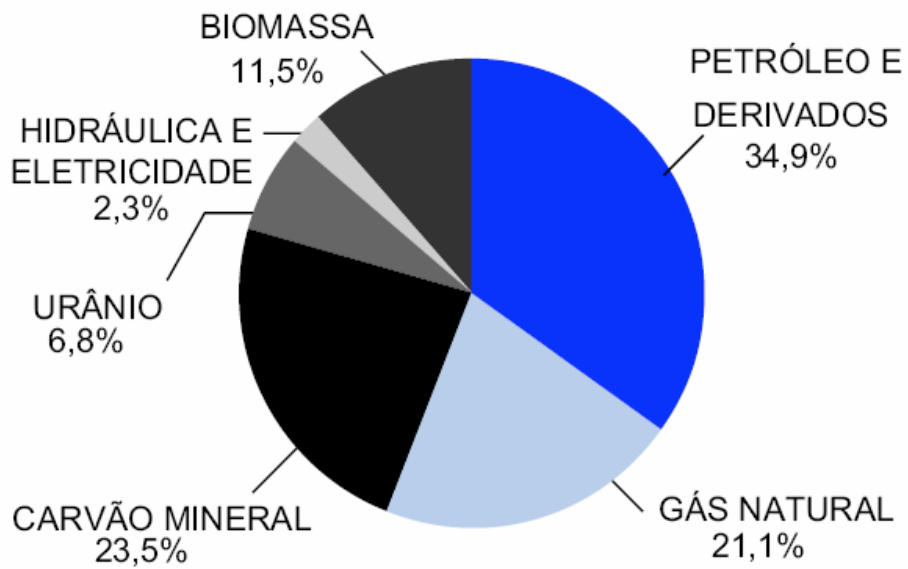


Figura 1.4 – Média da oferta interna de energia no mundo (BEN, 2003).

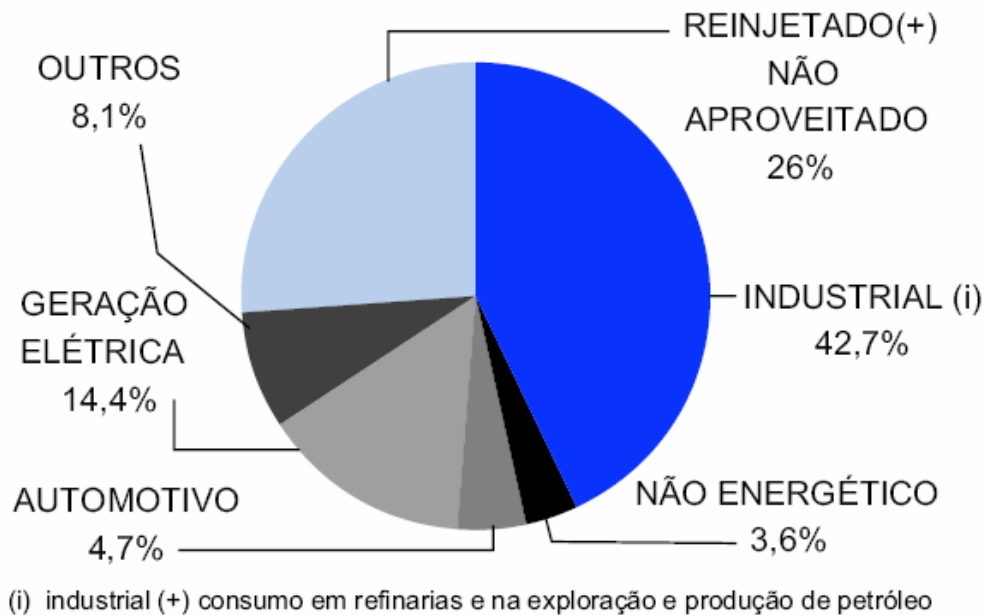


Figura 1.5 – Usos do gás natural no Brasil (BEN, 2003).

O gás natural tem a seu favor três aspectos. O primeiro é o ambiental. Por ser menos poluente, leva larga vantagem sobre o carvão e o óleo combustível. O segundo é o aspecto de qualidade do produto final; é mais homogêneo, melhorando o desempenho do forno. E, finalmente, o aspecto da estabilidade de fornecimento, já que cada vez mais os derivados de madeira escasseiam e o óleo combustível, que é cada vez menos competitivo, é fornecido em bateladas.

1.5. Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha Nacional

Não há como negar a importância do setor de cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, dentro do próprio setor cerâmico e em toda cadeia do Macro Complexo da Construção Civil. A ABC (2003) mapeou milhares de empresas espalhadas por todo o país, produzindo, principalmente, blocos de vedação, telhas e componentes de lajes, além de blocos utilizados em alvenaria estrutural, pisos extrudados, manilhas (tubos cerâmicos) e elementos vazados.

Segundo dados do SEBRAE (1997), empresas de pequeno porte representam 80% das empresas industriais, responsáveis por 48% da produção nacional, movimentando 42% da massa salarial, garantindo 70% de empregos e responsabilizando-se por 21% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.

As unidades produtoras de cerâmica vermelha enquadram-se como de pequeno e médio porte, utilizando, em geral, tecnologias ultrapassadas. A produtividade média do segmento (~12.000 peças/operário.mês) é baixíssima, quando comparada com o padrão europeu de 200.000 peças/operário.mês. Verifica-se uma grande defasagem tecnológica tanto em termos de maquinário e nível de automação, como no próprio processo de produção em todas as suas quatro etapas básicas, a saber: extração e preparo das matérias-primas, conformação, secagem e queima.

O volume de matérias-primas manuseado pelo segmento é enorme, cerca de 83 milhões de ton./ano. A exploração de argilas, feita de forma não racional por um grande número de empresas, pode causar sérios problemas ao meio ambiente e mesmo escassez de matérias-primas, como já observado em alguns pólos produtores; o combustível empregado na grande maioria das empresas é a lenha, em várias regiões advindas de florestas naturais e até mesmo de mangues. A grande maioria das pequenas empresas utiliza fornos de baixíssima eficiência energética.

No global, as empresas do segmento de cerâmica vermelha geram centenas de milhares de empregos diretos, movimentam mensalmente milhões de toneladas de matérias-primas argilosas e faturam valores anuais superiores a outros importantes segmentos do setor cerâmico. Fazendo arredondamentos, face à imprecisão dos números disponíveis, tem-se:

Tabela 1.4 – Resumo do panorama da indústria de cerâmica vermelha nacional (ABC, 2003).

Número de Empresas	7.000	Unidades
Blocos	25,5	Bilhões/ano
Telhas (~15%)	4,6	Bilhões/ano
Total de Peças	30,5	Bilhões/ano
Total em Massa	65,0	MM ton/ano
Produção Média	365.000	Peças/mês
Empregos Diretos	220.000	Unidades
Produtividade	12.000	Peças/operário*mês
Faturamento Blocos (R\$)	3,1	Bilhões/ano
Faturamento Telhas (~25%) (R\$)	1,1	Bilhões/ano
Faturamento Total (R\$)	4,2	Bilhões/ano

Nos últimos anos tem-se verificado um movimento de parte significativa dos empresários em direção à busca da melhoria da qualidade e produtividade, via a introdução de equipamentos mais modernos e eficientes, bem como de um melhor controle do processo produtivo. Este movimento é impulsionado pela necessidade de

redução dos custos de produção, aliada às exigências crescentes de normalização, para enfrentar a demanda do mercado brasileiro, onde se estima um déficit habitacional da ordem de 5 milhões de residências.

1.6. Indústria de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina

A produção industrial de cerâmica vermelha foi introduzida no Estado de Santa Catarina pelos imigrantes europeus. Este segmento desempenha papel importante nos aspectos cultural, social e econômico. Segundo dados da Associação Nacional de Indústrias Cerâmicas - ANICER (1997), no Estado de Santa Catarina, o setor é constituído por 742 empresas. Destas, mais de 90% são de pequeno porte, funcionando com estrutura artesanal, concentrando-se 51,9% na Região Norte do Estado; 38,8% na Região Sul e, 9,3% na Região Oeste.

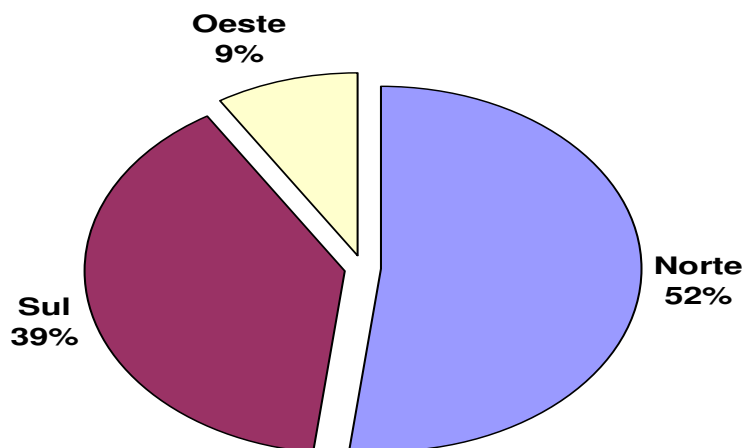


Figura 1.6 – Concentração das empresas de cerâmica vermelha em Santa Catarina (Mann, 2001).

Estas empresas são responsáveis por 11.000 empregos diretos e 3.000 indiretos, concentrando sua produção em 62,9% de tijolos; 28,5% de telhas e 8,6% de outros produtos. Na Região Sul do Estado de Santa Catarina, em alguns municípios, como por exemplo, Morro da Fumaça e Sangão, o valor da produção total de cerâmica vermelha representa mais de 80% da principal atividade econômica.

Tabela 1.5 – Panorama da indústria de cerâmica vermelha nacional (ABC, 2003).

Fonte Estado	Nº de Cerâmicas			Estimativas da ABC						
	Reunião Anicer [1]	Anuário Cer. Verm. [2]	Outras	Nº Cerâmicas	Blocos/mês (x1000)	Telhas/mês (x1000)	Total/mês (x1000)	Massa (ton./mês)	Matéria- Prima (ton./mês)	Empregos diretos
ES		66	66 [3]	70	40.000	10.000	50.000	113.000	141.000	3.500
RJ	128 [4]	77 [5]	235 [3]	170	145.000	5.000	150.000	322.000	414.000	8.500
SP	2.000	600 [6]	746 [3]	600	500.000	40.000	540.000	1.200.000	1.500.000	36.000
MG	1.500	1.500 [7]	539 [3]	690	255.000	45.000	300.000	674.000	1.010.000	28.000
Sudeste				1.530	940.000	100.000	1.040.000	2.309.000	3.065.000	76.000
PR	700	1.041 [8]	1.000 [9]	1.000	175.000	25.000	200.000	448.000	560.000	16.000
SC		742		1.000	120.000	30.000	150.000	339.000	424.000	16.000
RS	1.250			1.250	240.000	10.000	250.000	531.000	663.000	25.000
Sul				3.250	535.000	65.000	600.000	1.318.000	1.647.000	57.000
BA	1.150			350	100.000	30.000	130.000	256.000	320.000	13.000
CE	400			400	90.000	30.000	120.000	234.000	292.000	12.000
PB	60	50		70	30.000	10.000	40.000	78.000	98.000	3.500
PE				140	40.000	5.000	45.000	91.000	114.000	5.000
MA	50	117		120	22.000	18.000	40.000	80.000	100.000	5.000
SE	40	30		50	25.000	5.000	30.000	61.000	76.000	2.500
PI	32		38 [10]	40	25.000	5.000	30.000	65.000	81.000	2.000
RN			82 [12]	160	31.000	52.000	83.000	139.000	174.000	5.500
AL	46			30	26.000		26.000	47.000	51.000	1.500
Nordeste				1.360	387.000	157.000	544.000	1.051.000	1.306.000	50.000
GO	400			300	85.000	35.000	120.000	275.000	343.000	12.000
MS	200	250	55 [11]	60	10.000	7.000	17.000	40.000	50.000	3.000
MT				50	12.000	3.000	15.000	34.000	42.000	2.500
DF				50	15.000	5.000	20.000	38.000	48.000	2.500
Cent. Oeste				460	122.000	50.000	172.000	387.000	483.000	20.000
AC				10	6.000		6.000	13.000	17.000	500
AM				100	25.000	5.000	30.000	61.000	76.000	3.500
AP				10	6.000		6.000	13.000	17.000	500
RR				10	6.000		6.000	13.000	17.000	500
RO				30	15.000		15.000	33.000	41.000	3.000
PA				50	30.000	5.000	35.000	72.000	90.000	2.500
TO				50	30.000	5.000	35.000	77.000	96.000	2.500
Norte				260	118.000	15.000	133.000	282.000	354.000	11.000
Total				6.860	2.102.000	387.000	2.489.000	5.347.000	6.855.000	214.000
Total / Ano					25.224.000	4.644.000	29.868.000	64.164.000	82.260.000	

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Matérias-Primas para Cerâmica Vermelha

As indústrias de cerâmica vermelha empregam duas ou mais argilas para obtenção de uma massa com as características desejadas. As argilas ideais para fabricação destes produtos devem, de modo geral, ser de fácil desagregação e permitir moldagem adequada; apresentar granulometria fina e distribuição granulométrica conveniente para garantir o controle das dimensões finais do produto; apresentar baixo (ou nenhum) teor de carbonatos, sulfatos e sulfetos.

As argilas utilizadas para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha recebem várias designações, dependendo da região do país. Uma classificação freqüente, utilizada por Rossi (2003), é a que segue:

Argila de várzea – Pode ser encontrada às margens de rios ou banhados. Apresenta textura terrosa, esfarelada e em torrões, granulometria fina e, quando úmida, elevada plasticidade, sendo empregada por isso como ligante e/ou plastificante da massa. A coloração natural típica desse tipo de argila varia do cinza ao preto e, após queima, do rosa ao vermelho. Apresenta com maior freqüência impurezas como quartzo, mica e matéria orgânica; esta última, quando em teores elevados, é uma das responsáveis pelas perdas e contração do produto durante a queima.

Argila de morro – Encontrada longe de banhados e rios, a argila de morro apresenta textura terrosa, granular ou em blocos, desagregando-se geralmente em pequenos fragmentos. Possui baixa plasticidade e cor variável entre vermelha e amarelada após queima, contendo quartzo e às vezes, feldspato como impurezas, além de baixo teor de matéria orgânica. Nessas argilas é muito comum a presença de seixos, cascalhos e, eventualmente, de carbonatos.

Argila tipo taguá – Pode ser encontrada em camadas bastante profundas sob rios ou encostas de morros. Caracteriza-se por camadas delgadas e muito duras de materiais argilosos de cores variadas, com predominância do vermelho e do cinza. Sua extração exige máquinas potentes e às vezes detonações por dinamite, devendo o material ser seco e moído antes de entrar na linha de processamento.

2.2. Composição das Argilas

Os argilominerais são os minerais característicos das argilas. Quimicamente são silicatos de alumínio ou de magnésio hidratados, contendo em certos tipos outros elementos como ferro, potássio, lítio e outros. Graças aos argilominerais, as argilas na presença de água desenvolvem uma série de propriedades tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, tixotropia, e viscosidades de soluções aquosas que explicam sua grande variedade de aplicações tecnológicas. Os principais grupos de argilominerais são: caulinita, illita e esmectitas ou montmorilonita. A composição química mais comum é $2\text{SiO} \cdot \text{AlO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (silicato aluminoso hidratado). São espalhados pela superfície da terra chegando a basicamente 75% das rochas sedimentares do planeta. Argilas são materiais plásticos, pois têm a propriedade de quando misturados com água em devidas proporções, apresentarem a possibilidade de serem amassados e trabalhados mantendo a forma que se quer. Quando secos, ainda crus, basta adicionar água para que voltem ao estado de plasticidade.

O que diferencia estes argilominerais é basicamente o tipo de estrutura e as substituições que podem ocorrer dentro da estrutura: do alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro, principalmente, e conseqüente neutralização das cargas residuais.

Em função principalmente das possibilidades de emprego tecnológico, que são influenciadas pela gênese e pela composição mineralógica do material, em muitos casos as argilas recebem designações como: caulins, bentonitas, argilas refratárias, flint-clays, e ball-clays. De um modo geral, as argilas que são mais adequadas à fabricação dos produtos de cerâmica vermelha apresentam em sua constituição os argilominerais illita, de camadas mistas de illita-montmorilonita e clorita-montmorilonita, além de caulinita e compostos de ferro. As argilas para materiais refratários são essencialmente caulínicas, devendo apresentar baixos teores de compostos alcalinos, alcalino-terrosos e de ferro; podendo conter ainda em alguns tipos a gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

2.3. Aditivos

Além das argilas existem outros materiais cerâmicos que misturados às argilas produzem as chamadas massas ou pastas cerâmicas. Alguns são adicionados como antiplásticos e outros como fundentes. Os antiplásticos reduzem o encolhimento das argilas quando secam, enquanto os fundentes abaixam a temperatura de vitrificação

destas. Às massas cerâmicas pode-se adicionar Bentonita, Caulim, Carbonato de Cálcio, Quartzo, Dolomita, Feldspato, Talco e Chamote.

2.4. Massas Cerâmicas

Os produtos cerâmicos podem ser obtidos através da mistura de duas ou mais argilas que, misturadas, irão adquirir uma característica própria e formarão o que se chama de massa cerâmica. Porém, desde que sejam compatíveis entre si, as argilas ou massas cerâmicas podem ser utilizadas juntas para a execução de um corpo cerâmico. Há misturas com argilas de tons diferentes o que possibilita um efeito muito interessante. Mas para serem misturadas na modelagem, as argilas ou massas precisam ser testadas quanto ao índice de retração, ou seja, a porcentagem do encolhimento em função da saída da água. Entendem-se como compatíveis as que encolhem em proporção semelhante, não apresentando, portanto, rachaduras durante a secagem e a queima.

2.5. Processo Produtivo da Cerâmica Vermelha

De acordo com a ABC (2003), o processo produtivo de cerâmica vermelha pode ser dividido nas seguintes etapas:

Extração da argila: Normalmente, a mineração encontra-se próxima à empresa. Os equipamentos normalmente utilizados na extração de argilas são as retro-escavadeiras.

Estocagem e Sazonamento de matéria-prima: As indústrias de cerâmica estocam argilas a céu aberto por longo período, obtendo-se com isso características adequadas ao seu processamento. Essa prática, chamada sazonalidade, é muito comum desde a antiguidade, pois os processos de intemperismo (sol, chuva), provocam o alívio de tensões nos blocos de argila, melhoram sua plasticidade e homogeneízam a distribuição de umidade nesses materiais, para que ocorra a estabilidade nas reações físico-químicas.

Mistura e Dosagem: No processo de fabricação de cerâmicas vermelhas, ao contrário do que ocorre em outros segmentos, em geral, a dosagem das matérias-primas precede sua preparação, pois, na verdade, a preparação da massa se inicia com a formação dos montes de argila a céu aberto nos pátios das indústrias. Após o sazonalidade, as matérias-primas são transportadas para o caixão alimentador, equipamento que dosa a quantidade necessária do material para dar entrada na linha de produção. A mistura é feita manualmente ou com pás-carregadeiras, conforme o percentual de cada matéria-

prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea. O material preparado fica protegido das intempéries.

Desintegrador: A mistura dosada é conduzida aos desintegradores, onde os grandes blocos de argila são desintegrados e as pedras, quando existentes, são separadas por centrifugação. Nessa etapa, se o teor de umidade da mistura for muito elevado (varia de 16% a 25%), a eficácia de certos equipamentos será menor, como é o caso do desintegrador, que não desintegrará os blocos de argila, mas apenas os amassará.

Misturador 01: O material desagregado é então transportado para o misturador, onde se inicia a homogeneização. Quando necessário, há adição de água nessa etapa. É um equipamento que, através de movimentos circulares, permite a quebra de torrões e a homogeneização da massa juntamente com a água mistura para a obtenção da plasticidade correta.

Laminador: Em seguida a mistura é transferida para o laminador, máquina que tem a função de ajustar a granulometria, completar a homogeneização e cortar a massa em lâminas. É um equipamento composto de dois cilindros, responsáveis pela compactação e melhor homogeneização da massa de argila.

Misturador 02: É um equipamento que, através de movimentos circulares, permite a quebra da argila compactada proveniente do laminador.

Extrusão e Corte: A argila homogeneizada entra na extrusora (maromba), que a comprime contra a boquilha, dando o formato de saída. As lâminas são extrudadas na forma de uma coluna, com seção variável de acordo com a boquilha acoplada à máquina. A coluna é então seccionada nas dimensões adequadas ao tipo de produto desejado, tais como tijolos furados, blocos, manilhas e elementos vazados. Na fabricação de telhas o processo é o mesmo, até a etapa de extrusão. Nessa operação a coluna extrudada é seccionada nas dimensões adequadas. Os bastões assim obtidos são prensados em moldes com diferentes formatos, dependendo do tipo de telha desejado. Um número restrito de tipos de telha é obtido diretamente por extrusão.

Secagem: Após a conformação, as peças são submetidas à secagem, inicialmente ao ar, e em seguida, em algumas empresas, em secadores. As telhas, devido suas formas peculiares, devem ser dispostas uma a uma em suportes de madeira para evitar deformações com o próprio peso e facilitar a secagem. A secagem natural geralmente é

feita em galpão coberto, contendo prateleiras fixas ou móveis, ou ainda empilhados no chão, a fim de perderem a maior parte da umidade. Permanecem aí por um período de até seis semanas. As empresas que utilizam estufas ou secadores para este fim, geralmente aproveitam o calor residual dos fornos, quando do seu resfriamento. O material permanece na estufa em torno de um a dois dias. A umidade final desejada, dependendo do produto, é da ordem de 3% à 4%, ocorrendo uma contração que pode variar de 4% à 10%. A umidade do produto que sai da secagem para a queima é controlada usualmente através do tato, pressão sobre o produto com a unha ou pela cor do material (deve estar clara ou esbranquiçada).

Queima: Depois de secas, as peças são levadas aos fornos para a queima em temperaturas que variam, em geral, de 800 °C à 1000 °C, dependendo do tipo de produto. Os fornos utilizam como fonte de energia a lenha, a serragem, os rejeitos de madeira, o óleo ou carvão mineral. O processo de queima pode durar de 24h a 7 dias. Os tipos de fornos utilizados são: o convencional (intermitente), com variações que recebem nomes como, garrafão, chinês, caipira, paulistinha, etc., e os fornos contínuos ou fornos túneis, considerados mais avançados em termos de tecnologia, pela alta produção que apresentam em relação aos convencionais.

No fluxograma da Fig. 2.1 está representado o processo geral de fabricação de telhas e blocos, bem como tijolos furados, lajes para forros, lajotas e tubos cerâmicos. Atualmente tem se ampliado a fabricação de telhas esmaltadas, cujo processo é semelhante ao de outros produtos de cerâmica vermelha, ou seja, após a prensagem e a secagem é feita a esmaltação e em seguida a queima. Há casos também que se utiliza o processo de biqueima, isto é, a telha é esmaltada após a 1ª queima e em seguida sofre uma 2ª queima. Tem se tornado também uma prática o tratamento da telha, após a queima, com impermeabilizantes, resinas e outros materiais.

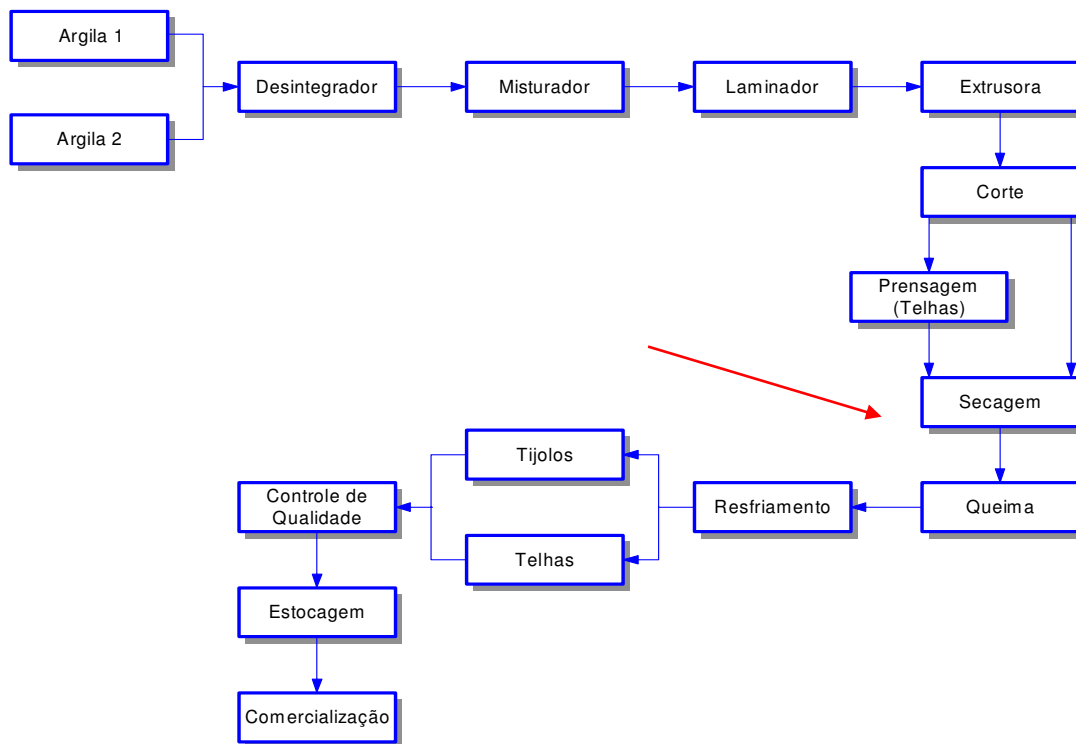


Figura 2.1 - Fluxograma do processo produtivo de cerâmica vermelha (Mann, 2001).

2.6. A Etapa de Secagem

Em prosseguimento à conformação da cerâmica, seja em massa úmida ou semi-seca, faz-se necessária a secagem como processo preparatório à etapa de queima. As quantidades de água empregadas na conformação não são completamente eliminadas e o processo de secagem, mesmo que no produto permaneçam pequenos percentuais de umidade, considera-se concluído.

2.6.1. Umidade Residual

Por convenção, todos os percentuais de umidade são referidos ao peso do produto seco a uma determinada temperatura. Facincani (1992) define como seca a peça cerâmica quando permanece a peso constante, depois de prolongada permanência à temperatura de 75 °C (348 K). A referência é muito importante para a medida da umidade residual e a avaliação de seus efeitos, devido aos baixos valores normalmente envolvidos. Há boas razões que aconselham a escolha cuidadosa do teor de umidade residual, entre as quais se devem citar:

Tempos e Custos de Secagem. À medida que os percentuais de umidade tendem a valores mínimos, são necessários tempos sempre mais longos para extrair quantidades iguais de água. Para compensar em parte o inconveniente, deve-se aumentar a temperatura do ar, o que influencia diretamente o acúmulo de calor do produto, que dificilmente é aproveitado. Na prática, são perdidas quantidades apreciáveis de calor. Além disso, a reabsorção de umidade do ambiente externo pelo produto exige reevaporação, que se executada com ar quente de recuperação, custaria muito; se executada com os gases de exaustão do forno, o custo seria praticamente nulo devido à quantidade de calor disponível. Neste caso, porém, é necessária a construção de um ambiente adequado e o gasto de energia elétrica para desviarem-se os gases – o chamado pulmão.

Reabsorção de Umidade pelo Produto. O produto secado com ar quente perde umidade até um valor com o qual cria um equilíbrio com as condições higrométricas do ar do secador. A baixa temperatura, o ar deixa no produto uma umidade residual maior que em temperaturas elevadas. Se o produto seco é exposto ao ambiente em condições de maior umidade relativa do que a encontrada junto à superfície da peça, o equilíbrio exige uma passagem inversa de umidade, isto é, do ar para o produto. Para alcançar o equilíbrio, o percurso é muito longo e a reabsorção de umidade, mais veloz no início, torna-se cada vez mais lenta. A alimentação do forno à noite e nos finais de semana, é feita com produto seco, acumulado, de reserva. A exposição por diversas horas ao ambiente, favorece o estabelecimento do equilíbrio de umidade entre o ambiente e o produto, conforme mostra a Fig. 2.2. Torna-se, portanto, inútil e contraproducente conduzir a secagem para abaixo dos teores de reabsorção. As argilas apresentam valores de reabsorção de algumas unidades percentuais em relação ao peso seco, que são características da origem mineralógica. Mais do que das condições higrométricas do ambiente, a reabsorção depende, além disso, do grau de secagem recebido e da extensão de superfície exposta. Como valores mínimos e máximos, a reabsorção vai de 0,5% a 3%; mais freqüentemente se encontram teores compreendidos entre 1% e 2%.

O fenômeno mais importante que segue a reabsorção é a notável redução da resistência mecânica a seco e a desagregação do material por expansão, como demonstra o gráfico da Fig. 2.3. Redução ainda maior de resistência por reabsorção de umidade se apresenta em produtos irregularmente secados, bons no aspecto, mas contendo fortes tensões internas ou micro fraturas (fortes diferenças nas velocidades de evaporação entre os septos internos e externos do produto furado, por exemplo).

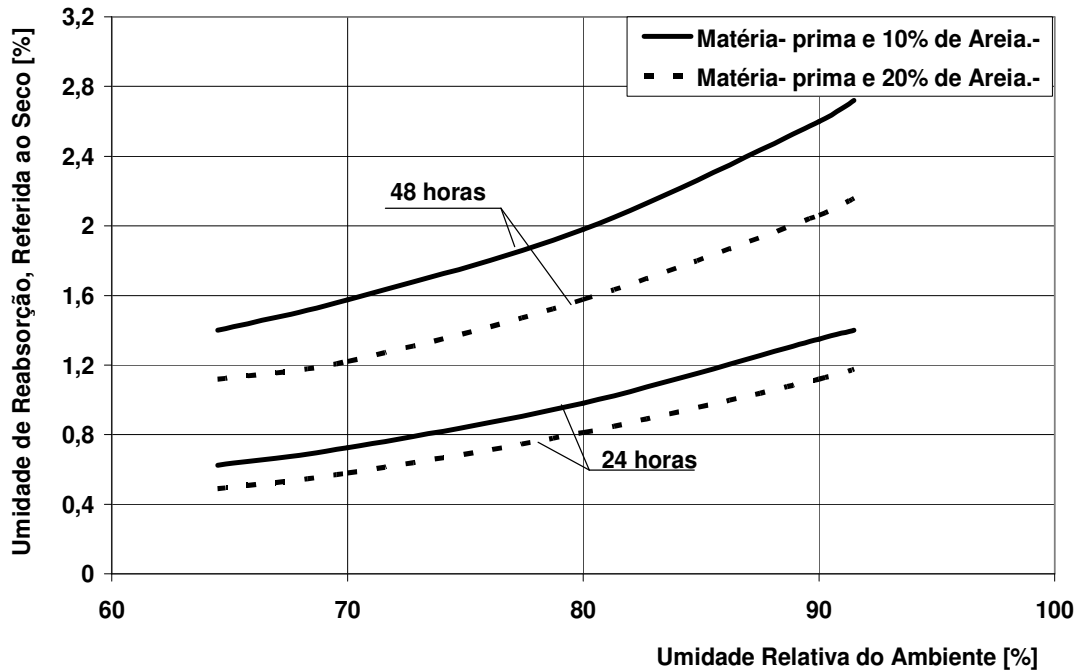


Figura 2.2 – Reabsorção de umidade pelo produto seco (Facincani, 1992).

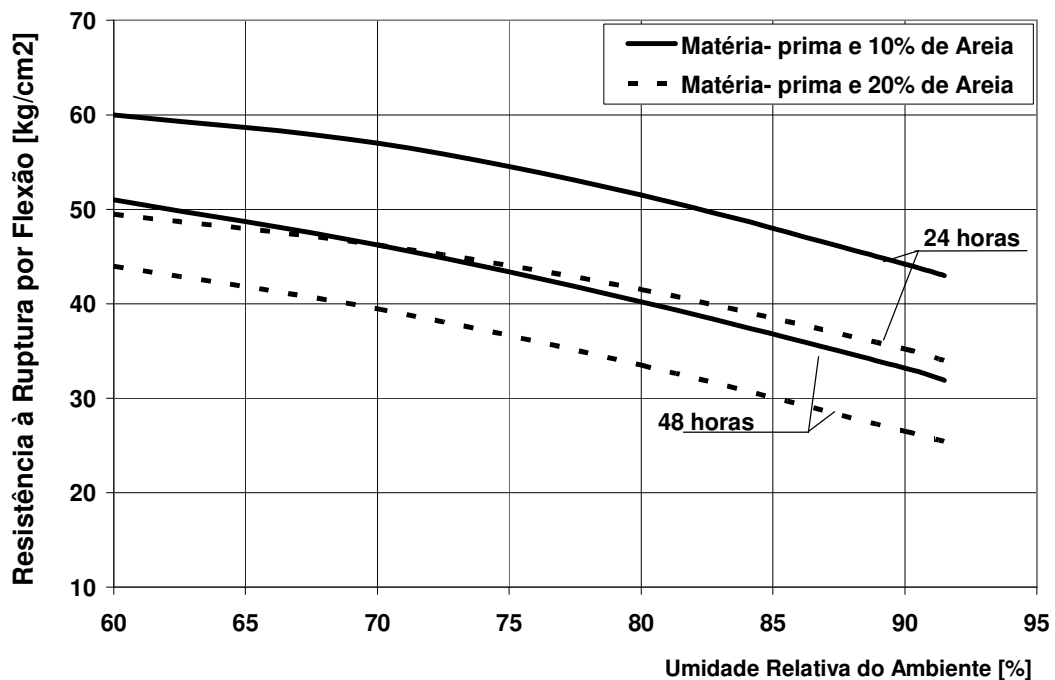


Figura 2.3 – Redução da resistência mecânica a seco (Facincani, 1992).

A resistência às solicitações mecânicas, causadas no produto pelas máquinas de manipulação, é uma característica importante que a cerâmica deve ter para evitar descartes consideráveis de produção. Pequenos percentuais de reabsorção de umidade

reduzem drasticamente as resistências, e os produtos com alto percentual de vazios (lajotas, tavelões etc), são aqueles mais sujeitos a tais inconvenientes.

Lascamentos do Produto no Forno. A umidade residual do produto, colocado em um ambiente com temperatura superior aos 100° C, tende a colocar sob pressão o interior da estrutura porosa. Se, devido a um rápido aquecimento, baixa porosidade do produto ou espessura relativamente grande dos septos, não ocorre a saída do vapor, as forças de pressão fazem lascas partes das paredes. Por esta série de razões, não é fácil de um modo geral pré-fixar o valor mais conveniente de umidade residual. Em linhas gerais, os teores de umidade residual variam numa amplitude de valores de:

- 2,5–3,0% para materiais de mediana plasticidade e produtos com percentuais de vazios entre 35 e 45 %;
- 2,0–2,5% para materiais mais plásticos, produtos leves de grandes dimensões, telhas;
- 0,8–1,0% para produtos adaptados a fornos com ciclo curto de queima.

Nestes últimos tempos, face ao contínuo esforço para redução dos consumos energéticos, está em curso uma revisão dos limites de umidade residual. A tendência é extrair do secador materiais mais úmidos que, contudo, estejam em condições de apresentar uma estrutura robusta, apta ao empilhamento (mesmo se às vezes são necessárias máquinas especiais de manipulação), e uma porosidade suficientemente elevada, com a finalidade de ser obter a secagem final com os gases de exaustão do forno.

2.6.2. Fatores que Influenciam na Velocidade de Secagem

O funcionamento da maioria dos secadores cerâmicos está baseado no processo por convecção, no que intervêm diversos fatores, influenciando o processo de secagem. Os fatores mais importantes são:

- Temperatura e umidade relativa do ar de secagem;
- Velocidade da peça a secar;
- Velocidade e direção do fluxo de ar
- Espessura da peça a secar;
- Permeabilidade do sólido (quantidade e tamanho dos poros).

2.6.3. Meios de Secagem

Dos métodos de secagem existentes, os mais importantes para o ramo cerâmico, segundo Bristot (1996), são:

Secagem por absorção – Ocorre quando um corpo poroso com composição química que se altera frente à água, devido à absorção da mesma, entra em contato direto com massas que tenham elevado teor de água (barbotina principalmente); é o caso dos moldes de gesso (colado).

Secagem por separação mecânica – Pode ser realizada por filtração, compressão e centrifugação; entretanto, constitui na realidade uma etapa de pré-secagem, como é o caso também da absorção. É usada para certos tipos de massas cerâmicas, recuperação de esmalte, etc; é o caso do filtro-prensa.

Secagem por evaporação – É o método universal de secagem de sólidos e líquidos não voláteis, acompanhado da absorção de calor. Sendo este o método usado universalmente para secagem de argila e corpos cerâmicos em geral, é o método que será estudado.

A passagem de estado da água líquida para vapor, em qualquer condição que ocorra, é um fenômeno físico que é acompanhado de uma forte absorção de calor. Cada 1 kg de água evaporada nas temperaturas médias dos secadores industriais, necessita de 2.420 a 2.500 kJ (580 a 600 kcal). De acordo com Facincani (1992), cerca de 1.250 a 2.500 kJ/kg água (de 300 à 600 kcal/kg) são gastas pelas inevitáveis perdas do processo. Certa quantidade de energia é necessária para vencer as forças de ligação da água com a argila, mas tais forças se tornam sensíveis somente em presença de baixos teores de umidade (105 kJ/kg de água, para materiais bastante plásticos; 29–33 kJ/kg de água para materiais pouco plásticos; considerado uma umidade de 3–4%). Na média, referida a toda a água evaporada e a materiais de média plasticidade, a energia de ligação corresponde a menos de 1% das quantidades totais de evaporação e das perdas de diversas naturezas.

Em linhas gerais, os meios adotados para a secagem por evaporação, são:

A) Aquecimento direto do material e do líquido contido, mediante sistemas particulares:

- **Raios infravermelhos**, os quais, por irradiação direta e em ambiente protegido, transmitem calor para a superfície externa do produto e desta, por condução, para o seu interior;
- **Microondas**, mediante ondas eletromagnéticas curtíssimas que induzem o aquecimento do produto com temperaturas maiores no seu interior;
- **Autoclave**, ou ambiente fechado, onde seja possível um aquecimento de todo o produto, argila e líquido, à temperatura superior àquela de ebulição do líquido. A diferença em relação ao sistema com raios infravermelhos reside no fato de que durante o aquecimento, a evaporação permanece freada pela pressão que se forma no interior do ambiente fechado. Isto torna possível atingir-se a temperatura de ebulição. A abertura controlada de uma válvula de comunicação com exterior, provoca na autoclave uma diminuição de pressão que aciona uma secagem muito rápida.

Com estes sistemas, além da quantidade de calor para a evaporação, é preciso fornecer ao processo também aquele calor necessário ao aquecimento do produto e dos suportes, para as perdas de calor pelas paredes, e ao eventual superaquecimento do vapor (autoclave).

B) Aquecimento indireto por meio de ar que ventila o produto, aproveitando o fenômeno físico da transmissão de calor por convecção bem como a capacidade do ar em absorver o vapor. Neste processo, o ar enquanto cede calor para a evaporação e o aquecimento do produto, se esfria ao mesmo tempo. O processo atinge um limite quando o ar atinge a temperatura de saturação (umidade relativa de 100%), abaixo da qual não pode mais absorver o vapor. A secagem com ar pode ocorrer de dois modos:

- **No ambiente atmosférico (Secagem Natural)** pelo aproveitamento da ventilação e da temperatura ambiente, em que o calor necessário para secagem é fornecido pelo ar. Na secagem natural o produto úmido é deixado ao ar livre, em galpões, onde ocorre a secagem. Pode-se também colocar o produto a ser secado sobre fornos para aproveitar o calor perdido para o meio ambiente.

Geralmente, sem a remoção do ar circulante, os produtos cerâmicos são secos entre 7 e 15 dias, conforme a umidade do material e a umidade relativa do ar ambiente dos locais de secagem. Deve-se ressaltar que quando o ar está demasiadamente seco, ele acarreta uma diferença de velocidade de secagem entre a superfície e o interior da

peça, provocando defeitos tais como rupturas (trincas e quebras), empenamento, etc. (Telljohann, 2003).

Este sistema de secagem é ainda utilizado em olarias, fábricas de telhas, fábricas de tijolos em geral e, muitas vezes, para secagem de esmalte. A secagem natural apresenta os seguintes inconvenientes:

- ✓ O tempo de secagem é muito longo, chegando às vezes, até quinze dias nos dias chuvosos;
- ✓ Excessivos manuseios das peças, acarretando elevados índices de perda e, conseqüentemente maiores custos de produção;
- ✓ Ocupação de grandes áreas cobertas, para colocação das peças tendo em vista a demora para secar.

Quando as peças cerâmicas apresentam teor de umidade elevado, formatos complicados e grandes dimensões, é aconselhável que se faça inicialmente uma secagem natural e, em seguida, a secagem forçada em secadores.

➤ **Em ambiente fechado**, com temperaturas controladas mediante alimentação de ar pré-aquecido no exterior ou com aquecimento em parte obtido no interior. O calor de secagem fornecido pelo ar neste caso, deve não somente considerar a energia necessária para a transformação do líquido em vapor e das quantidades posteriores de calor já discutidas, mas também para os seguintes conjuntos de perdas:

- Fugas de ar quente
- Energia acumulada no ar, quando este sai do secador com temperatura mais alta do que aquela do ambiente (perdas na chaminé).

Na avaliação comparativa entre um sistema e outro, são computados também os ônus derivados das despesas de instalações de todo o conjunto, bem como as possibilidades ou não de se usufruir de todo o calor fornecido pelo forno (recuperação do resfriamento do material queimado e por troca térmica com gases de exaustão). A secagem por ar desfruta facilmente todas as possibilidades de cessão de calor por parte do forno e representa hoje o único método industrialmente usado para a cerâmica vermelha.

2.7. Secadores

São equipamentos utilizados para a secagem forçada de materiais. Podem ser classificados de diversas maneiras. Bristot (1996) propõe a seguinte:

A) Secadores de Funcionamento Estático ou Intermitente

São aqueles em que as cargas e descargas ocorrem em intervalos regulares de tempo (bateladas). Os secadores estáticos são constituídos por dois grupos de áreas separadas, normalmente chamadas de câmaras ou celas.

Durante as horas de trabalho das máquinas de produção, as câmaras são preenchidas uma após a outra de modo correspondente à produção. No momento em que é preenchida, cada câmara se fecha e pode iniciar seu processo de secagem, caracterizado pelo fato de o produto permanecer parado e mudarem-se no tempo, as condições termohigrométricas internas. Para cada câmara é possível a realização de um processo particular de secagem, sendo cada uma independente da outra. O fato de se poderem efetuar regulagens diferentes para cada tipo de produto, é considerada uma importante prerrogativa dos secadores estáticos.

Os secadores estáticos não têm a necessidade de comboios como os contínuos, contudo, eles se encontram extremamente ligados ao horário de produção para as operações de carga e descarga.

Apresentam como vantagens:

- Baixo custo de produção.
- Facilidade de operação nas várias condições de ambientes das necessidades exigidas.
- Para experiências e trabalhos especiais que exijam o máximo de flexibilidade e escalas de operações intermitentes de tempo.

Apresentam como desvantagens:

- A não utilização em operações contínuas, pois sua eficiência térmica é muito baixa sendo difícil obter a mesma temperatura em todos os seus pontos.
- Não é recomendável para grandes produções.

B) Secadores de Funcionamento Contínuo

São aqueles nos quais a carga e a descarga do material ocorre de maneira contínua e automática. Estes mantêm um processo de secagem contínuo sobre o

material; são muito econômicos e eficientes quando corretamente utilizados. São constituídos por galerias contendo um determinado número de carrinhos, nas quais os produtos são introduzidos por uma extremidade e retirados por outra.

Sob o aspecto de funcionamento interno, os secadores contínuos são caracterizados por uma distribuição fixa, no tempo e no espaço, das condições termohigrométricas e do próprio produto, no seu percurso entre uma e outra extremidade, que pode encontrar variações graduais de condições de secagem. Apresentam a grande vantagem de que todo o material que passa por ele tem o mesmo ciclo de secagem. Como desvantagens se podem citar o alto custo e sua carência de flexibilidade, principalmente. Podem ser usados para qualquer tipo de produto cerâmico, entretanto são usados preferencialmente para pisos, azulejos, telhas e manilhas, certos tipos de produtos domésticos (louças e sanitários), refratários, tijolos, etc.

Nos secadores de funcionamento contínuo, se o aquecimento ocorrer por convecção, o material a secar entra em contato com uma corrente gasosa quente durante o seu lento movimento entre a entrada e a saída do secador. A corrente gasosa quente possui a finalidade de fornecer calor ao material e de retirar o vapor produzido pela evaporação; ela pode mover-se no mesmo sentido do material (corrente concorde) ou em sentido contrário (corrente contrária ou contracorrente). No caso de secagem em contracorrente, o material entra em contato com gás a temperatura mais elevada pouco antes de ser descarregado pelo secador, ou seja, quando o grau de umidade está reduzido ao valor desejado.

2.7.1. Secadores Contínuos Tipo Túnel

Dos secadores de funcionamento contínuo, os secadores tipo túnel são os mais importantes para a indústria cerâmica, de acordo com Bristot (1996). São constituídos de um túnel propriamente dito, metálico ou de tijolos e um trilho no qual se move uma série de carrinhos que carregam o material a ser secado. Este túnel pode ser equipado com elementos próprios de aquecimento, ventiladores, controladores de umidade, controladores de temperatura e pressão entre outros elementos. Os carrinhos existentes avançam uma medida que corresponde ao comprimento dos mesmos, a intervalos pré-estabelecidos de tempo; enquanto um novo carrinho com material úmido é introduzido, um outro com material seco é retirado do lado oposto do túnel. Além dos carrinhos outros sistemas podem ser empregados para transportar o material a ser secado pelo túnel deste tipo de secador.

Os secadores túneis consistem normalmente de galerias cujo comprimento varia entre 60 e 90 metros, dependendo da produção que se deseja. O ar quente pode ser introduzido por uma de suas extremidades, procedente de fornalhas ou da recuperação de fornos (túneis, ou outros quaisquer). Mediante registros apropriados, o ar quente atravessa toda a galeria (túnel) para sair carregado de umidade. Deve-se ter o máximo de cuidado para que o ar quente não provoque a ruptura do material que está sendo secado.

Um secador túnel pode ser dividido em três zonas, a saber:

- ❖ Zona úmida: entrada de vagonetas, com comprimento de aproximadamente 1/3 do total;
- ❖ Zona neutra: parte central do secador, com comprimento de aproximadamente 1/3 do total;
- ❖ Zona seca: corresponde à saída das vagonetas, possui comprimento de aproximadamente 1/3 do total.

Na primeira zona o ar tem cerca de 90% de umidade relativa, contribuindo para formação de um ambiente úmido em torno das peças ou material a secar, dificultando a sua ruptura. Na zona central ou neutra, a umidade relativa do ar é de aproximadamente 60%, na qual as peças e/ou materiais já têm perdido boa parte de sua umidade, atingindo a sua maior retração.

O secador túnel é manipulado segundo o tipo de massa, a forma do material a secar e as características gerais do secador. Geralmente estes secadores iniciam a secagem do material com temperaturas em torno de 25° C, aumentada gradativamente até 120°C, para um secador de 80 a 100 metros.

2.7.2. Regulagem de Secadores Contínuos

As maiores variações na necessidade térmica de um secador contínuo são devidas às variações do tipo de produto. Geralmente um secador é dimensionado, quanto à necessidade de calor, quantidade de ar de alimentação e recirculação, em função do tipo do mais importante produto, baseado na produção diária (e horária) desejada e do ciclo mínimo previsto.

No caso de cargas mais leves, seria possível um aumento no ritmo de introdução dos carrinhos somente durante as horas de produção, admitindo que seja possível uma redução posterior do ciclo de secagem, o que atenuaria a necessidade de calor. No caso de material mais pesado, o ciclo de secagem deve ser correspondentemente alongado,

pois nem sempre é fácil superar em muito a produção horária dimensionada, aos quais estão ligadas as capacidades das fontes térmicas, das produções dos ventiladores e das dimensões das canalizações.

Para tornar menos difícil as condições do fim de semana, se adotam vários procedimentos:

- Redução da marcha do forno, ou parada do mesmo;
- Carregamento do secador com materiais pesados;
- Aumento das zonas de depósito.

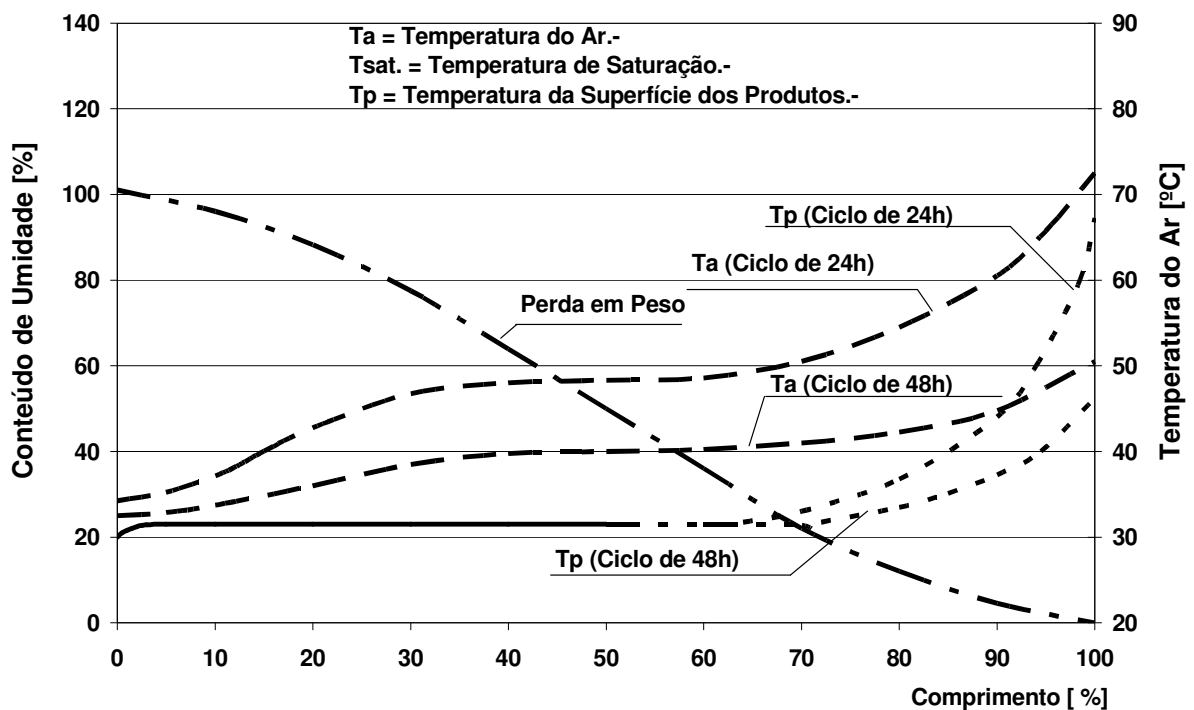


Figura 2.4 – Condições termohigrométricas em secadores contínuos. Facincani (1992).

2.7.3. Consumo de Energia Elétrica nos Secadores Contínuos

O consumo de energia elétrica nos secadores contínuos é a soma de todos os consumos inerentes aos motores elétricos que acionam os sistemas de:

- Recuperação de calor do forno e alimentação do secador;
- Recirculação interna;
- Extração do ar úmido;
- Movimentação dos carrinhos e regulagens diversas.

Os maiores percentuais de consumo dizem respeito às máquinas de recirculação interna e àquelas de alimentação; nos secadores contínuos os vários itens podem ser divididos conforme a tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Consumo de energia elétrica em secadores contínuos. Facincani (1992).

Item	Consumo	Unidade
Recuperação	0,004 – 0,06	kWh / kg de água
Alimentação	0,015 – 0,025	kWh / kg de água
Recirculação	0,013 – 0,023	kWh / kg de água
Extração	0,004 – 0,005	kWh / kg de água
Diversos	0,002 – 0,005	kWh / kg de água
Total	0,038 – 0,064	kWh / kg de água

Considerando uma evaporação de 20% sobre o peso seco, o consumo global irá variar entre **7,6 e 12,8 kWh/ton** de produto seco.

2.8. Novas Tecnologias

A seguir são apresentados os secadores contínuos rápidos conforme Bristot (1996) e um novo sistema conhecido por *Airless Drying*, uma espécie de secagem em autoclave descrita por Brosnan e Robinson (2003), cuja perspectiva é a de oferecer uma secagem rápida e econômica preservando a integridade dos produtos.

2.8.1. Secadores Contínuos Rápidos

Secadores atualmente muito usados, sobretudo depois de grande difusão da monoqueima, produzida em ciclos rápidos, são os chamados “secadores rápidos”, de desenvolvimento horizontal ou vertical. O nome deriva do fato que o ciclo inteiro de secagem advém em um tempo breve (de 35 a 80 minutos). A secagem rápida tem comumente adotado os mesmos conceitos dos secadores túneis e a maior rapidez do processo é só uma consequência do fato que se pode tratar a peça individualmente em condições ótimas.

A rapidez do processo, em comparação ao secador-túnel, em que as placas cerâmicas são introduzidas em pilhas sobre carrinhos, está relacionada à melhoria da troca térmica. De fato, nos secadores rápidos as placas são dispostas em uma única camada (monoestrato), sobre correias transportadoras ou sobre rolos, com notável aumento da superfície da troca térmica. Além disto, tais secadores são dotados de um gerador autônomo de calor, que permite variar as condições térmicas e higrométricas do ar de secagem.

O secador-túnel, por seu lado, explora o calor recuperado do ar de resfriamento dos fornos, com temperaturas relativamente baixas e elevados volumes.

2.8.2. Secagem em Autoclave: *Airless Drying*

Esse procedimento utiliza vapor superaquecido para efetuar a transferência de calor e para controlar a taxa de evaporação da umidade da carga. Isso foi originalmente projetado como um sistema de bateladas, mas recentemente sistemas contínuos têm sido descritos. Essa tecnologia é patenteada pela Heat-Win Ltd no Reino Unido e é também licenciada através da Ceram Research (Robinson et al, 2002).

Na secagem tradicional, as peças são aquecidas conforme ocorre a evaporação, o que resulta em gradientes de temperatura, umidade, e de permeabilidade através da peça. Isso pode resultar em taxas reduzidas de secagem e trincas, ou outros defeitos, se a secagem prosseguir muito rapidamente. Com a técnica da secagem em autoclave, a evaporação da umidade é rigorosamente limitada até todas as peças terem sido aquecidas a uma temperatura de secagem desejada, o que resulta em taxas de evaporação mais rápidas e numa secagem mais homogênea. Uma vez que a peça está a uma temperatura uniforme, a evaporação ocorre em todo o seu volume, e não apenas na superfície como na secagem a ar quente tradicional. Isto resulta em moderados gradientes de umidade e de permeabilidade, que conduzem a um menor número de defeitos e taxas de secagem maiores.

Um desenho esquemático do secador tipo autoclave é apresentado na Fig. 2.5. Como se vê, o secador trabalha com uma atmosfera fechada em recirculação. Quando necessário, durante a fase de secagem, vapor é injetado apenas para controlar a pressão no secador e para controlar a taxa de secagem no segundo estágio da mesma. Essa atmosfera fechada oferece a economia imediata do custo para aquecimento contínuo do ar ambiente para se secar a carga.

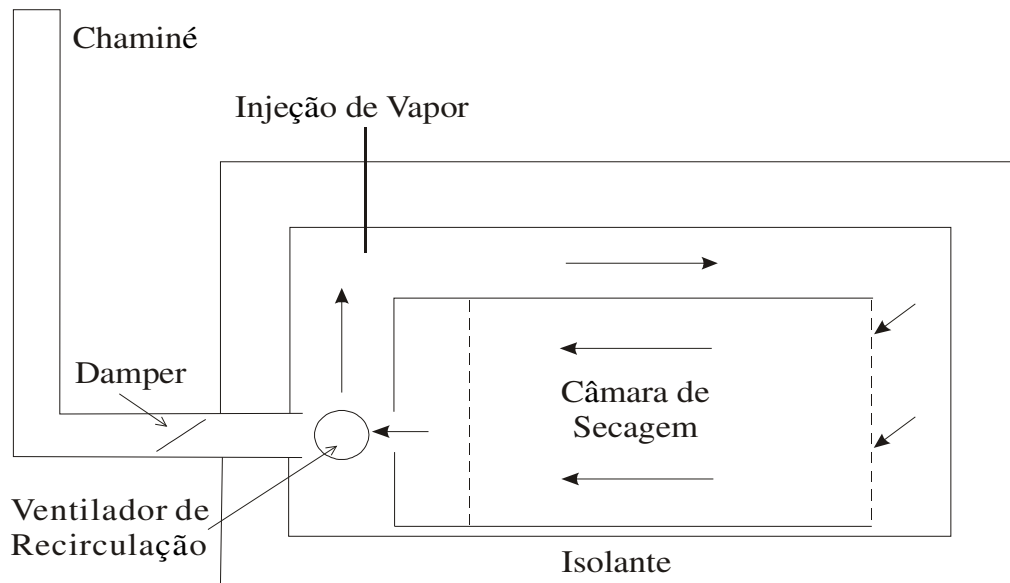


Figura 2.5 - Secador tipo autoclave. Brosnan e Robinson (2003).

O primeiro estágio de secagem é conhecido como o estágio de preparação. Depois que as peças são carregadas para dentro da autoclave, ela é selada e aquecida indiretamente. A atmosfera que está contida no secador é recirculada e aquecida continuamente para trazer a temperatura do sistema para aproximadamente 100°C. Um perfil típico de um ciclo de secador autoclave é representado na Fig. 2.6. Conforme a carga e a atmosfera do secador são aquecidas, um pouco de água é evaporada da superfície das peças verdes (úmidas) e o conteúdo de vapor da atmosfera aumenta até a saturação para a temperatura particular do secador. Quando a atmosfera do secador está saturada, o estágio de preparação está completo e a secagem propriamente dita da peça pode prosseguir.

Na medida em que a atmosfera saturada de vapor é recirculada no secador, uma evaporação adicional ocorre a partir das peças e, assim, a taxa de vapor liberado pelo *dumper* controla a taxa de secagem. Uma vez que a temperatura das peças não pode exceder os 100°C enquanto a secagem se realiza, um aumento na temperatura do elemento indica que toda a umidade foi evaporada e o estágio de secagem está completo. Esse aumento na temperatura é também indicado na Fig. 2.6.

Essa técnica de secagem em autoclave tem muitas semelhanças com a secagem por microondas, na qual a secagem é muito mais homogênea do que na tradicional secagem a ar quente. Uma vez que a peça é trazida à temperatura de secagem antes de a maior parte da secagem ter sido realizada, a secagem prossegue através do volume da peça. Inversamente, para a secagem a ar quente tradicional, ar quente colide na superfície da peça causando evaporação na superfície. Essa evaporação na superfície,

tipicamente resulta em retração e restrição dos poros, o que atrasa o transporte adicional de água da parte mais interna da peça. O resultado desse tipo de secagem é que a peça seca a partir da superfície até o seu centro e a umidade evaporada na região de maior profundidade do elemento tem cada vez mais dificuldade no caminho, até alcançar a superfície do elemento. Mais aquecimento volumétrico, como na técnica de secagem em autoclave, onde a evaporação ocorre em toda a seção transversal da peça, resulta na secagem da peça do interior para a superfície. Essa condição significa que o caminho para a umidade evaporada migrar para a superfície não é restringido durante a secagem e maiores taxas de evaporação podem ser alcançadas com segurança.

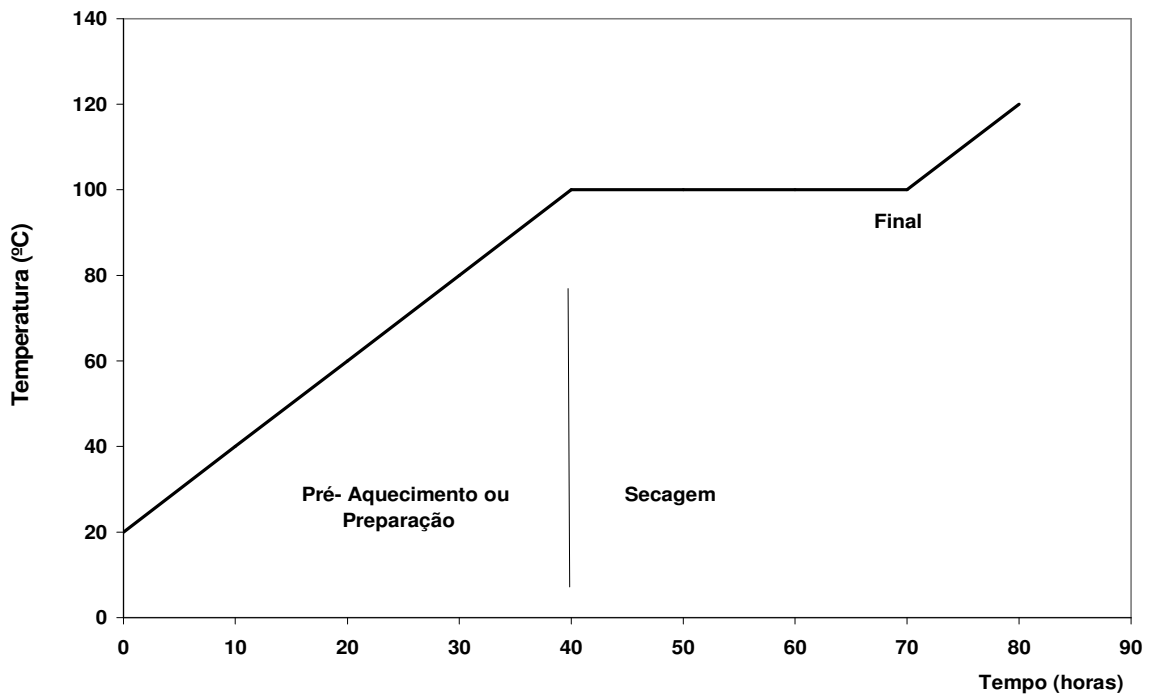


Figura 2.6 – Ciclo de um secador tipo autoclave. Brosnan e Robinson (2003).

Apesar das vantagens desse método, ele não está livre de riscos. Assim como em qualquer processo de secagem, rachaduras podem ocorrer se a taxa de evaporação for muito alta e se a pressão da umidade evaporada no interior dos poros exceder a resistência da peça. Similarmente, se o aquecimento inicial é muito rápido, rachaduras podem resultar da secagem prematura da superfície da redução da permeabilidade da peça, o que inibe o transporte adicional de água à superfície.

2.9. Fenômeno da Secagem da Argila

2.9.1. Introdução

A secagem de muitos materiais, dos quais a argila é um bom exemplo, é acompanhada por uma contração do volume, devido à remoção da água. Por isso, é necessário que não ocorra um gradiente muito grande de umidade no interior do material durante a secagem, e conseqüentemente, zonas de retração diferenciada, tais que induzam tensões perigosas à integridade do próprio material.

No estudo do fenômeno da secagem da argila, observa-se que a eficiência deste processo está ligada tanto às questões termodinâmicas quanto às questões morfológicas do meio poroso que é a argila. As condições de secagem dos materiais cerâmicos são relativamente críticas quanto à integridade dos mesmos. A velocidade de secagem deve ser condicionada à velocidade do fenômeno da migração da água, que é relativamente lento. Isto visa evitar que a secagem superficial, mais rápida, leve a fissuras na peça.

Em geral a secagem, seja ela natural ou artificial, requer grandes quantidades de ar para cumprir três funções básicas: o transporte do calor necessário à evaporação, o arraste do vapor de água produzido e a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça. Sob o aspecto termodinâmico, analisa-se a influência da temperatura e da umidade relativa do ar no processo. A umidade relativa do ar é uma relação entre a pressão parcial do vapor contido neste ar e a pressão de saturação do vapor na sua temperatura. A pressão de saturação do vapor de água no ar aumenta com a temperatura e quanto mais distante da pressão de saturação estiver a pressão parcial do vapor, maior a capacidade do ar de absorver o vapor de água. Portanto, a capacidade do ar em absorver vapor de água cresce com a temperatura. Além disso, ar mais quente diminui o volume de ar necessário à secagem, reduzindo a potência dos exaustores e circuladores de ar, diminuindo-se os custos de secagem.

A Fig. 2.7 mostra o perfil de umidade de uma peça verde (úmida), sujeita ao fluxo de ar em ambos os lados. A secagem começa no tempo ($t_i = 0$) com uma quantidade de água distribuída uniformemente no produto. Com a continuação do processo, a peça verde demonstra um perfil de umidade aproximadamente parabólico. O interior da peça contém um maior conteúdo de água em relação à área exterior. Isso significa que a retração progrediu mais externamente do que internamente. O exterior da peça tende a contrair-se, mas é impedido pelo interior. Conseqüentemente, ocorre tensão de compressão no interior e tensão de tração no exterior. A peça verde é muito mais sensível a tensões de tração do que as de compressão. Se as tensões tornam-se muito grandes a

ponto de não poderem ser absorvidas pelas forças de ligação da massa, a rachaduras de secagem ocorrem como indicado na Fig. 2.8. Para evitá-las, portanto, é importante que o material apresente a menor diferença de umidade possível.

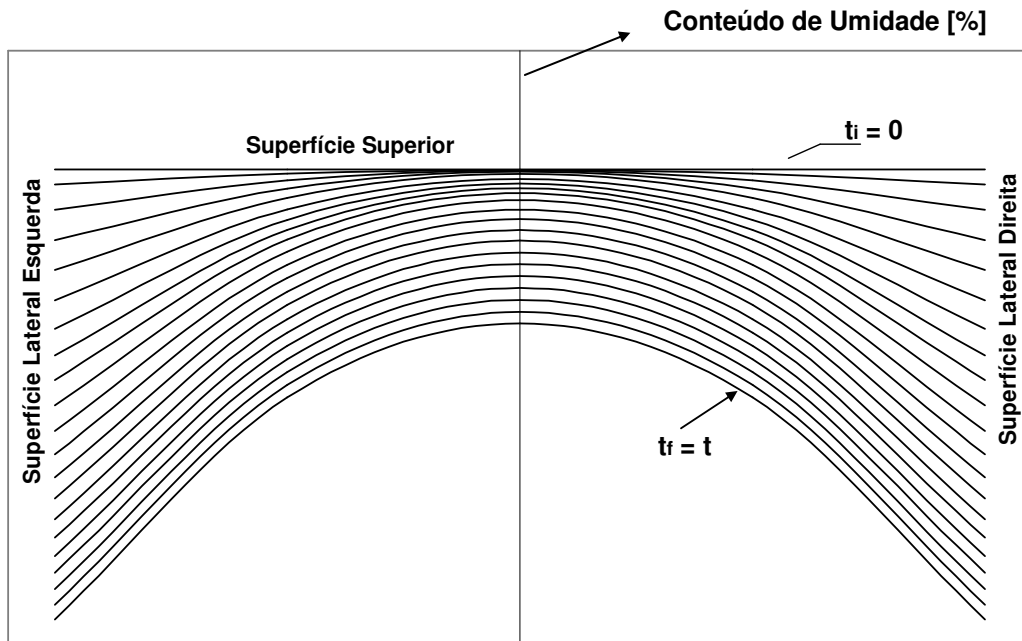


Figura 2.7 – Gradiente de umidade na seção transversal da peça. Telljohann (2003).

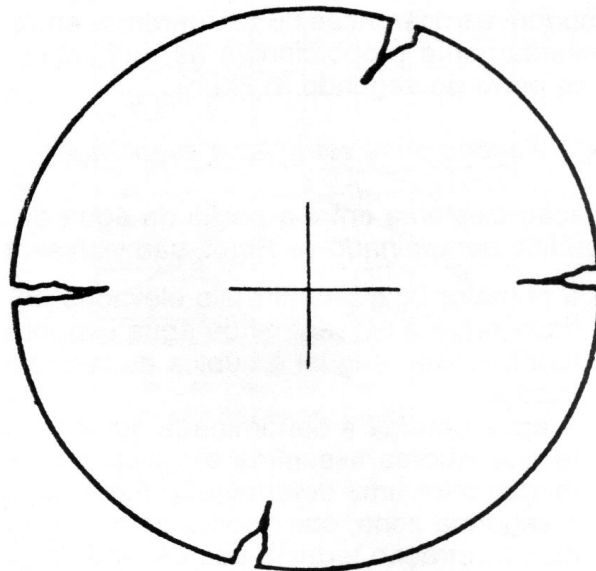


Figura 2.8 – Trincas na zona de maior retração. Facincani (1992).

Para materiais extrudados a quente, as temperaturas internas permanecem maiores do que aquelas da superfície até quase se atingir o teor de umidade crítica. Neste caso, os gradientes de umidade são notavelmente inferiores àqueles das peças extrudadas a frio.

Os tempos necessários para a secagem, em igualdade de temperatura, de umidade ambiente e de matéria-prima, são teoricamente proporcionais:

- à espessura do produto, no primeiro estágio;
- à espessura elevada a uma potência próxima de dois, no segundo estágio.

2.9.2. Fases da Secagem

De um espelho de água livre que mantenha a sua extensão superficial em contato com um fluxo de ar a temperatura e umidade relativa constantes, evaporam quantidades iguais de líquido, em períodos iguais de tempo. O mesmo fenômeno se manifesta na superfície de uma peça extrudada a úmido, enquanto que esta resulte molhada, mas os limites e o desenvolvimento do fenômeno são diferentes:

- Se a evaporação ocorre muito lentamente, uma vez atingido um determinado teor de umidade (umidade crítica), se interrompe o fluxo de líquido do interior para a superfície, e cessa aí o regime constante de evaporação;

- Se a evaporação superficial é acelerada além de certo limite, o fluxo de líquido para a superfície se interrompe, e o chamado teor de umidade crítica aumenta. Termina, então, o período de evaporação constante das camadas superficiais.

O teor de umidade crítica (ou ponto crítico) é o ponto a partir do qual o regime de evaporação decresce e as quantidades evaporadas se reduzem no tempo. Se o fenômeno ocorre com regularidade e sobre produtos de pequena espessura, a retração conseqüente à perda de água se efetua somente durante a primeira fase de secagem.

Na primeira fase da secagem, o transporte interno de água ocorre graças a forças capilares. Se essas forças não forem mais suficientes para garantir o fluxo de massa de água do interior da peça verde (úmida) à sua superfície, a frente de evaporação desloca-se para o interior da peça. Neste momento, a segunda fase da secagem inicia-se – esta fase não é correspondente com a segunda fase de retração. Então a velocidade de secagem sofre uma queda progressiva. Na terceira fase de secagem, a peça verde apresenta um comportamento higroscópico. O produto em secagem alcança um equilíbrio do conteúdo de umidade correspondendo às condições climáticas externas.

A primeira fase de secagem é de grande importância. Mais de 60 % da umidade do produto é liberada nesta fase. Nesse período ocorre também retração, processo de grande interferência na qualidade da peça. As rachaduras não são causadas pela retração em si, mas graças às diferenças de retração. Em algumas ocasiões as trincas são causadas mais por baixa resistência mecânica do que por pequenas contrações.

Supondo-se que a secagem efetua-se em condições exteriores constantes (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar), ela pode ser definida como mostra o gráfico da Fig. 2.9.

Em 1921, Bigot definiu que a secagem ocorre em três fases, após um período de indução (A), que é o período de adaptação do produto com as condições nas quais se efetuará a secagem:

1ª Fase (A-B): Diminuição de volume proporcional à água eliminada. A velocidade de secagem é constante. Nesta fase a resistência de convecção controla o processo. Ocorrem variações sensíveis nas dimensões da peça, devido à aproximação dos grãos, pela saída da água coloidal. Nesta fase da secagem, a água migra até a superfície da peça, formando uma película e daí, é evaporada. Este período é dito constante porque, à medida que a água evapora, esta é repostada pela difusão do interior da peça. A velocidade com que a água de superfície do sólido é eliminada, é igual à velocidade em que chega do interior do mesmo. Desta maneira a superfície do material mantém-se com umidade constante. A temperatura na interface é constante e o calor que chega é consumido integralmente para evaporar o líquido. Assim a velocidade de secagem é determinada pela velocidade de evaporação. O período de velocidade constante termina quando se atinge o ponto crítico, isto é, quando a peça começa a mudar de cor pelo desaparecimento do filme de água.

2ª Fase (B-C): Esta fase é de pouca duração; ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, que muda de cor. Neste período da secagem, a quantidade de água que se desloca por capilaridade ou por difusão para a interface é cada vez menor em consequência da formação de vazios no interior da peça. A água evaporada decresce gradativamente, correspondendo a uma contração não proporcional.

3ª Fase (C-D): Extinção da diminuição de volume e os poros manifestados são proporcionais à água eliminada. Está caracterizada pela expulsão das últimas quantidades de umidade, de origem intersticial. A velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero. Esta fase é controlada pela permeabilidade. A última fase da secagem nem sempre é alcançada nos secadores, sendo muitas vezes executada nos fornos de queima.

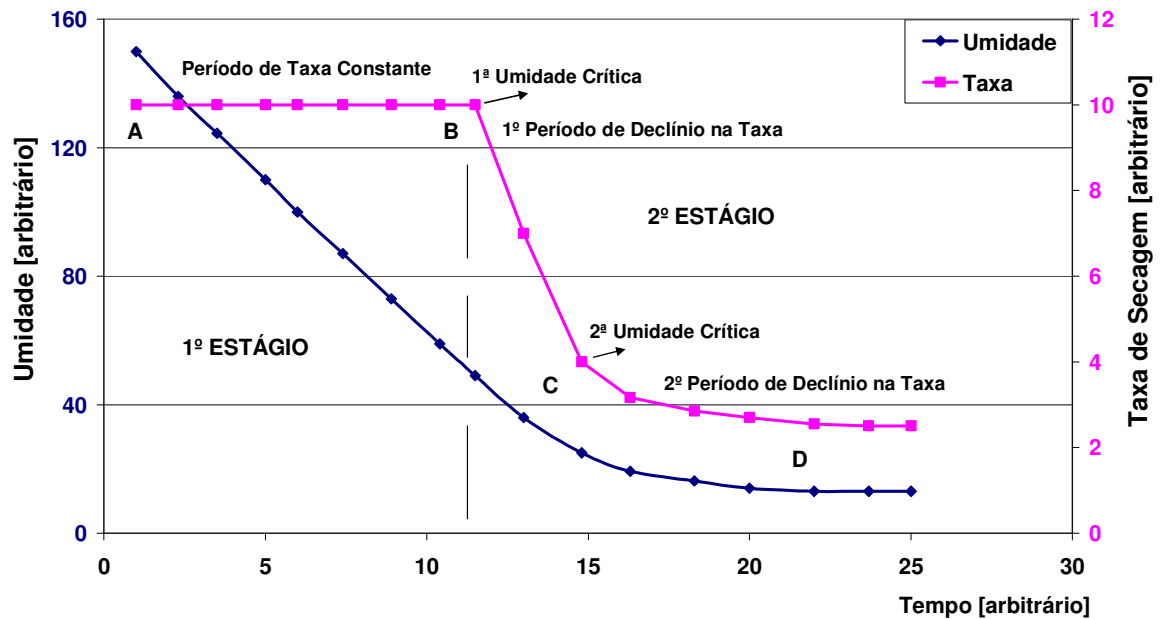


Figura 2.9 – Fases da secagem: Curva de secagem e diagrama de Scherwood. Brosnan e Robinson (2003).

2.9.3. Retração

A Fig. 2.10 mostra um esboço do comportamento de uma massa cerâmica no processo de secagem. No início da secagem, todas as partículas de argila da massa estão cercadas de água por todos os lados. Com a liberação da água, as partículas aproximam-se e a massa retrai. Na primeira fase da retração, o volume decrescido do produto úmido é proporcional ao decréscimo do volume de água. No decorrer da secagem, as partículas aproximam-se progressivamente até, finalmente, encostarem-se. A retração continua a uma velocidade menor, uma vez que a perda de água passa a ser parcialmente compensada pela formação de poros. Este período é definido como a segunda fase de retração. Na última fase a retração assume um estado final. Uma secagem adicional aumenta o volume do poro, porém o volume total da peça permanece constante.

A relação existente entre a perda de água de uma massa e sua retração é mostrada pela Fig. 2.11. No gráfico denominado de Bigot, são visíveis três zonas bem definidas:

- A primeira com teores mais elevados de umidade, na qual se nota uma estreita proporcionalidade entre o percentual de água evaporada e o percentual de retração linear (a retração linear, teoricamente, é igual à raiz cúbica da retração volumétrica), ambas referida às condições finais de secagem. A água perdida é denominada de água de

retração. Neste campo é possível avaliar rigorosamente que valores assumiriam a retração se se fizesse variar as quantidades de água de conformação para uma determinada matéria-prima (parte tracejada da Fig. 2.11);

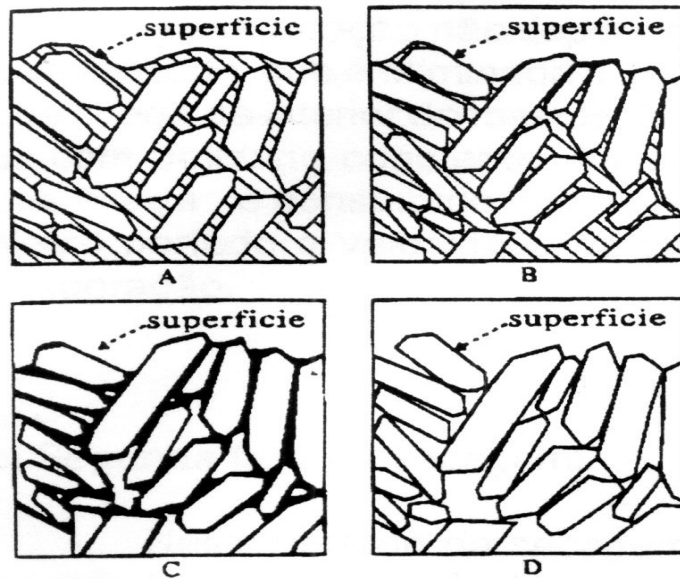


Figura 2.10 – Fases da retração. Apostila de tecnologia cerâmica(1990).

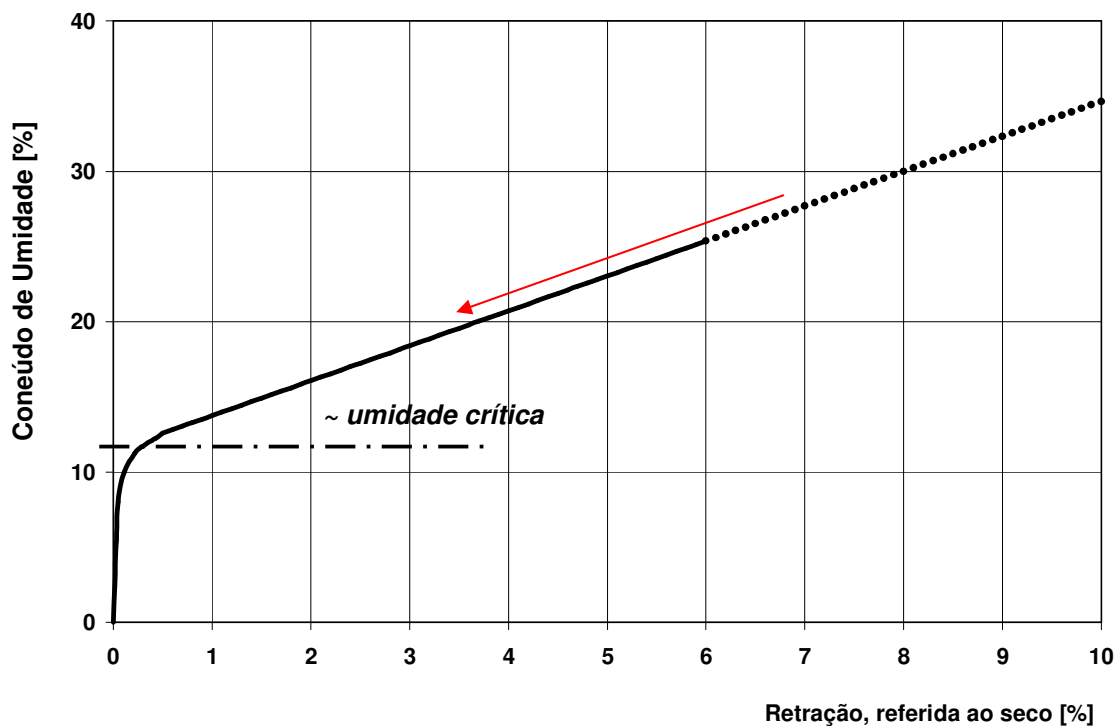


Figura 2.11 – Curva de Bigot: perda de água e retração. Facincani (1992).

- A segunda zona, com teores intermediários de água, nos quais as perdas de água continuam, mas a retração termina decrescendo rapidamente;

- A terceira zona, com teores mais baixos de umidade, nos quais a água pode ser evaporada, sem que a retração se modifique mais (água de porosidade).

A Tab. 2.2 fornece intervalos característicos nos teores de umidade para os três tipos de massa diferentes.

Tabela 2.2 – Percentual de água do ponto crítico. Facincani (1992).

<i>Tipo de massa</i>	<i>% H₂O conformação</i>	<i>% H₂O ponto crítico</i>
Pouco plástica e de granulometria grossa	17 - 22	8 - 12
Mediamente plástica e de granulometria fina	22 - 28	8 - 13
Muito plástica e de granulometria finíssima	26 - 34	10 - 16

2.10. Rachaduras e Descoloração

O trabalho de Telljohann (2003) explora as causas das rachaduras e da descoloração de secagem e apresenta maneiras de evitá-las. Reduzir a velocidade de secagem e aumentar a temperatura do produto verde a um valor abaixo da temperatura crítica da matéria-prima são técnicas sutis, a fim de se obter produtos que não apresentem rachaduras e descolorações.

2.10.1. Introdução e Definição do Problema

Rachaduras e descoloração são indesejáveis fenômenos que ocorrem em peças verdes durante sua secagem, prejudicando sua qualidade. Descolorações são particularmente indesejáveis nos produtos cerâmicos de face reta como tijolos de parede aparente, pavimento e telhas. As rachaduras devem ser evitadas em todos os produtos; sua presença e a ocorrência de escórias dependem, em boa medida, das condições de secagem. Através de um controle preciso, esses problemas podem ser prevenidos ou, no caso das escórias secas, substancialmente reduzidos.

2.10.2. Reduzindo a Suscetibilidade às Fissuras de Secagem

Graças às forças de capilaridade, o líquido evaporado na superfície é repostado do interior da peça verde. O transporte de capilaridade da água é descrito conforme a seguinte equação:

$$m_{\text{evap}} = -\alpha \cdot \rho \cdot \frac{dy}{dz} \quad (2.1)$$

Onde:

m_{evap} - taxa de secagem;

α - coeficiente de condutividade hidráulica;

ρ - densidade relativa da substância seca;

$\frac{dy}{dz}$ - gradiente de umidade.

O gradiente de umidade $\frac{dy}{dz}$ prevalecendo na secagem do produto é responsável pela tendência da formação de fissuras. A equação (2.1) demonstra que o gradiente de umidade, responsável pelo risco de rachaduras, pode ser reduzido com a diminuição da velocidade de secagem. A tendência de a peça rachar também pode ser reduzida ao se aumentar o coeficiente de condutividade de umidade da peça.

Na primeira fase de secagem, a velocidade de secagem depende das condições externas, i.e., do clima de secagem, da qualidade da transmissão de calor, mas, também, da geometria do produto verde. Isto pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$m_{\text{evap}} = \frac{h}{\text{entalplv}} \cdot (T_L - T_R) \quad (2.2)$$

Onde:

h - coeficiente de transmissão de calor;

$(T_L - T_R)$ - diferença psicrométrica de temperatura;

entalplv - entalpia de evaporação da água.

A velocidade de secagem m_{evap} pode ser reduzida através de um menor coeficiente de transmissão de calor h ou pela diminuição da diferença psicrométrica de temperatura $(T_L - T_R)$. A diferença psicrométrica $(T_L - T_R)$ de temperatura é a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do tijolo verde, a ser determinada pelo clima do secador. O coeficiente de transmissão de calor varia com a velocidade de fluxo do ar. Quanto menor a diferença psicrométrica de temperatura, menor será o coeficiente de transmissão de calor.

Entretanto, uma redução da velocidade de secagem não é geralmente desejada. As rachaduras podem ser evitadas também ao se aumentar o coeficiente de condutividade hidráulica. Quanto maior a condutividade de umidade na peça verde, menores serão as diferenças locais do conteúdo de água e, conseqüentemente, menores as tensões causadas pelos diferentes estados de retração. O coeficiente de condutividade hidráulica é a medida da mobilidade da água no sistema capilar do produto verde.

$$\alpha(y,T) = \frac{\sigma(T)}{\mu(T)} \cdot f(y) \quad (2.3)$$

$\sigma(T)$ - tensão superficial;

$\mu(T)$ - viscosidade dinâmica da água;

y - conteúdo de água.

O coeficiente de condutividade hidráulica é proporcional à tensão superficial σ e inversamente proporcional à viscosidade dinâmica μ da água, ambas dependentes da temperatura. Além disso, esse coeficiente é dependente do conteúdo de água y. Com a diminuição brusca da viscosidade dinâmica ao elevar-se a temperatura, o quociente entre a tensão superficial e a viscosidade dinâmica aumenta, apesar de uma desprezível redução da tensão superficial (Fig. 2.12). Assim, com o aumento da temperatura um aumento significativo da condutividade de umidade pode ser alcançado. Como resultado de um aumento da velocidade de migração da água através do sistema capilar, obtém-se um melhor balanço do conteúdo da água dentro do produto verde. Então, temperaturas maiores na peça verde durante a secagem podem reduzir as tensões internas e, conseqüentemente, o risco de rachaduras.

Na primeira fase de secagem a temperatura do produto verde é equivalente à temperatura limite de resfriamento, determinada pelo clima de secagem (resfriamento evaporativo). Segundo Telljohann (2003), uma temperatura limite de resfriamento de 25°C seria classificada como muito baixa, mas é, não obstante, encontrada em várias olarias. O valor numérico do quociente da tensão superficial e da viscosidade cinemática apresenta-se, neste caso, em torno de 80. Ao se aumentar a temperatura limite de resfriamento para 39°C, o quociente cresce para 105, correspondendo a um acréscimo de aproximadamente 25%. Conseqüentemente, a condutividade da umidade cresce 25%. Aumentando-se a temperatura limite de resfriamento de 25°C para 52°C, eleva-se a condutividade de umidade em até 50%. A velocidade de migração da água é consideravelmente aumentada e, então, uma menor suscetibilidade às rachaduras pode ser esperada.

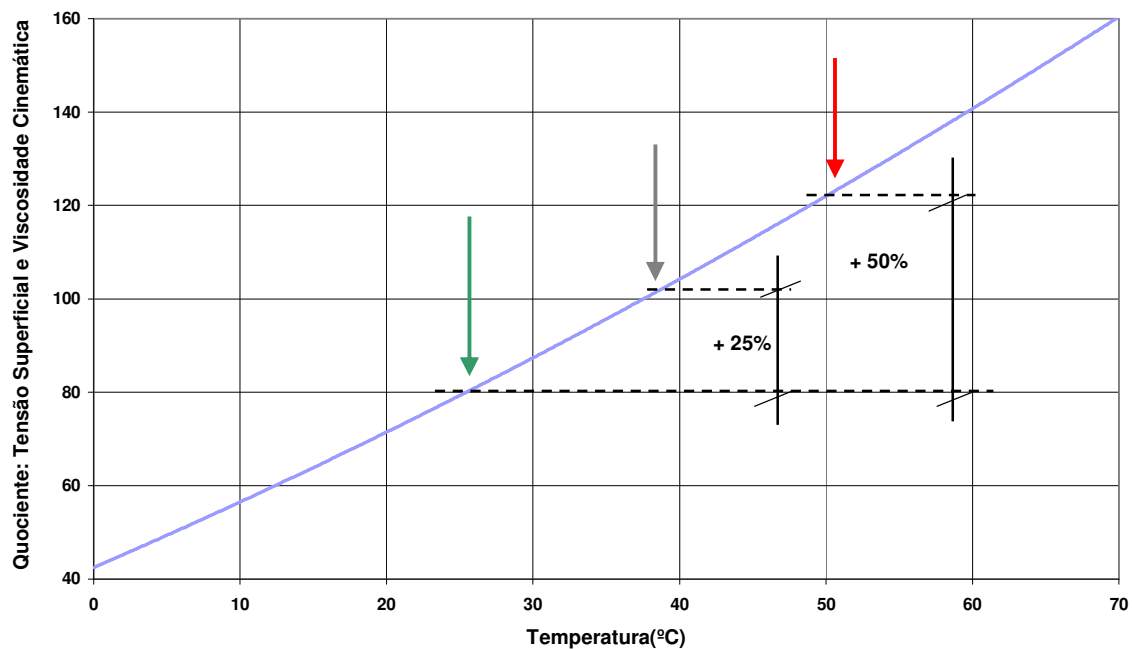


Figura 2.12 – Quociente da tensão superficial e viscosidade cinemática. Telljohann (2003).

Devido a uma maior temperatura, a primeira fase de secagem é também ampliada, não necessariamente no tempo, mas na ocorrência de uma menor média do conteúdo de umidade no produto de secagem. Considerando menores gradientes de umidade presentes, uma menor média do conteúdo de umidade no produto de secagem pode ser alcançada, sem o transporte de água para a superfície da peça verde ser exaurido.

Reduzir a sensibilidade às rachaduras através da elevação da temperatura do produto verde implica, porém, em algumas restrições. O aumento da temperatura do produto verde na primeira fase de secagem traz vantagens apenas até um certo limite. As máximas temperaturas dependem da matéria-prima utilizada. Se a temperatura máxima do produto verde é ultrapassada, o risco de rachaduras cresce, apesar de a mobilidade da água na peça ser melhorada e de ter, assim, um efeito benéfico no balanceamento da umidade. Isso ocorre provavelmente porque a massa, como mostra a experiência, perde sua força com a elevação da temperatura. Se a temperatura selecionada para um produto verde é muito alta, a peça apresenta uma resistência tão pequena a ponto de propiciar a formação de fissuras mais rapidamente. Em uma linha de produção de tijolos de parede aparente, por exemplo, determinou-se que, com a temperatura limite de resfriamento de 50°C, as primeiras rachaduras ocorrem logo depois de 63 % do tempo de secagem, em comparação à temperatura de 40°C. Telljohann (2003) relata que o acréscimo da

suscetibilidade às rachaduras pela perda de resistência da massa, com aumento da temperatura foi, em casos especiais, até superior.

Ao se permanecer abaixo do estado crítico de temperatura, que depende da matéria-prima, a sensibilidade à rachadura decresce, entretanto, com o aumento da temperatura limite de resfriamento. Isto pode ser visto na Fig. 2.13, na qual a temperatura cresce de 35° C para 45° C e o tempo até a primeira formação de rachadura é acrescida de 43 % para a massa A e, ainda, 20 % para a massa B. Isso é o mesmo que dizer que uma umidade relativa do ambiente um pouco maior, diminui a suscetibilidade a rachaduras.

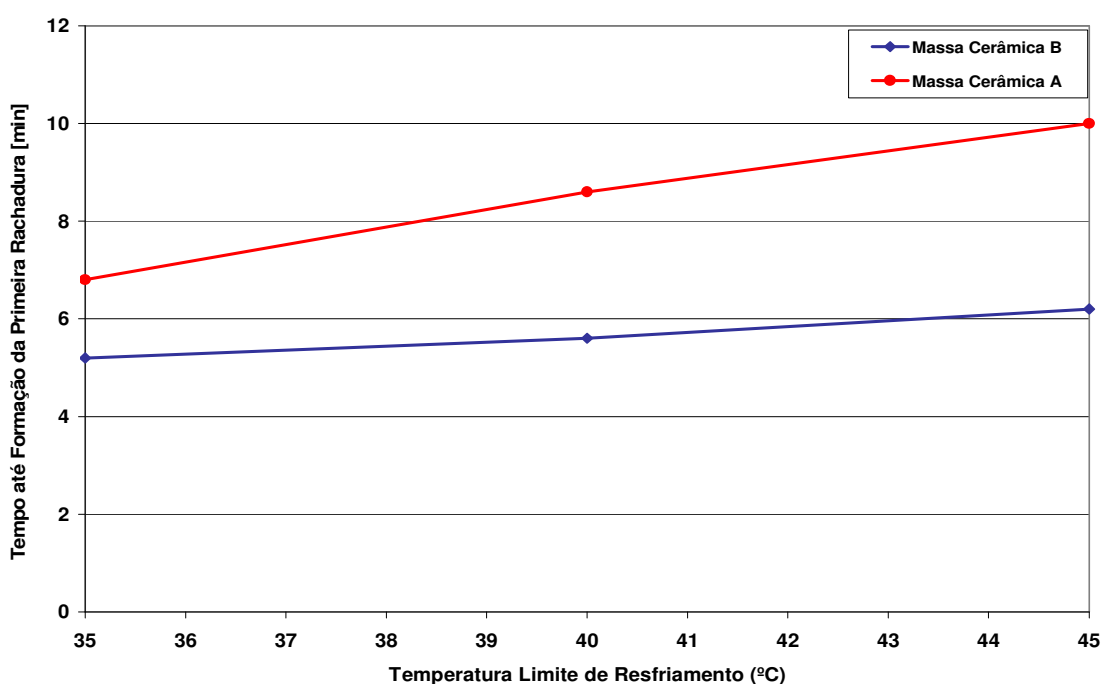


Figura 2.13 – Secagem: diferentes temperaturas-limite de resfriamento. Telljohann (2003).

2.10.3. Ocorrência da Descoloração de Secagem

As escórias de secagem são freqüentemente responsáveis por reclamações em relação à aparência visual dos produtos. Elas são causadas pelo sulfato de cálcio. A matéria-prima pode contê-lo na forma de mineral de gipsita. Entretanto, o sulfato de cálcio é formado geralmente pela decomposição da pirita. Pirita é um típico mineral encontrado em peças de barro.

Durante a secagem, o sulfato de cálcio é transportado junto com a água para a superfície da peça verde (úmida). Então, a água evapora-se e o sulfato de cálcio cristaliza-se. O sal depositado aparece na forma de manchas brancas a serem

geralmente reconhecidas com dificuldade a olho nu nos produtos secos. Ao submeter-se aos subseqüentes processos de queima, o sulfato de cálcio reage com o ácido silícico da massa de barro, formando o silicato de cálcio. O branco característico do silicato de cálcio encontrado na superfície é designado como eflorescência ou escória de secagem. O silicato de cálcio é insolúvel na água e quimicamente muito estável. Então, não há um método prático para retirá-lo. Na Fig. 2.14, dois tijolos são ilustrados, demonstrando diferentes graus de descoloração de secagem.

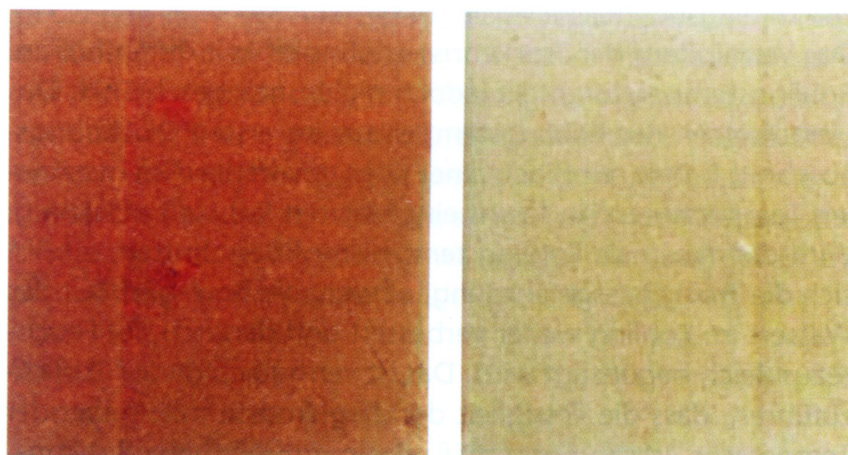


Figura 2.14 – Escórias de secagem em tijolos. Telljohann (2003).

O processo que ocorre quando do surgimento das escórias pode ser explicado a partir do modelo apresentado a seguir.

Na parte superior da Fig. 2.15, existe um diagrama da água preenchida em um tubo capilar no tijolo verde. Com o fluxo da água através das capilaridades até a superfície da peça verde, o sulfato de cálcio dissolvido na água é transportado também na direção da superfície. A água evapora e os íons de sal permanecem na solução remanescente. Como resultado, os íons aumentam sua concentração na região próxima à superfície da peça, o que produz um potencial químico que aumenta o transporte de água. O gradiente de concentração se desenvolve, como pode ser visto na parte inferior da Fig. 2.15. Esse gradiente de concentração gera um fluxo de difusão do sulfato de cálcio, no sentido de diminuir a concentração, sentido oposto ao do movimento da água. Quanto mais forte o fluxo de difusão, comparado ao movimento da água no sentido oposto, menor será a camada cristalizada diretamente sobre a superfície da peça verde e, conseqüentemente, menor o grau de descoloração observado.

Uma grande dependência entre a formação de escória, a velocidade de secagem e, também, a temperatura-limite de resfriamento foi demonstrada em testes práticos reportados por Telljohan (2003).

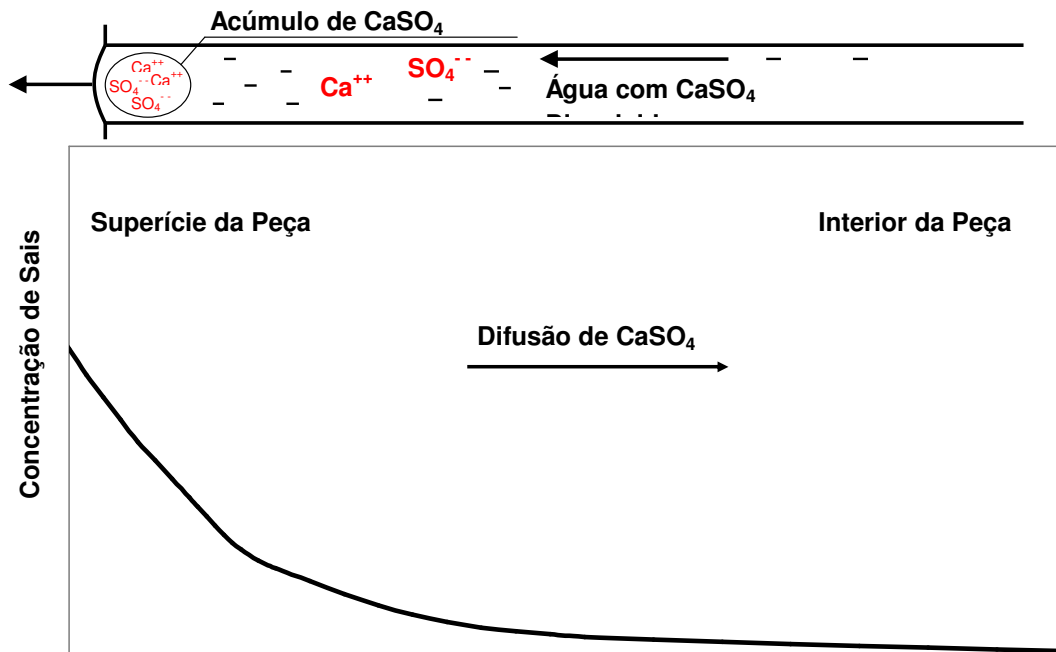


Figura 2.15 – Difusão no sentido do gradiente de concentração. Telljohann (2003).

A descoloração pode ser reduzida ao se reduzir a velocidade de secagem e ao se aumentar a temperatura-limite de resfriamento. Na primeira fase de secagem, a velocidade de secagem é proporcional a diferença psicrométrica e ao coeficiente de transmissão de calor. Esta depende da velocidade do fluxo do ar de secagem.

Na Fig. 2.16, observa-se que a escória de secagem pode ser consideravelmente influenciada pela variação das condições de secagem. Para comparação, a escala de intensidade das escórias se estende de 0 (zero), livre de descoloração, a 10, superfície branca. Valores superiores a 4 já são descolorações brancas de superfície que não devem ser toleradas.

A velocidade de escoamento de ar de 2 m/s, a temperatura-limite de resfriamento de 35°C e a diferença psicrométrica de 30 K resultam numa descoloração de valor 4 na superfície. Esse valor corresponde a uma forte coloração branca no tijolo. Com a mesma velocidade de escoamento e temperatura limite de resfriamento, porém com uma diferença psicrométrica de 1K, a superfície não apresenta praticamente descoloração. Se a velocidade de secagem não pode ser reduzida, a descoloração pode diminuir de 4 para 2 ao se aumentar a temperatura limite de resfriamento de 35° C para 55° C.

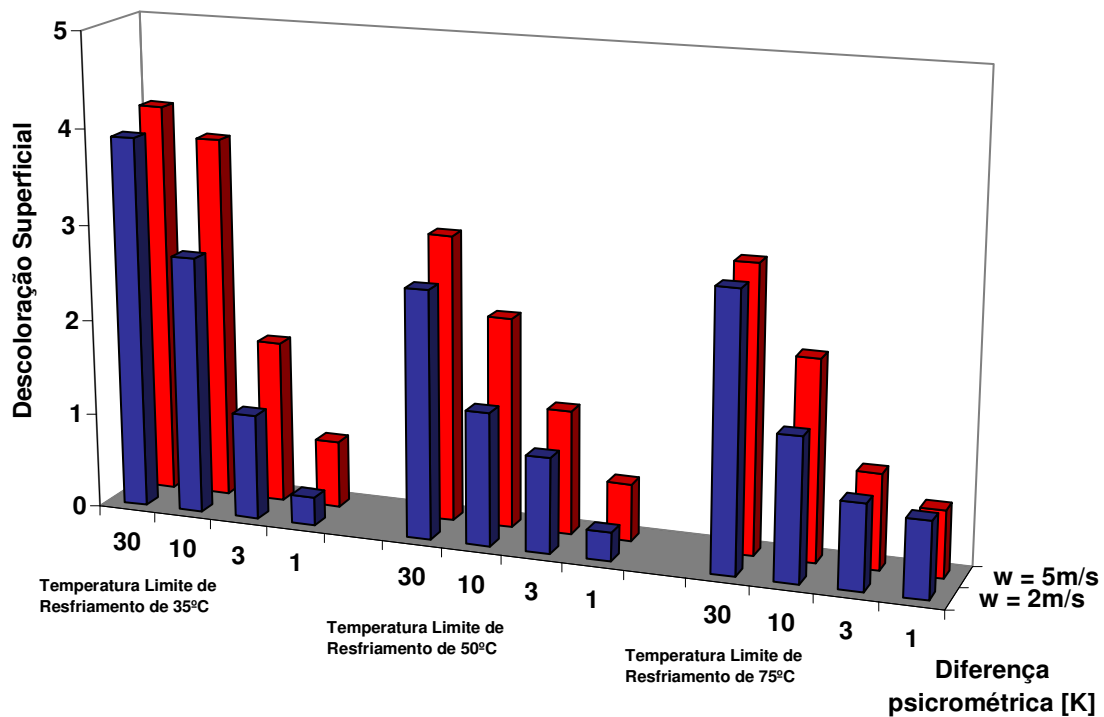


Figura 2.16 – Influência das condições de secagem na descoloração. Telljohann (2003).

A ocorrência de descolorações de intensidades variáveis com as condições de secagem pode ser explicada baseando-se no modelo descrito acima, referente aos processos de difusão. Um grande fluxo de difusão é particularmente alcançado com uma alta temperatura. Este fato explica a redução da descoloração da superfície das peças verdes através do aumento da temperatura. Além disso, a difusão é aprimorada com baixas velocidades de secagem, isto é, baixas velocidades de fluxo da água para a superfície da peça verde levam, assim, a uma redução do depósito de cristal observado como escória de secagem na superfície.

2.10.4. Conclusão

Devido a processos de retração presentes na secagem, tensões mecânicas ocorrem em produtos modelados, possibilitando a formação de rachaduras. A verdadeira causa da formação das rachaduras não é a retração como tal, mas sim as diferenças de retrações. Estas ocorrem devido às variações locais do conteúdo de água durante o processo de secagem.

Quanto maior a condutividade da umidade, menores serão as diferenças locais do conteúdo de água na peça verde e, conseqüentemente, menores as tensões causadas por diferentes estados de retração. Como a condutividade hidráulica aumenta com a temperatura, uma elevada temperatura do produto verde (úmido) durante a secagem pode reduzir as tensões internas e, assim, o risco de formar rachaduras. Entretanto, isto só pode ser aplicado até uma temperatura limite, dependente da matéria-prima. Sob uma temperatura muito elevada, a sensibilidade às rachaduras do produto verde aumenta, apesar de o balanceamento da umidade ser ainda mais favorecido pela maior condutividade de umidade. A provável razão é a perda de resistência da massa do produto verde com o aumento da temperatura e, assim, a massa de argila pode suportar menores tensões. A sensibilidade a rachaduras pode ser também reduzida por uma menor velocidade de secagem, mas isto é, na prática, indesejável na maioria dos casos.

A redução da velocidade de secagem e o aumento da temperatura do produto verde reduzem também as descolorações por eflorescências de secagem. Através da evaporação da água na superfície e, do fluxo da água contendo sulfato de cálcio no interior do produto verde, o gradiente de concentração de sulfato de cálcio dissolvido na água aumenta nos capilares. Esse gradiente gera uma difusão do sulfato de cálcio dissolvido no sentido oposto ao do movimento da água. Quanto mais forte o fluxo de difusão, menos sulfato de cálcio cristaliza-se na superfície. O fluxo de difusão direcionado dentro da massa de argila eleva-se quando a temperatura da peça verde aumenta. Uma menor velocidade do fluxo de água, ou seja, uma menor velocidade de secagem melhora o balanceamento das concentrações e reduz, conseqüentemente, as descolorações de secagem.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1. Estudo experimental da secagem de argila

A velocidade de secagem da peça cerâmica é limitada pelo comportamento do meio poroso da argila. Como toda a umidade das peças se encontra no interior de seus poros, a forma e estrutura destes terão uma grande influência sobre a secagem, de modo que mesmo sob um ambiente termodinamicamente favorável à evaporação da água, a umidade pode vir a ficar presa no interior dos poros da argila. A parte seca da peça sofre então uma contração, dificultando ainda mais a difusão da umidade do interior da peça para a superfície, o que limita a velocidade de secagem da argila. Percebe-se, assim, a intrínseca relação entre o processo de extrusão, com sua influência nas propriedades do meio poroso, e o processo de secagem.

Pouco se conhece sobre a influência que os parâmetros de preparação da massa cerâmica e a conformação das peças têm sobre o desempenho do processo de secagem de uma maneira geral. O trabalho de Vieira, Feitosa & Monteiro (2003) mostra que o enfraquecimento da massa argilosa, pela adição de areia, reduz a quantidade de água necessária à conformação de uma peça e, portanto, reduz também sua retração. No entanto, trabalhos mostrando como a carga de compactação, a granulometria e a quantidade de água no preparo da massa influenciam o processo de secagem são difíceis de encontrar. Deseja-se, nesta etapa do trabalho, investigar a influência destes parâmetros. Para tanto, foi montado um aparato experimental e realizados diversos ensaios de secagem, com diferentes condições de preparo da massa cerâmica das amostras.

3.1.1. Procedimento Experimental

Foi escolhida uma argila utilizada por empresas de cerâmica vermelha da região de Criciúma-SC para a realização deste conjunto de testes. Após completa secagem e moagem, a argila foi peneirada em um equipamento de múltiplas malhas e, as frações obtidas separadas de acordo com a granulometria gerada.

A massa utilizada na preparação de cada amostra foi medida em uma balança eletrônica e prensada em um cilindro por um pistão, com auxílio de uma prensa hidráulica. Foram preparadas várias amostras em formato de disco cilíndrico, com 63 mm de

diâmetro e cerca de 20 mm de altura. Estas amostras foram preparadas com massas de granulometrias diferentes [0,297 – 1,19mm], conteúdos iniciais de umidade diferentes [15 – 25%] e cargas de compactação diferentes [1 – 5 toneladas]. Cada tipo gerado de amostra foi posteriormente levado ao aparato experimental para a determinação de sua curva de secagem.



Figura 3.1 - Tipo de amostras preparadas.

As características das amostras utilizadas nos testes estão resumidas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Características das amostras preparadas.

Característica	Valor	Unidade
Diâmetro	63,0	mm
Altura	20,0	mm
Granulometria	0,297 - 1,19	mm
Carga de compactação	1,0 - 5,0	ton
Umidade inicial	15 - 25	%

3.1.2. Aparato Experimental

É constituído por uma estufa com ventilação interna e controlador programável de temperatura, uma balança posicionada sobre o teto da estufa e uma bandeja para colocação das amostras. A bandeja é acoplada à balança através de um fio inextensível que perpassa o teto da estufa por um pequeno orifício. O aparato experimental conta

ainda com um medidor de umidade relativa e um dispositivo de controle de umidade absoluta.

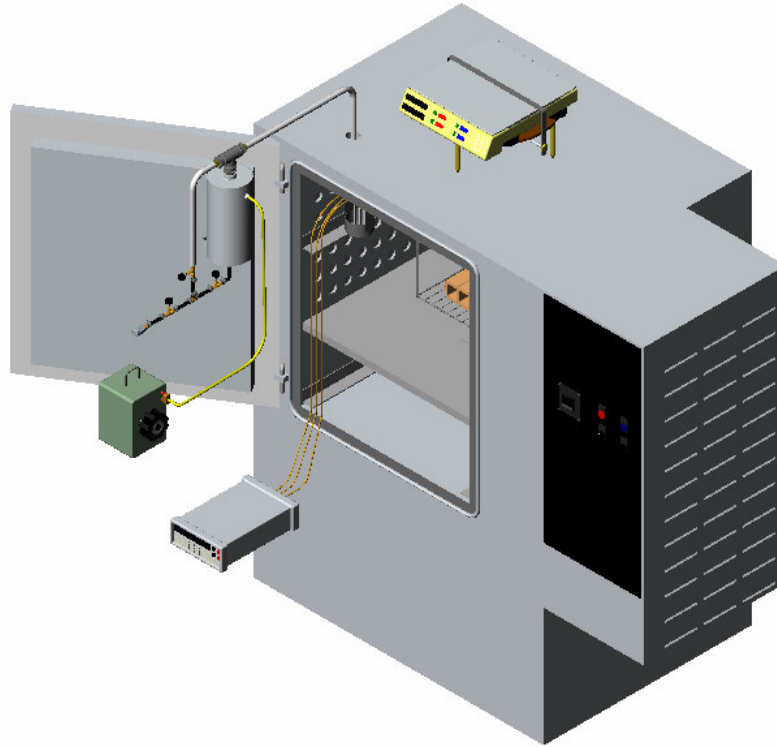


Figura 3.2 – Aparato experimental.

Uma vez que o objetivo é de se investigar a influência dos parâmetros de preparação da massa cerâmica, as condições de operação da estufa foram as mesmas para todos os ensaios, quais sejam, umidade relativa de 3% e temperatura constante de 90°C.

3.1.3. Resultados

O primeiro parâmetro considerado foi o conteúdo inicial de água. Como a medida da retração de secagem de uma peça não depende só da natureza da argila, mas também do percentual de água eliminado, a maior ou menor retração obtida por cada peça poderia modificar as características de secagem das mesmas. Foram realizados ensaios com massas preparadas com 15 e 25% de umidade, mantendo constantes as demais variáveis. Os resultados são apresentados no gráfico da Fig. 3.3.

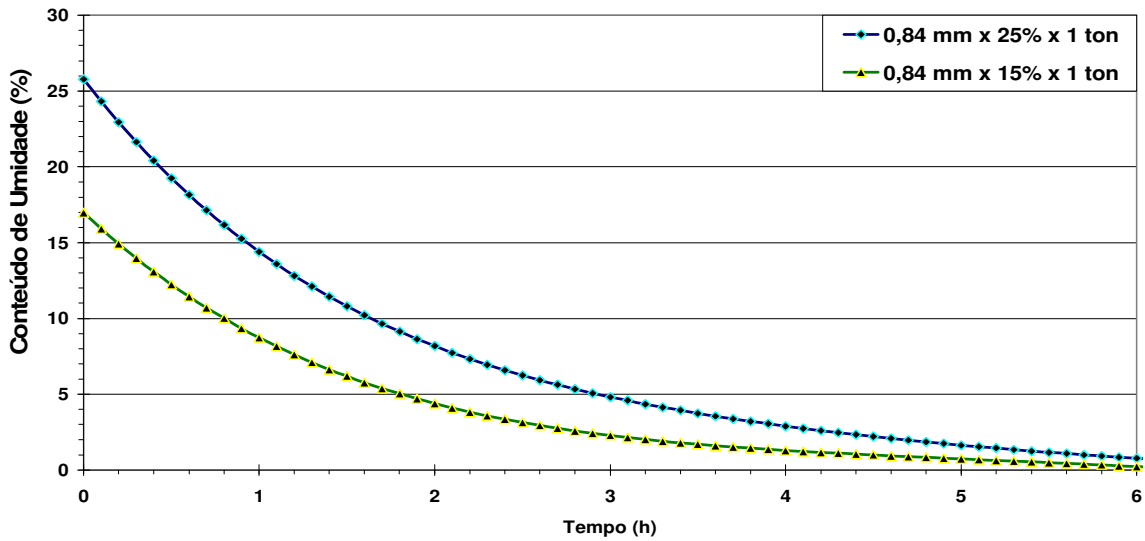


Figura 3.3 – Curva de secagem obtida com diferentes conteúdos iniciais de água.

Tomando-se as derivadas das funções referentes às curvas de secagem da Fig. 3.3, se obtêm as taxas do processo de secagem, Fig. 3.4. Como já era esperado, a amostra feita contendo 25% de umidade apresentou a maior taxa inicial de secagem, em números absolutos [g/h], devido ao maior conteúdo inicial de água presente na amostra.

Para conteúdos iguais de umidade, para percentuais abaixo de 5%, a amostra que foi preparada com conteúdo de umidade inicial maior, mantém uma maior taxa de secagem. Esse efeito se deve ao fato de se utilizar a mesma carga de compactação para as duas amostras, resultando na amostra com maior conteúdo inicial de água, uma maior permeabilidade.

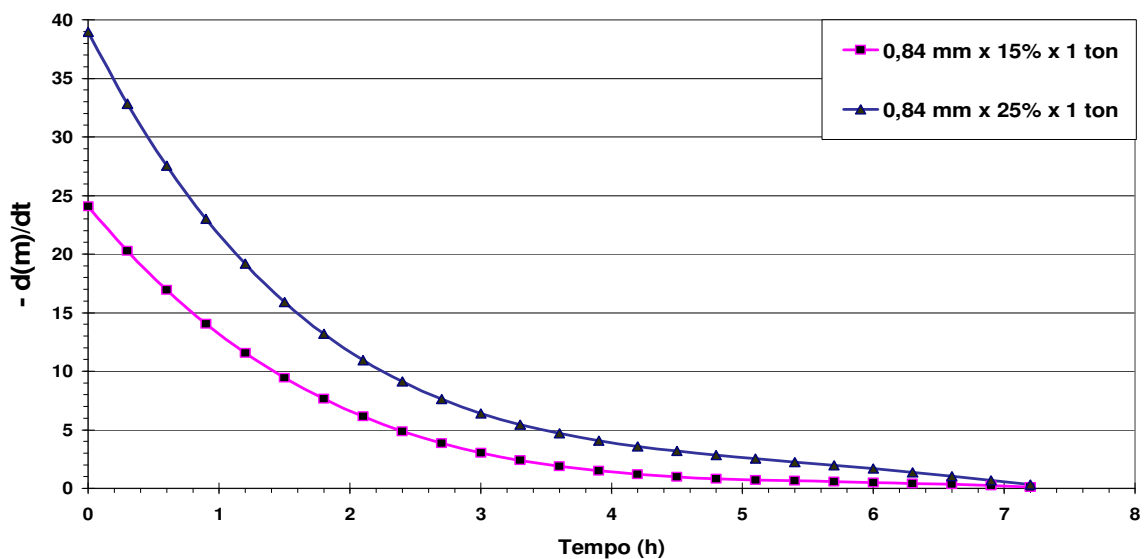


Figura 3.4 – Taxas de secagem obtidas com diferentes conteúdos iniciais de água [g_{água}/h].

Este resultado indica que se podem fabricar peças com conteúdo de umidade favorável à extrusão sem prejuízo do ciclo de secagem. Durante o tempo de espera das peças para entrarem no secador ter-se-ia a secagem natural, reduzindo os níveis de umidade inicial, para no secador aproveitar a maior permeabilidade obtida nas peças em favor da redução do ciclo de secagem.

O segundo parâmetro estudado foi a granulometria, mantidos os demais constantes. Vale ressaltar que o termo granulometria aqui usado se refere ao tamanho dos grãos formados durante as etapas de moagem e peneiramento, simulando o processo de preparação de massa de uma indústria de cerâmica vermelha. Não se trata, portanto, da granulometria do argilomineral.

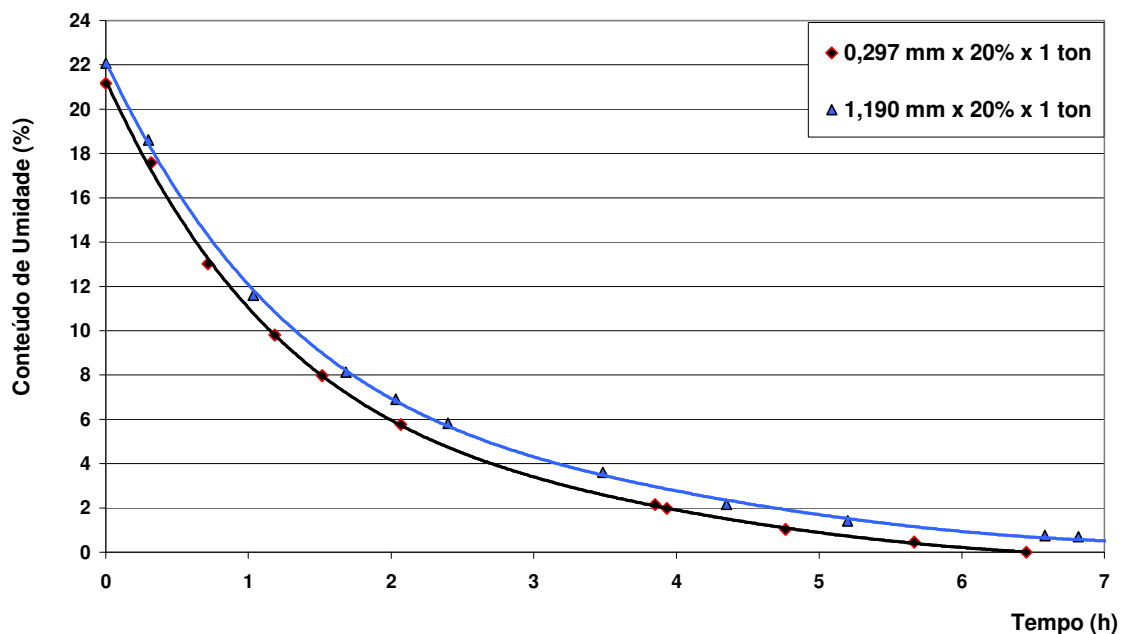


Figura 3.5 - Influência da granulometria na curva de secagem.

Este parâmetro mostrou uma influência relativamente pequena (Fig. 3.5), dentro da faixa de valores analisados [0,297 – 1,19 mm], pois as curvas de secagem são praticamente paralelas durante praticamente todo o processo. Durante a mistura e a prensagem da massa úmida, os grãos se unem dando origem a uma massa mais homogênea, de estrutura lamelar. Com a água, as lamelas se afastam e deixam grandes canais. Assim, o tamanho dos grãos não tem uma influência muito grande na permeabilidade.

O terceiro parâmetro considerado foi a carga de compactação. Nos ensaios realizados com amostras feitas com argila de granulometria de 0,59 mm, os resultados apontam para um decréscimo na taxa de secagem à medida que a carga de compactação aumenta. Este efeito é maior no início do processo, como mostrado nas Fig. 3.6 e 3.7. É mostrado também na Fig. 3.6 que a secagem se inicia na prensagem, pois a amostra prensada com 5 ton reduziu sua umidade inicial de 20% para 18%.

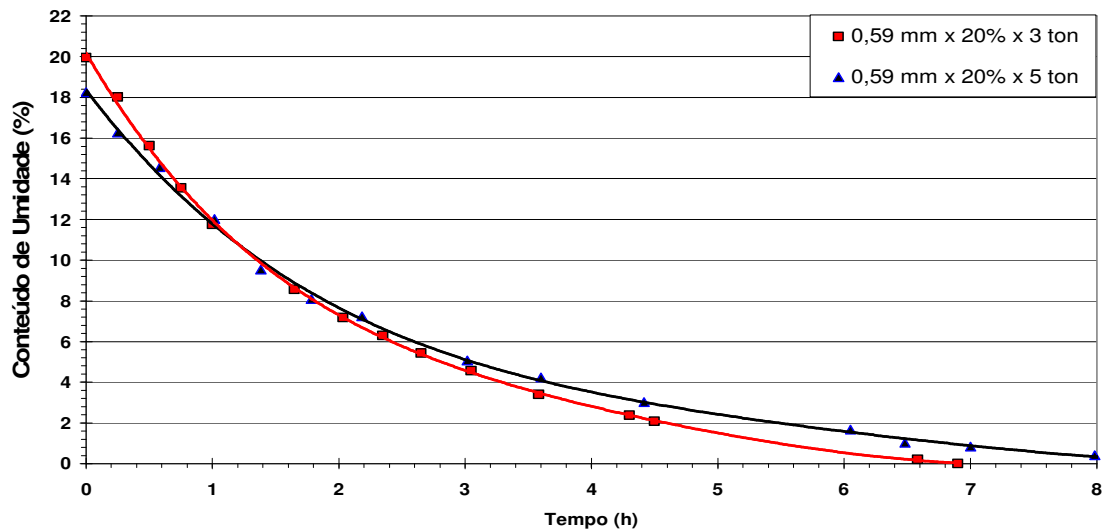


Figura 3.6 - Influência da carga de compactação na curva de secagem

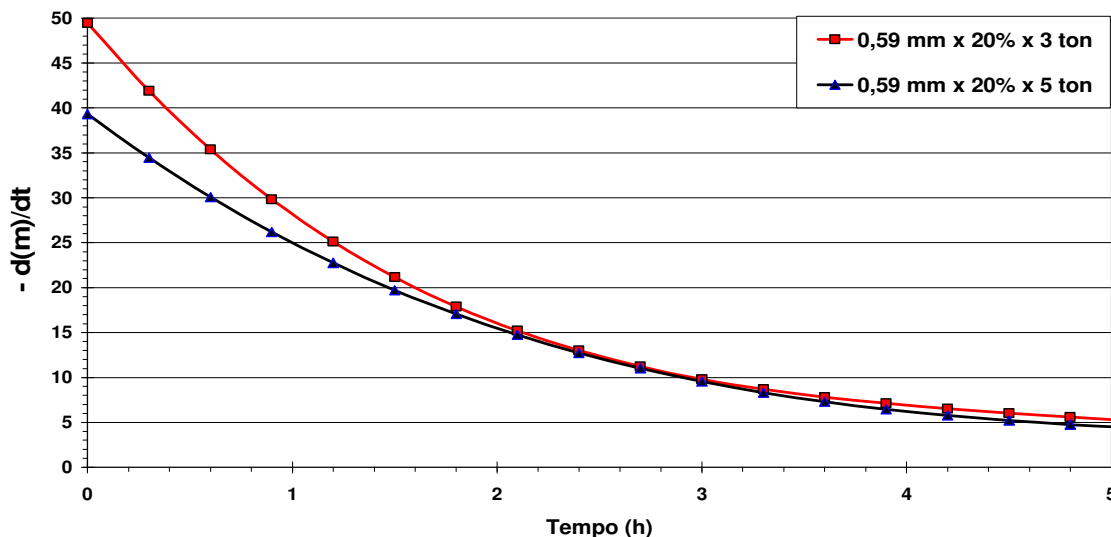


Figura 3.7 – Taxas de secagem obtidas para diferentes cargas de compactação [g_{água}/h]

Este resultado já era esperado, uma vez que o aumento da carga de compactação diminui os espaços intersticiais, dificultando a migração da água até a superfície da peça.

3.1.4. Discussão

A facilidade de secagem de uma peça cerâmica depende de parâmetros físico-químicos, a saber:

- Natureza mineralógica das argilas

As argilas muito plásticas requerem maior tempo de secagem, manifestando grandes contrações e pequenos volumes abertos em seu interior. As argilas pouco plásticas formam texturas menos compactas e, portanto, mais permeáveis, permitindo uma secagem mais rápida.

- Grau de moagem da massa e resíduo

Uma massa preparada com moagem intensiva, tendo baixo resíduo, seca com maior dificuldade do que uma com resíduo de moagem maior.

- Compactação do corpo cerâmico

Em iguais condições de secagem, seca mais rapidamente a peça menos prensada, a se dever, pela sua maior permeabilidade.

- Espessura do corpo cerâmico

Sabendo-se que a evaporação se produz na superfície da peça cerâmica, é evidente que a secagem se realiza de forma mais rápida em peças que tenham grandes superfícies em relação ao seu volume.

De maneira geral, pode-se dizer que, nos ensaios realizados, as taxas de secagem se igualam depois de decorrido cerca de 50% do tempo de secagem, com as amostras apresentando umidade abaixo de 6%. Vale lembrar que, na indústria, é usual se retirar peças dos secadores com teor de umidade em torno de 3%. Assim, metade do tempo de secagem é utilizada para se eliminar os últimos 3% de umidade e que, a otimização dos parâmetros de confecção da amostra influencia, com moderada relevância, somente os primeiros 50% do tempo total.

Estes ensaios servem para se ter uma idéia de em que direção alguns parâmetros de preparação da amostra influenciam o tempo de secagem.

Os valores obtidos nos gráficos para as taxas absolutas e/ou percentuais de secagem podem servir de base para estimativas iniciais de parâmetros utilizados em programas de simulação computacional.

3.2. Medições em Campo

Vários trabalhos foram realizados em empresas parceiras para confrontação com os dados laboratoriais sobre o coeficiente de difusão, curva de secagem e os resultados referentes aos perfis de temperatura e de umidade do ar no interior de secadores.



Figura 3.8 - Secadores da Cerâmica Candelária – RS

Figura 3.9 - Secador da Cerâmica Heinig – SC

3.2.1. Curvas de Secagem

Um dos secadores estudados foi o secador tipo túnel com ventiladores autoviajantes, muito difundido em empresas de cerâmica vermelha que estão se modernizando. Segundo Más (2003), este secador – que também opera em contracorrente - corresponde ao tipo de secador mais moderno encontrado no setor.

O secador em questão pertence à Cerâmica Candelária – RS, e consta de um túnel de aproximadamente 80 m de comprimento com duas vias, cada qual com capacidade para 38 vagonetas de 2 m cada. Em cada via é colocado um novo vagão a cada 1h, com cerca de 1.600 kg de material. O conteúdo de umidade inicial das peças oscila em torno de 20%, após terem perdido parte da umidade de extrusão em ambientes de espera. A injeção de ar quente se dá através de um canal central, no solo, com aberturas reguláveis, ao longo do comprimento do secador. A extração de ar úmido é feito na região da entrada da carga, em aberturas localizadas no solo, junto às paredes laterais.



Figura 3.10 – Pesagem das amostras nas medições em campo.

A seguir são apresentadas as curvas de secagem de peças para cada condição de operação. O eixo das abscissas corresponde às posições relativas das vagonetas no interior do secador. Assim, a posição de número 0 (zero) corresponde à entrada do secador e a posição de número 1 à saída do mesmo. O eixo das ordenadas corresponde aos percentuais de água, em base seca, contida nas peças. Os resultados foram obtidos com a pesagem de amostras retiradas em diferentes pontos do secador, ao longo do tempo de permanência no secador (Fig. 3.10 e 3.11).

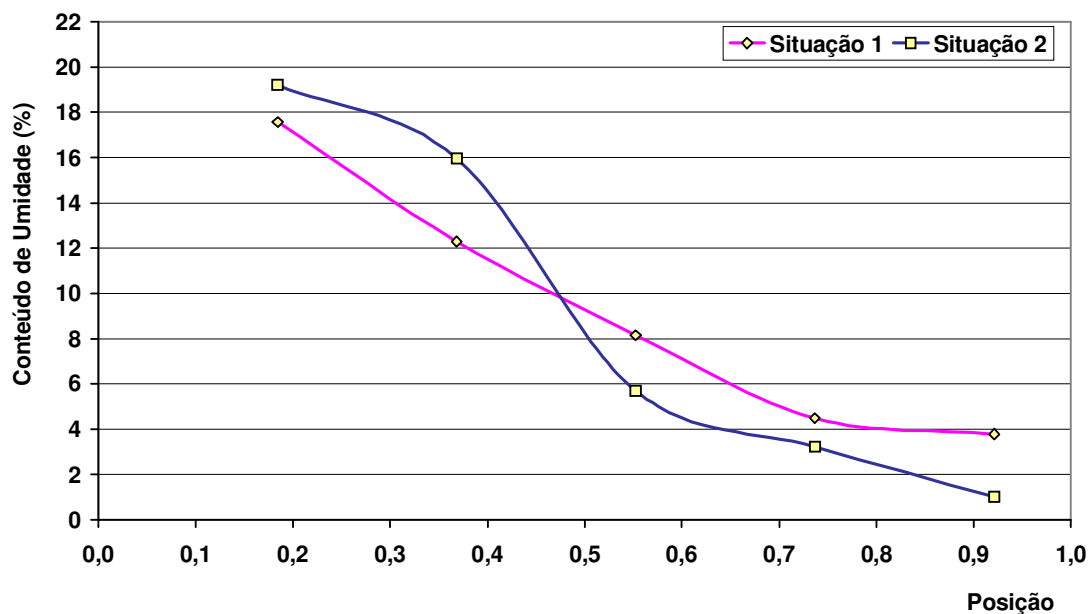


Figura 3.11 - Curva de secagem das peças: influência da ventilação direta.

As figuras apresentadas mostram as variações da curva de secagem das peças do secador em questão (situação 1), comparada às curvas de secagem obtidas após a diminuição das injeções de ar quente e seco na região inicial, aumento na região final, bem como o deslocamento das aberturas de extração de ar úmido em direção à porta do secador. Outra regulagem efetuada foi o desligamento dos primeiros ventiladores autoviajantes, o que elimina a ventilação direta sobre as peças no início do processo de secagem (situação 2). Esta intervenção teve a intenção de se diminuir a taxa de secagem na região inicial do secador, a fim de se evitar trincas nas peças. O resultado foi surpreendente, pois esta nova situação acelerou significativamente a taxa de secagem na região central do secador e ainda permitiu que as peças saíssem do secador com um conteúdo de umidade menor do que na situação 1 (Fig. 3.11).

Chama-se a atenção para o fato da mudança de comportamento da curva de secagem das peças a partir da posição central do secador. Apesar do ambiente mais úmido, a taxa de secagem aumentou. A explicação provavelmente está no fato de que com uma secagem mais lenta no início, a superfície da peça não sofreu secagem e retração tal que dificultasse a migração da umidade localizada no seu interior. Uma vez que maior quantidade da umidade do núcleo da peça alcançou a periferia, a taxa de secagem se acelerou.

Assim, ao percorrer 65% (posição 0,65) do comprimento do secador, as peças já estavam tecnicamente secas com a nova regulagem, enquanto que na situação anterior foi preciso se percorrer 80% (posição 0,80) para se obter o mesmo efeito. Houve, portanto, um aumento na capacidade de secagem. É interessante notar que na região inicial do secador, crítica quanto à ocorrência de fissuras, a taxa de secagem resultou mais lenta.

Outra regulagem investigada foi a diminuição da vazão de ar circulante no secador, como forma de se obter uma progressão maior da umidade relativa em direção ao início do secador, a fim de se garantir uma secagem mais segura, sob a mesma ótica da regulagem anterior (situação 3, Fig. 3.12). Os resultados foram os esperados. Vale dizer que quando as peças saem do secador com conteúdo de umidade inferior a 3%, estas reabsorvem umidade do ambiente anulando em parte o trabalho de secagem, e ainda podem provocar leve desagregação do material, por expansão do mesmo. Por isso, pode-se diminuir a potência de ventilação na região final do secador.

Com as novas regulagens, além da ampliação da capacidade de secagem, o secador passou a economizar energia elétrica (cerca de 5%), uma vez que vários motores de ventiladores autoviajantes foram desligados.

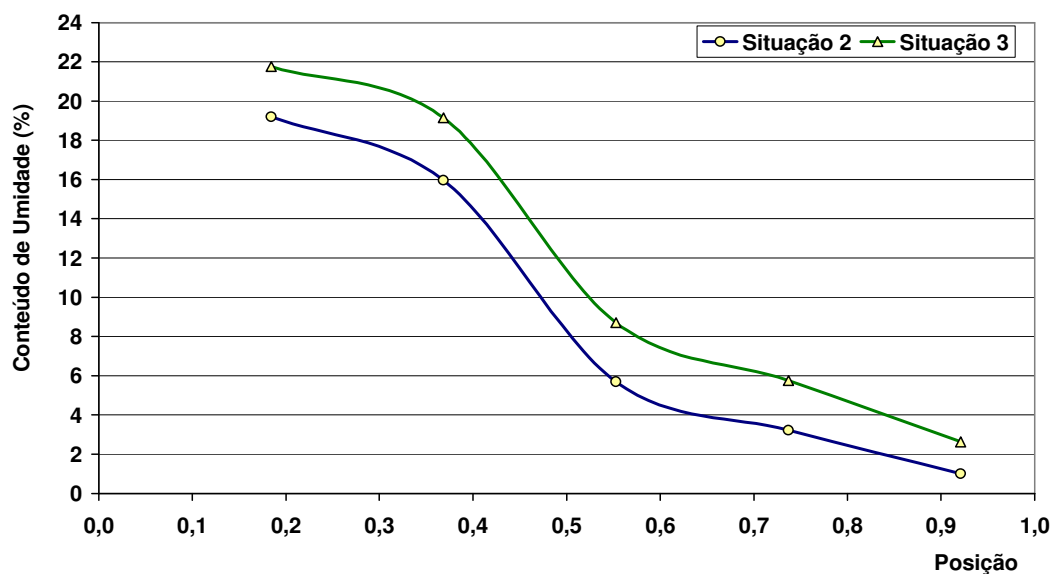


Figura 3.12 - Curva de secagem de peças: influência da vazão de ar.

3.3. Reforma de um Secador

Apresentam-se aqui os resultados obtidos com as modificações introduzidas no setor de secagem da Cerâmica Heinig, localizada na cidade de Brusque-SC. Foi realizada uma série de medições com o intuito de levantar dados para se ter um conhecimento mais aprofundado nos secadores contínuos tipo túnel, e assim poder buscar a melhor condição de operação possível.

Os principais dados levantados foram: curva de temperatura, curva de umidade da atmosfera do secador e variação de massa das peças.

3.3.1. Introdução

Na Cerâmica Heinig constatou-se que o secador era o gargalo para o aumento da produção. Um aumento na capacidade de secagem do material tem reflexos diretos no aumento da produção do forno, graças à entrada de material mais seco para a queima. O aumento da eficiência de secagem também auxilia na conservação do forno, pois umidade associada aos gases de combustão torna a atmosfera da zona de pré-aquecimento muito corrosiva.

A Cerâmica Heinig possui um secador de tijolos tipo túnel, com duas vias, onde a circulação dos gases quentes é feita de forma contrária à circulação das vagonetas (contracorrente). Os gases quentes são injetados no secador em um canal central ao longo de todo o túnel (Fig. 3.15 e 3.20) e extraídos em canais laterais ao longo de todo o túnel, fazendo com que os gases quentes circulem por dentro da carga. Os gases dos

canais laterais são retirados por uma chaminé localizada na posição de 20 metros, dos 40 metros que é o comprimento do secador. Pelo fato dos gases quentes serem retirados aproximadamente no meio do secador, ficou o comprimento de 20 metros do secador sem que ocorresse a circulação dos mesmos, fazendo com que esta região se tornasse uma região de elevada umidade por apresentar uma alta taxa de evaporação (Fig. 3.14).

O setor de secagem da Cerâmica Heinig se tornou um gargalo da produção, fazendo com que o forno trabalhasse em uma condição abaixo da ótima, pois nunca haviam produtos suficientes para serem queimados. Desta forma foi realizada uma série de medições com o intuito de levantar dados para se ter um conhecimento mais aprofundado do sistema de secagem, e assim poder buscar uma melhor solução de secagem para a Cerâmica Heinig.

Para a obtenção destas medições foram feitos 13 furos ao longo dos 40 metros de comprimento do secador (Fig. 3.13), posicionados rente à parede lateral. Nestes locais foram medidas as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido ao longo do secador, com o objetivo de levantar a curva de temperatura e de umidade relativa existente ao longo do mesmo. Ainda nestes locais foram retiradas as amostras para pesagem.

O teste da variação da massa de um tijolo ao longo do secador foi feito através da escolha de uma amostra e o seu acompanhamento durante todo o ciclo de secagem que foi de 18 horas. Para este teste escolheu-se o tijolo de 6 furos (10x15x20cm), que é o produto de maior produção na Cerâmica Heinig. Com o resultado deste teste podemos verificar em qual região o secador está funcionando com maior eficiência e onde as trincas de secagem ocorrem. A amostra retirada encontra-se na parte superior da vagoneta, região onde a eficiência da secagem é maior, em consequência do fluxo preferencial de ar quente na região superior do túnel.

O sistema de medição da temperatura de bulbo seco é constituído de um termopar tipo J (Ferro-Níquel), encapsulado em um tubo de alumínio com orifícios na ponta para tentar diminuir o efeito da radiação nos resultados. A temperatura de bulbo úmido é medida através de um termopar tipo J, com a ponta envolta em uma mecha mergulhada em água, montado em um tubo de alumínio. Na outra extremidade do tubo de alumínio tem-se um ventilador succionando o ar de dentro do secador. Este ar entra em contato com o termopar envolvido na mecha, evaporando a água ali presente, resfriando-a e fazendo com que o mesmo acuse uma temperatura que está relacionada com a umidade do ambiente em questão (Fig. 3.13).



Figura 3.13 – Medição da umidade relativa.

Na Fig. 3.14 pode ser visto um gráfico com a curva de umidade relativa e a curva de variação de massa da carga ao longo do secador da Cerâmica Heinig. Neste gráfico podemos verificar uma variação muito brusca da umidade relativa nos 10 primeiros metros do secador, enquanto ocorre uma diminuição pequena da massa do tijolo. Fica evidenciada, assim, a secagem superficial. Este fato faz com que ocorram trincas de secagem devido a tensões internas geradas por gradientes de umidade e, portanto, retrações diferenciais.

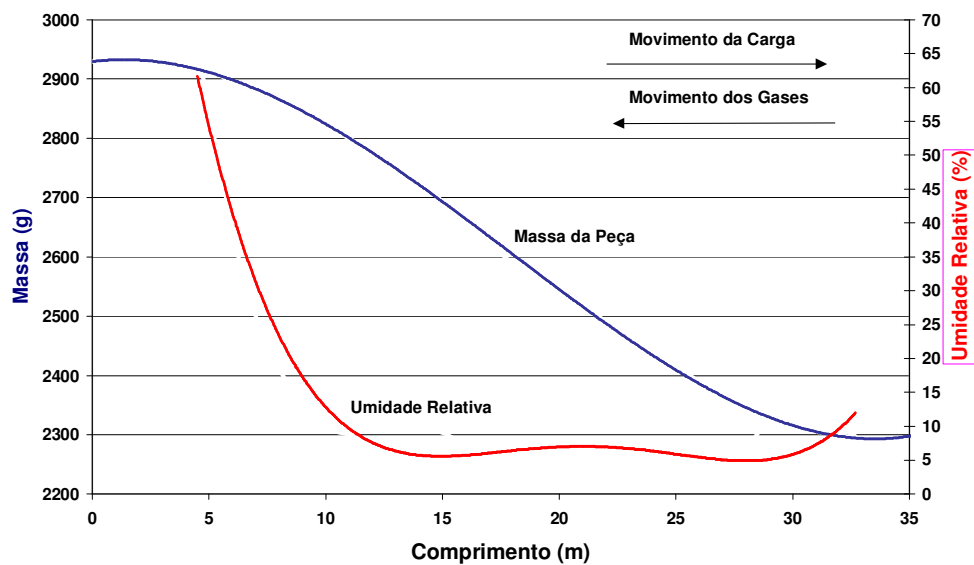


Figura 3.14 – Umidade relativa da atmosfera do secador e variação da massa da amostra.

Este excesso de umidade na entrada do secador se deve à falta de extração ou de circulação dos gases nesta região, já que a chaminé está localizada na parte central do secador. Vale lembrar que os gases fazem o percurso contrário à carga, sendo injetados no ponto de saída da mesma e retirados na posição central do secador. Deste modo praticamente a metade do secador estava inoperante, propiciando o risco de choques térmicos nas peças pela adição de ar quente e seco sobre as mesmas, pois estas não ficavam devidamente preparadas na entrada do secador, ocasionando trincas e conseqüentemente perdas no processo. Devido ao excesso de umidade ocorria a condensação no teto do secador. Não é raro encontrar-se secadores em que ocorre “chuva” junto à entrada da carga, demonstrando a falta de uma ventilação mais adequada.

3.3.2. Alterações no Secador

Com vistas à otimização do secador estudado foram executadas algumas alterações, a saber:

1) Portas foram instaladas na entrada do secador impedindo a infiltração de ar frio do ambiente. A tiragem do ar úmido passou a ser feita em um só lugar, através de um exaustor localizado junto à porta de entrada do secador. Anteriormente havia uma forte tiragem no centro do secador, via chaminé, o que impedia que boa parte do ar circulante chegasse à porta de entrada do secador.

2) O sistema de injeção de ar quente no interior do secador deixou de ocorrer em apenas um canal central, passando a utilizar também os dois canais no interior das paredes externas (Fig. 3.15 e 3.16), eliminando-se a possibilidade de ocorrer a secagem dos produtos somente em um lado do vagão, como ocorria anteriormente.

3) Foi instalado um novo exaustor para se realizar a tiragem de ar quente da zona de resfriamento do forno. Este novo exaustor permite a adição de ar frio, como forma de se obter um volume adicional de ar para o secador, bem como para controlar a temperatura de entrada destes gases.

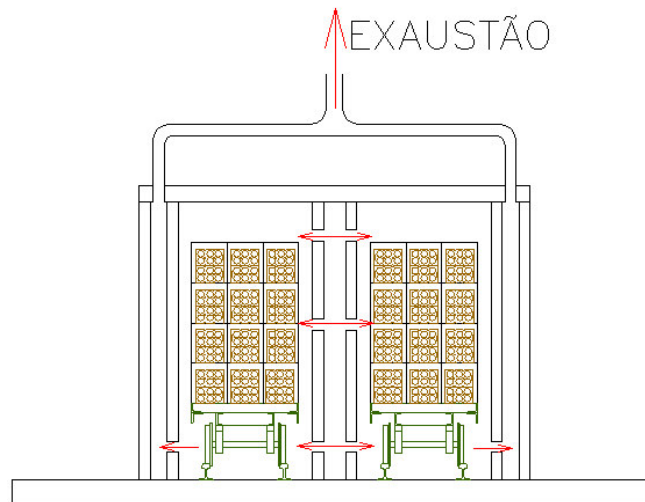


Figura 3.15 – Configuração original do secador.

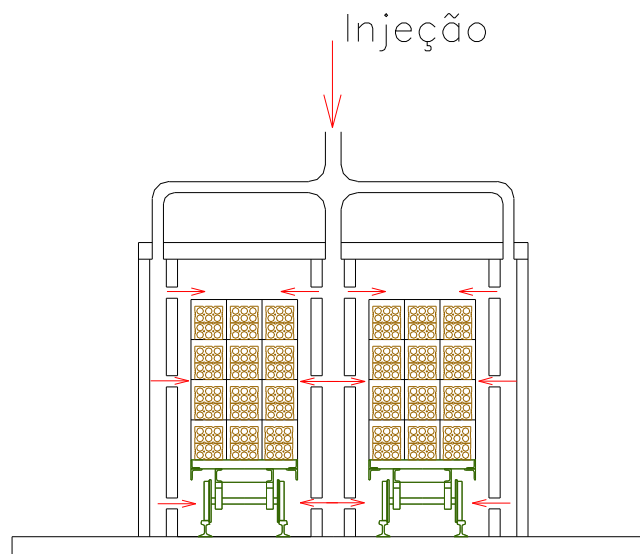


Figura 3.16 – Configuração atual do secador.

Na Fig. 3.17 verifica-se o resultado da secagem das peças no secador com as suas configurações originais de funcionamento. Através desta figura pode-se notar a deficiência de secagem que ocorre na parte lateral e inferior da carga, devido a injeção de gases quentes ser feita somente pelo canal central do secador. Vale esclarecer que este comporta duas fileiras de vagonetas colocadas lado a lado, com a injeção ocorrendo pelo canal entre as duas vagonetas, sendo os gases recolhidos nas laterais opostas.

Já na Fig. 3.18 nota-se que o material está secando mais uniformemente em sua parte lateral, apresentando ainda uma pequena dificuldade na parte central da vagoneta,

onde a cor escura indica que ainda está úmido. Esta dificuldade remanescente é devido à disposição das peças, uma vez que as peças nas laterais da vagoneta estão com os furos coincidentes com o fluxo de ar vindo dos canais, apresentando uma boa secagem. Por sua vez as peças centrais poderiam ter os furos alinhados no sentido longitudinal do secador, facilitando o escoamento que passa a ser também neste sentido. Entretanto esta mudança implica em dificuldades operacionais no momento do carregamento da vagoneta.



Figura 3.17 – Situação 1: secagem na configuração original.



Figura 3.18 – Situação 2: secagem após as modificações.

Com a eliminação da chaminé central, toda a vazão de ar quente entregue para o secador passou então a percorrer toda a sua extensão, sendo eliminada somente pelo extrator, como representado pela Fig. 3.19. A extração dos gases carregados de umidade é feita através de um extrator de 90 cm de diâmetro, instalado na parte final do secador. A parte em alvenaria revela a existência dos canais internos conforme esquema da Fig. 3.20.



Figura 3.19 – Vista lateral do secador atual.

Como mencionado anteriormente, os gases estão sendo injetados simultaneamente nos três canais, sendo que o canal central distribui o fluxo para os dois túneis de passagem de carga. Estes detalhes são apresentados na Fig. 3.20. O ar quente é injetado em um distribuidor, que divide o mesmo para os canais no interior das paredes do secador. Esta injeção deve ocorrer de modo que as faces laterais dos vagões possam receber a mesma quantidade de ar quente, equilibrando o processo. Esta regulagem é feita por *dampers* instalados no dito distribuidor.

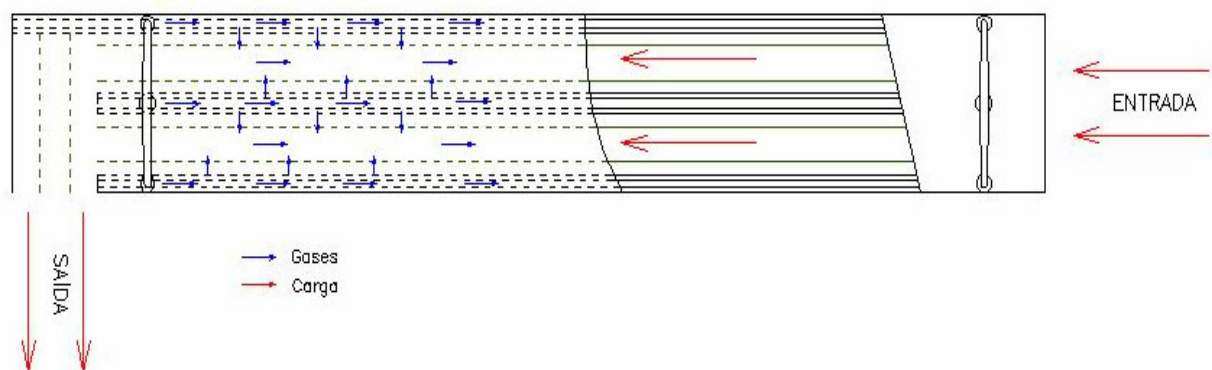


Figura 3.20 – Vista superior do secador, mostrando o fluxo de carga e o fluxo dos gases.

Após as modificações efetuadas no secador, novas medições foram realizadas e os dados são apresentados no gráfico da Fig. 3.21. Nesta figura nota-se que a grande variação de umidade relativa verificada anteriormente na entrada do secador foi eliminada, eliminando-se também as trincas. Uma maior inclinação da curva de umidade

na segunda metade do secador pode ser observada, não representando nenhum problema, pois nesta região o material já eliminou boa parte de sua umidade original e já parou de retrair, podendo ser submetido a condições mais severas.

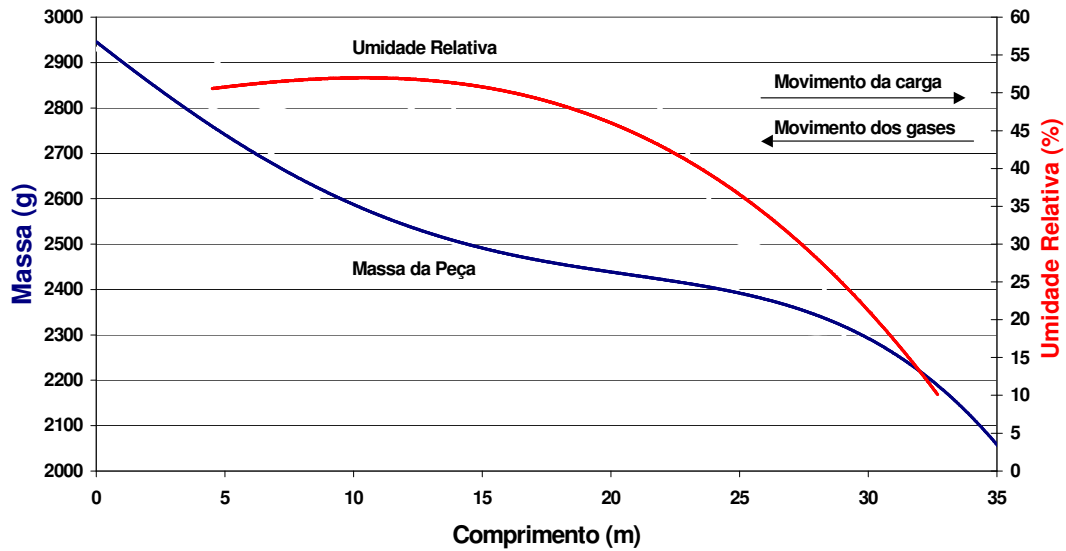


Figura 3.21 – Situação 2: condições de operação do secador após as reformas.

Chama-se a atenção para o aumento da inclinação da curva de perda de massa da peça, na parte inicial do secador. Isto mostra que houve uma melhor eliminação de umidade, mesmo em uma condição de umidade relativa mais elevada e menores temperaturas.

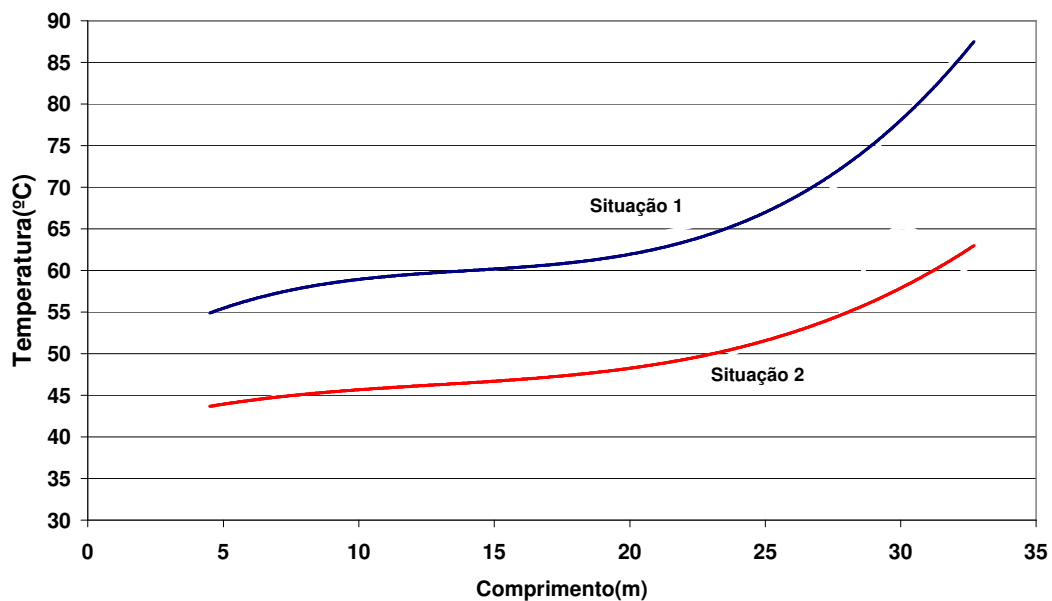


Figura 3.22 – Perfis de temperatura: 1- antes da reforma; 2- após a reforma.

Na Fig. 3.22 podem-se observar os perfis de temperatura ao longo do secador, para as duas situações. As temperaturas foram alteradas, tendo-se menores temperaturas com as mudanças implementadas, mas com maior eficiência de secagem, pois a distribuição do ar circulante foi melhorada. O ar aquecido é adicionado no sentido contrário ao do movimento da carga, tendo-se maiores temperaturas no final do secador, onde a carga está mais seca.

3.4. Secagem e Produção

Na Tab. 3.2 tem-se o comparativo entre as condições anterior e posterior à reforma do secador, quanto à retirada de umidade das peças. Estes dados foram obtidos com a pesagem de 10 tijolos antes e depois da secagem, retirados da parte superior e da parte inferior da vagoneta. O valor percentual representa o quanto de massa foi retirado em relação à massa do tijolo na saída do secador. Observa-se que houve uma retirada maior de umidade em ambas as posições, e que também se passou a ter uma secagem mais homogênea. A secagem atual difere em apenas 3 pontos percentuais entre amostras inferiores e superiores, quando anteriormente esta diferença estava em praticamente 12 pontos percentuais. A tendência natural de maior secagem na parte superior ainda ocorre, mas a homogeneização obtida já é bastante satisfatória.

Tabela 3.2 - Eficiência da secagem antes e depois da reforma do secador.

Situação	Posição na vagoneta	Massa média dos tijolos [kg]		Perda de massa [%]
		<i>entrada</i>	<i>saída</i>	
<i>Anterior à reforma</i>	Inferior	2,700	2,377	13,6
	Superior	2,675	2,134	25,4
<i>Posterior à reforma.</i>	Inferior	3,630	2,880	26,0
	Superior	3,550	2,750	29,1

Na Tab. 3.2 têm-se os valores estimados de massa na entrada e na saída do secador, anteriores e posteriores à reforma, indicando um aumento percentual de 29% na produção, tendo como base a massa de saída do secador. Estes valores mostram que se conseguiu secar uma produção maior e com mais eficiência, se considerados também os resultados apresentados na Tab. 3.3, apenas com a execução de pequenas obras no secador.

Tabela 3.3 – Aumento de produção do secador após a reforma.

Situação	Massa de entrada (ton/mês)	Massa de saída (ton/mês)	Aumento relativo à massa de saída
<i>Anterior à reforma.</i>	877	715	100%
<i>Posterior à reforma.</i>	1.170	925	129%

3.5. Balanço Térmico do Secador

As Tab. 3.4 e 3.5 mostram o resumo do balanço de massa e de energia no secador. Os resultados obtidos na situação 1 referem-se às medições realizadas com o secador operando em seu estado original. Já os resultados obtidos na situação 2 referem-se às medições com o secador operando em sua nova configuração. Na situação 1 a chaminé que existia ligada ao centro do secador, ajudava na condução do ar quente proveniente da zona de resfriamento do forno. Apesar da grande vazão de ar, resultava uma secagem ineficiente, além de um alto custo energético (1.673 kW) devido à extração para a atmosfera de gases ainda muito quentes. Nessa condição apenas 12,7% da energia que entrava no secador estava associada aos gases do exaustor (212 kW) – que em última análise é o responsável pelo transporte da umidade para o exterior. O restante da energia, 87,3%, estava associado ao transporte pelas peças que saíam aquecidas do secador, perdas pelas fronteiras e pela chaminé central. Já na situação 2, 62,9% da energia que entra no secador (562 kW) está associada aos gases do exaustor (354 kW), indicando um grande aumento de rendimento do sistema. O cálculo da energia transportada leva em conta o calor sensível e o calor latente.

Na nova condição, o rendimento global do secador aumentou por dois motivos, a saber:

1) Maior aproveitamento energético devido ao fato de todos os gases que entram no secador serem forçados a circular até o final do mesmo. Foi ainda possível diminuir a vazão de ar quente extraído do forno.

2) Maior taxa de extração de água devido à injeção uniforme de ar quente na nova configuração. Na configuração anterior, algumas peças saíam do secador bastante secas, enquanto outras eram ainda classificadas como verdes (muito úmidas). Pelo fato de o secador trabalhar com uma vazão de ar menor e, a uma temperatura mais baixa, as perdas térmicas pelas fronteiras do secador diminuíram, bem como as perdas associadas ao transporte de energia pelas peças para o exterior.

Tabela 3.4 – Resumo dos balanços de massa de ar e de energia – situação 1: antes da reforma.

	m (kg _{ar} /s)	T (°C)	Umidade (kg _{vapor} /kg _{ar})	Entalpia (kJ/kg)	Potência (kW)
Entrada	9,08	140	0	184	1.673
Saída	4,91	45	0,009	43	212

Tabela 3.5 – Resumo dos balanços de massa de ar e de energia – situação 2: após a reforma.

	m (kg _{ar} /s)	T (°C)	Umidade (kg _{vapor} /kg _{ar})	Entalpia (kJ/kg)	Potência (kW)
Entrada	5,48	120	0	103	562
Saída	5,58	40	0,019	63	354

3.6. Conclusão

Este trabalho mostra os avanços obtidos com a ampliação da capacidade de um sistema de secagem sem o aumento de sua estrutura, apenas através da otimização de seu funcionamento, aproveitando com maior eficiência toda a energia despendida para o secador. Embora apenas no momento de acerto do conjunto (forno + secador), pode-se avaliar o resultado do comportamento do mesmo, sabe-se que as mudanças já são responsáveis por uma redução das perdas de secagem em cerca de 30%.

Os resultados mostram também que os secadores, mais simples que os fornos, apresentam uma facilidade de regulagem e de ajuste. Entretanto estes equipamentos nem sempre são devidamente considerados no momento da execução, sendo concebidos com erros e distorções de difícil correção, a não ser com obras como as executadas.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE NUMÉRICA

4.1. Modelagem Matemática

A modelagem matemática da secagem é bastante complicada. Assim, uma série de hipóteses simplificativas deve ser criteriosamente tomada, a fim de se garantir a viabilidade da solução numérica do problema.

4.1.1 Metodologia

A modelagem matemática do processo de secagem foi feita utilizando-se o método dos volumes finitos, onde são comparadas as temperaturas dos elementos através de suas fronteiras, tendo como domínio o volume externo do secador.

Em contraste com uma solução analítica, que permite determinar as propriedades em qualquer ponto do meio, soluções numéricas só permitem a determinação das propriedades em pontos discretos (Incropera & De Witt, 1992). O primeiro passo em qualquer solução numérica é, então, a seleção sucinta destes pontos. Cria-se, assim, uma rede de pontos onde cada um representa uma região do meio, isto é, cada ponto representa as propriedades médias da sua vizinhança.

Naturalmente que a exatidão dos cálculos e o tempo de execução do programa computacional dependem do número de pontos escolhidos. Entretanto, o número de pontos não responde sozinho pela precisão da solução numérica, estando esta característica associada muito mais à modelagem matemática dos fenômenos presentes no problema e às hipóteses simplificativas adotadas.

A equação em volumes finitos para um ponto qualquer pode ser definida de várias maneiras, e aqui se adotou o balanço de energia como caminho para a determinação da equação. Por se tratar da simulação de um secador contínuo, pode-se adotar a hipótese de regime permanente.

4.1.2 Balanços de Energia

A modelagem utilizada é bidimensional (2-D), sendo os elementos de carga divididos em i elementos na direção longitudinal do secador e j elementos na direção da altura do secador.

Quanto às trocas de calor, são consideradas na modelação a convecção com o ar e a radiação com as paredes laterais, esquerda e direita. Não é considerada a condução entre os elementos de carga. Neste ponto tornou-se necessário dividir a equação da temperatura dos elementos da carga em 3 equações distintas, para diferenciar os elementos superior, inferior e centrais, uns dos outros. Isto se deve ao fato do modelo matemático estabelecer trocas de calor por radiação entre os elementos de carga e seus vizinhos, superior e inferior, sejam estes também elementos de carga ou as paredes superior ou inferior do secador.

Além disso, há o consumo interno de energia associada à mudança de fase da água, de líquido para vapor, durante a evaporação da umidade da carga. É considerada também a energia associada às massas que cruzam as fronteiras do volume de controle, m_{carga} e $m_{\text{liq}}(i-1, j)$, entrando e, m_{carga} , $m_{\text{liq}}(i, j)$ e $m_{\text{evap}}(i, j)$, saindo.

Um esquema das trocas de calor consideradas em um elemento de carga encontra-se na Fig. 4.1, onde $T_{\text{}}$ refere-se à temperatura, $m_{\text{}}$ às vazões mássicas e os índices i e j referem-se às divisões longitudinais e verticais, respectivamente. As setas indicam os fluxos de massa e os raios, os fluxos de calor.

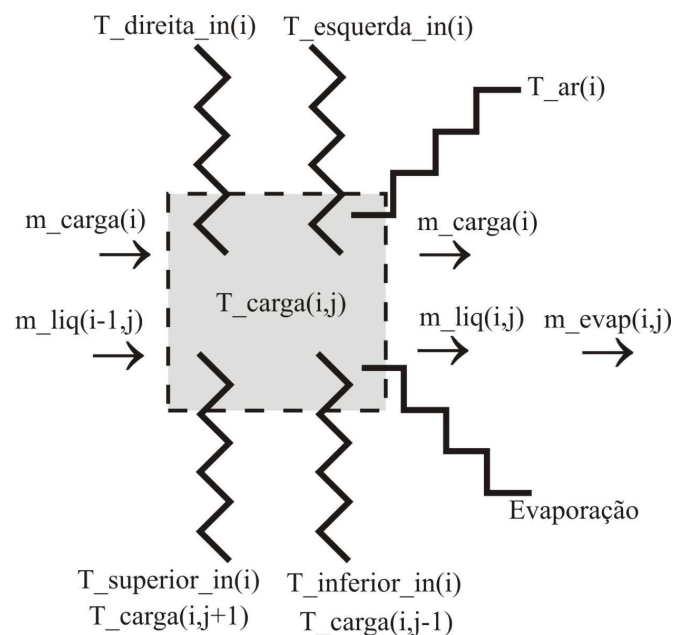


Figura 4.1 - Balanço de energia de um elemento de carga.

Analisando-se, então, um elemento central da carga, que troca calor por radiação com os elementos de carga que se encontram logo acima e abaixo dele mesmo,

encontra-se a Eq. (4.1), que considera os calores sensíveis da água líquida e do vapor gerado, bem como o calor latente de vaporização da água.

$$\begin{aligned}
& m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{carga}}(i, j)) + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{direita, in}}} - 1} + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i, j-1) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i, j+1) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} = m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{liq}}(i, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{evap}}(i, j) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{evap}}(i, j) \cdot entalp_{\text{lv}}(i, j)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

A fim de se isolar a variável $T_{\text{carga}}(i, j)$, em um primeiro instante observa-se a conservação da massa de água (umidade) presente no elemento de carga, expressa na Eq. (4.2).

$$m_{\text{liq}}(i, j) = m_{\text{liq}}(i-1, j) - m_{\text{evap}}(i, j) \tag{4.2}$$

Utilizando a expressão acima se pode escrever a igualdade expressa na Eq. (4.3), bastando multiplicar todos os termos por idêntica quantia.

$$\begin{aligned}
& m_{\text{liq}}(i, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) = m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}})
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Então, após algum algebrismo, reorganiza-se a expressão acima e obtém-se a Eq. (4.4).

$$\begin{aligned}
& m_{\text{liq}}(i, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{evap}}(i, j) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) = \\
& m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot (cp_{\text{liq}} - cp_{\text{vapor}}) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}})
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Voltando à equação (4.1) e substituindo-se a expressão encontrada na Eq. (4.4), obtém-se o balanço de energia final para um elemento central da carga, Eq. (4.5).

$$\begin{aligned}
& m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{carga}}(i, j)) + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{direita, in}}} - 1} + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i, j-1) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i, j+1) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} = m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot (cp_{\text{liq}} - cp_{\text{vapor}}) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{evap}}(i, j) \cdot entalp_{\text{lv}}(i, j)
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Linearizando-se os termos de troca de calor por radiação na equação (5) e isolando-se a variável $T_{\text{carga}}(i, j)$ obtém-se, então, a expressão que será utilizada no programa de simulação numérica, Eq. (4.6), para um elemento central da carga.

Analisando-se um elemento superior da carga, que troca calor por radiação com a parede superior do secador e com o elemento de carga que se encontra logo abaixo dele mesmo, encontra-se a Eq. (4.7).

Procedendo-se da mesma maneira obtém-se a equação para um elemento inferior da carga, a qual não será apresentada diretamente no presente texto.

$$T_{\text{carga}}(i, j) = \frac{\left(\begin{aligned} & m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot T_{\text{carga}}(i-1, j) + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot T_{\text{carga}}(i-1, j) + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \cdot T_{\text{ar}}(i) \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{esquerda, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{esquerda, in}}(i)}{\frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} + \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{direita, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{direita, in}}(i)}{\frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} + \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{direita, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j-1) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j-1) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{carga}}(i, j-1)}{2 \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j+1) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j+1) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{carga}}(i, j+1)}{2 \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} - 1} \\ & - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot (cp_{\text{liq}} - cp_{\text{vapor}}) \cdot T_{\text{ref}} - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot \text{entalp}_{\text{lv}}(i, j) \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{esquerda, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j))}{\frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} + \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{direita, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j))}{\frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} + \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{direita, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j-1) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j-1) + T_{\text{carga}}(i, j))}{2 \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j+1) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j+1) + T_{\text{carga}}(i, j))}{2 \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{carga}}} - 1} \\ & - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot (cp_{\text{liq}} - cp_{\text{vapor}}) \end{aligned} \right)} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}
& m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{carga}}(i, j)) + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{direita, in}}} - 1} + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{superior, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{superior, in}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i, j-1) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} = m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{liq}}(i, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{evap}}(i, j) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{evap}}(i, j) \cdot \text{entalp}_{\text{lv}}(i, j)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Observando-se novamente a conservação da massa de água (umidade) presente no elemento de carga, expressa na Eq. (4.2) e, utilizando-se os termos encontrados na Eq. (4.4), obtém-se o balanço final de energia de um elemento superior da carga, Eq. (4.8).

$$\begin{aligned}
& m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i-1, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{carga}}(i, j)) + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{direita, in}}} - 1} + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{superior, in}}^4(i) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{superior, in}}} - 1} \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i, j-1) - T_{\text{carga}}^4(i, j))}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} = m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot (cp_{\text{liq}} - cp_{\text{vapor}}) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{evap}}(i, j) \cdot \text{entalp}_{\text{lv}}(i, j)
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Linearizando-se os termos de troca de calor por radiação na Eq. (4.8) e isolando-se a variável $T_{\text{carga}}(i, j)$, obtém-se, então, a expressão que será utilizada no programa de simulação numérica, Eq. (4.9), para um elemento superior da carga.

$$T_{\text{carga}}(i, j) = \frac{\left(\begin{aligned} & m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} \cdot T_{\text{carga}}(i-1, j) + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} \cdot T_{\text{carga}}(i-1, j) + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \cdot T_{\text{ar}}(i) \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{esquerda, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{esquerda, in}}(i)}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{direita, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{direita, in}}(i)}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{direita, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{superior, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{superior, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{superior, in}}(i)}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{superior, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j-1) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j-1) + T_{\text{carga}}(i, j)) \cdot T_{\text{carga}}(i, j-1)}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} \\ & - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot (cp_{\text{liq}} - cp_{\text{vapor}}) \cdot T_{\text{ref}} - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot \text{ent}lp_{\text{lv}}(i, j) \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & m_{\text{carga}} \cdot cp_{\text{carga}} + m_{\text{liq}}(i-1, j) \cdot cp_{\text{liq}} + h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga, total}} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{esquerda, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{esquerda, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, lateral}} \cdot (T_{\text{direita, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{direita, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{direita, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{superior, in}}^2(i) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{superior, in}}(i) + T_{\text{carga}}(i, j))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{superior, in}}} - 1} \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga, superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j-1) + T_{\text{carga}}^2(i, j)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j-1) + T_{\text{carga}}(i, j))}{2 \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} \\ & - m_{\text{evap}}(i, j) \cdot (cp_{\text{liq}} - cp_{\text{vapor}}) \end{aligned} \right)} \quad (4.9)$$

Já a massa de ar é dividida apenas em i elementos na direção longitudinal do secador. Note-se que este ar é, na verdade, uma mistura de ar seco e vapor de água superaquecido (umidade).

As trocas de calor consideradas na modelagem são: convecção com os elementos de carga e com as paredes lateral esquerda, lateral direita, superior e inferior do secador; aqui não se leva em conta a presença de condução e de radiação. É considerada também a energia associada às massas que cruzam as fronteiras do volume de controle, m_{ar} , $m_{vapor}(i+1)$ e $\sum m_{evap}(i,j)$ entrando e, m_{ar} e $m_{vapor}(i)$ saindo. Não é considerada a possibilidade de condensação do vapor de água (umidade) presente no ar e, portanto, não há nenhuma geração interna de energia associada à mudança de fase da água, de vapor para líquido. Um esquema do balanço de energia para o ar é mostrado no elemento de volume da Fig. 4.2.

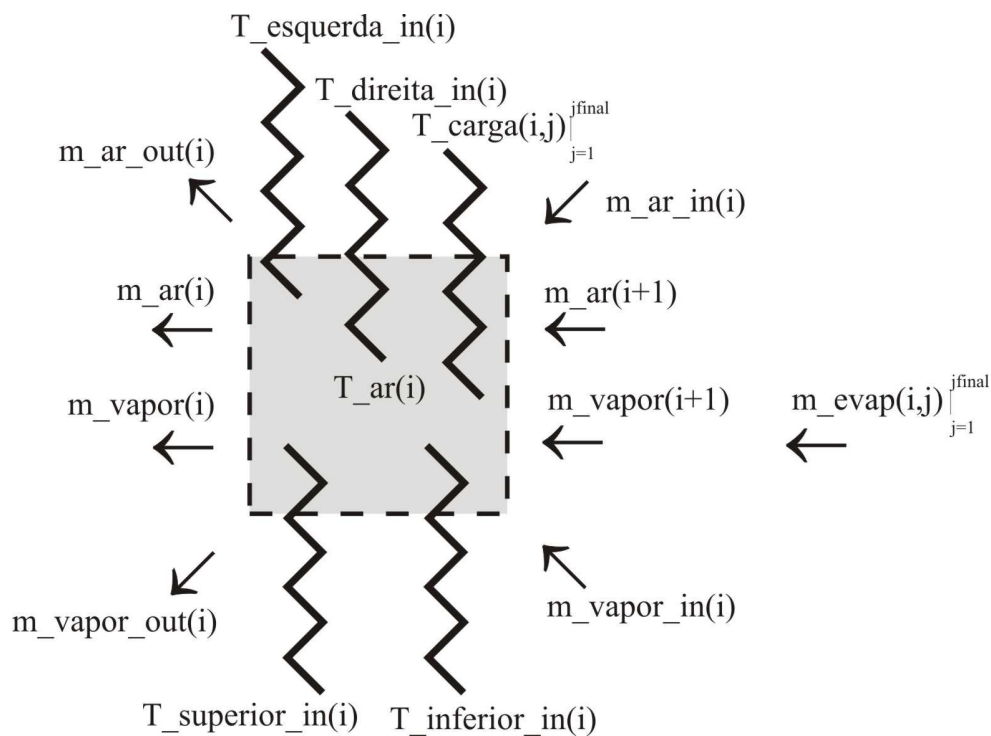


Figura 4.2 - Balanço de energia de um elemento ar.

Assim, balanço de energia do ar é expresso na Eq. (4.10), seguinte:

$$\begin{aligned}
& m_{\text{ar}}(i+1) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar}}(i+1) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{vapor}}(i+1) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar}}(i+1) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{ar,in}}(i) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar,in}}(i) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{vapor,in}}(i) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar,in}}(i) - T_{\text{ref}}) \\
& + h_{\text{esquerda,in}}(i) \cdot A_{\text{esquerda,in}} \cdot (T_{\text{esquerda,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) + h_{\text{direita,in}}(i) \cdot A_{\text{direita,in}} \cdot (T_{\text{direita,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) \\
& + h_{\text{superior,in}}(i) \cdot A_{\text{superior,in}} \cdot (T_{\text{superior,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) + h_{\text{inferior,in}}(i) \cdot A_{\text{inferior,in}} \cdot (T_{\text{inferior,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) \\
& + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga,total}} \cdot T_{\text{carga}}(i, j) \right) + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} m_{\text{evap}}(i, j) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \right) = \\
& m_{\text{ar}}(i) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{vapor}}(i) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{ar,out}}(i) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{vapor,out}}(i) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}})
\end{aligned} \tag{4.10}$$

O objetivo é o de se isolar a variável $T_{\text{ar}}(i)$. Em um primeiro instante observa-se a conservação da massa de ar seco e de vapor de água (umidade) presente no elemento, expressas respectivamente nas Eq. (4.11) e (4.12).

$$m_{\text{ar}}(i) + m_{\text{ar,out}}(i) = m_{\text{ar}}(i+1) + m_{\text{ar,in}}(i) \tag{4.11}$$

$$m_{\text{vapor}}(i) + m_{\text{vapor,out}}(i) = m_{\text{vapor}}(i+1) + m_{\text{vapor,in}}(i) + \sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} m_{\text{evap}}(i, j) \tag{4.12}$$

Rearranjando-se os termos da Eq. (4.10) e utilizando-se as expressões acima, encontra-se a Eq. (4.13).

$$\begin{aligned}
& m_{\text{ar}}(i+1) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar}}(i+1) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{vapor}}(i+1) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar}}(i+1) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{ar,in}}(i) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar,in}}(i) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{vapor,in}}(i) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar,in}}(i) - T_{\text{ref}}) \\
& + h_{\text{esquerda,in}}(i) \cdot A_{\text{esquerda,in}} \cdot (T_{\text{esquerda,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) + h_{\text{direita,in}}(i) \cdot A_{\text{direita,in}} \cdot (T_{\text{direita,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) \\
& + h_{\text{superior,in}}(i) \cdot A_{\text{superior,in}} \cdot (T_{\text{superior,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) + h_{\text{inferior,in}}(i) \cdot A_{\text{inferior,in}} \cdot (T_{\text{inferior,in}}(i) - T_{\text{ar}}(i)) \\
& + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} h_{\text{carga}}(i, j) \cdot A_{\text{carga,total}} \cdot T_{\text{carga}}(i, j) \right) + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} m_{\text{evap}}(i, j) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{carga}}(i, j) - T_{\text{ref}}) \right) = \\
& m_{\text{ar}}(i+1) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{ar,in}}(i) \cdot cp_{\text{ar}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}}) \\
& + m_{\text{vapor}}(i+1) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}}) + m_{\text{vapor,in}}(i) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}}) \\
& + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} m_{\text{evap}}(i, j) \right) \cdot cp_{\text{vapor}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{ref}})
\end{aligned} \tag{4.13}$$

A variável $T_{ar}(i)$ pode agora ser isolada, resultando na Eq. (4.14) a ser utilizada no programa de simulação numérica.

$$T_{ar}(i) = \frac{\left(\begin{aligned} & m_{ar}(i+1) \cdot cp_{ar} \cdot T_{ar}(i+1) + m_{vapor}(i+1) \cdot cp_{vapor} \cdot T_{ar}(i+1) \\ & + m_{ar,in}(i) \cdot cp_{ar} \cdot T_{ar,in}(i) + m_{vapor,in}(i) \cdot cp_{vapor} \cdot T_{ar,in}(i) \\ & + h_{esquerda,in}(i) \cdot A_{esquerda,in} \cdot T_{esquerda,in}(i) + h_{direita,in}(i) \cdot A_{direita,in} \cdot T_{direita,in}(i) \\ & + h_{superior,in}(i) \cdot A_{superior,in} \cdot T_{superior,in}(i) + h_{inferior,in}(i) \cdot A_{inferior,in} \cdot T_{inferior,in}(i) \\ & + \left(\sum_{j=1}^{j_final} h_{carga}(i,j) \cdot A_{carga,total} \cdot T_{carga}(i,j) \right) + \left(\sum_{j=1}^{j_final} m_{evap}(i,j) \cdot cp_{vapor} \cdot T_{carga}(i,j) \right) \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & m_{ar}(i+1) \cdot cp_{ar} + m_{vapor}(i+1) \cdot cp_{vapor} + m_{ar,in}(i) \cdot cp_{ar} + m_{vapor,in}(i) \cdot cp_{vapor} \\ & + h_{esquerda,in}(i) \cdot A_{esquerda,in} + h_{direita,in}(i) \cdot A_{direita,in} + h_{superior,in}(i) \cdot A_{superior,in} \\ & + h_{inferior,in}(i) \cdot A_{inferior,in} + \left(\sum_{j=1}^{j_final} h_{carga}(i,j) \cdot A_{carga,total} \right) + \left(\sum_{j=1}^{j_final} m_{evap}(i,j) \cdot cp_{vapor} \right) \end{aligned} \right)} \quad (4.14)$$

Os balanços de energia das paredes lateral esquerda, lateral direita e superior são divididos em duas partes, uma interna e outra externa. O balanço do piso é feito apenas pelo lado interno, uma vez que abaixo do piso considera-se a presença apenas de terra, a temperatura constante.

Para as superfícies internas das paredes laterais, esquerda e direita, considera-se na modelagem a condução com a sua superfície externa, convecção com o ar e radiação com as superfícies laterais de todos os elementos de carga. Não há nenhuma entrada ou saída de massa e, conseqüentemente, de energia transportada pelas fronteiras do volume de controle. O esquema do balanço de energia para os elementos da parede lateral esquerda pode ser visto na Fig. 4.3, onde aparece tanto a superfície interna quanto a externa.

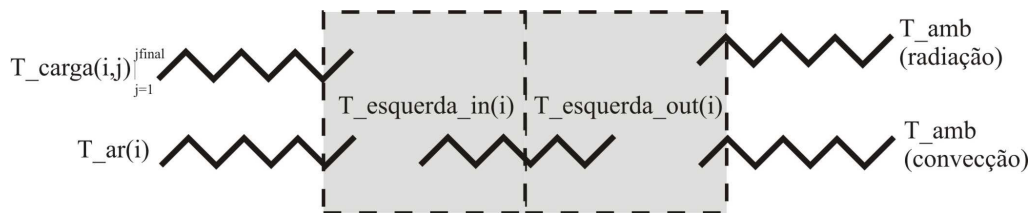


Figura 4.3 - Balanço de energia das superfícies da parede lateral.

Assim, observando-se as trocas de calor na superfície interna da parede lateral esquerda do secador e lembrando que a carga é dividida em j alturas, sendo que há troca de calor por radiação com todos estes elementos de carga, desenvolve-se a Eq. (4.15), que segue:

$$h_{\text{esquerda,in}}(i) \cdot A_{\text{esquerda,in}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{esquerda,in}}(i)) + \frac{k_{\text{esquerda}} \cdot A_{\text{esquerda,med}} \cdot (T_{\text{esquerda,out}}(i) - T_{\text{esquerda,in}}(i))}{\text{espessura}_{\text{esquerda}}} + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,lateral}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i,j) - T_{\text{esquerda,in}}^4(i))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda,in}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} \right) = 0 \quad (4.15)$$

Linearizando-se os termos de troca de calor por radiação na Eq. (4.15) e isolando então a variável $T_{\text{esquerda,in}}(i)$ obtém-se a Eq. (4.16), que será utilizada no programa de simulação numérica.

$$T_{\text{esquerda,in}}(i) = \frac{\left(h_{\text{esquerda,in}}(i) \cdot A_{\text{esquerda,in}} \cdot T_{\text{ar}}(i) + \frac{k_{\text{esquerda}} \cdot A_{\text{esquerda,med}} \cdot T_{\text{esquerda,out}}(i)}{\text{espessura}_{\text{esquerda}}} + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,lateral}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i,j) + T_{\text{esquerda,in}}^2(i)) \cdot (T_{\text{carga}}(i,j) + T_{\text{esquerda,in}}(i)) \cdot T_{\text{carga}}(i,j)}{\frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda,in}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} \right) \right)}{\left(h_{\text{esquerda,in}}(i) \cdot A_{\text{esquerda,in}} + \frac{k_{\text{esquerda}} \cdot A_{\text{esquerda,med}}}{\text{espessura}_{\text{esquerda}}} + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,lateral}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i,j) + T_{\text{esquerda,in}}^2(i)) \cdot (T_{\text{carga}}(i,j) + T_{\text{esquerda,in}}(i))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{esquerda,in}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} \right) \right)} \quad (4.16)$$

Para a superfície externa da parede lateral esquerda, a Eq. (4.17) apresenta o balanço de energia, levando em conta as trocas de calor apropriadas.

$$\begin{aligned}
& h_{\text{esquerda,out}} \cdot A_{\text{esquerda,out}} \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{esquerda,out}}(i)) + \sigma \cdot A_{\text{esquerda,out}} \cdot \varepsilon_{\text{esquerda,out}} \cdot (T_{\text{amb}}^4 - T_{\text{esquerda,out}}^4(i)) \\
& + \frac{k_{\text{esquerda}} \cdot A_{\text{esquerda,med}} \cdot (T_{\text{esquerda,in}}(i) - T_{\text{esquerda,out}}(i))}{\text{espessura}_{\text{esquerda}}}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Apenas linearizando-se os termos de troca de calor por radiação e isolando-se a variável $T_{\text{esquerda,out}}(i)$ encontra-se a equação a ser utilizada no programa de simulação numérica, Eq. (4.18).

$$T_{\text{esquerda,out}}(i) = \frac{\left(\begin{aligned} & h_{\text{esquerda,out}} \cdot A_{\text{esquerda,out}} \cdot T_{\text{amb}} \\ & + \sigma \cdot A_{\text{esquerda,out}} \cdot \varepsilon_{\text{esquerda,out}} \cdot (T_{\text{amb}}^2 + T_{\text{esquerda,out}}^2(i)) \cdot (T_{\text{amb}} + T_{\text{esquerda,out}}(i)) \cdot T_{\text{amb}} \\ & + \frac{k_{\text{esquerda}} \cdot A_{\text{esquerda,med}} \cdot T_{\text{esquerda,in}}(i)}{\text{espessura}_{\text{esquerda}}} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} & h_{\text{esquerda,out}} \cdot A_{\text{esquerda,out}} \\ & + \sigma \cdot A_{\text{esquerda,out}} \cdot \varepsilon_{\text{esquerda,out}} \cdot (T_{\text{amb}}^2 + T_{\text{esquerda,out}}^2(i)) \cdot (T_{\text{amb}} + T_{\text{esquerda,out}}(i)) \\ & + \frac{k_{\text{esquerda}} \cdot A_{\text{esquerda,med}}}{\text{espessura}_{\text{esquerda}}} \end{aligned} \right)} \tag{4.18}$$

Um esquema análogo ao da Fig. 4.3 pode ser elaborado para a parede lateral direita, que possui os mesmos modos de troca de calor que a parede lateral esquerda.

O balanço de energia da superfície interna da parede superior leva em consideração a troca de calor por condução com a superfície externa, por convecção com o ar e por radiação com o elemento superior da carga. Este balanço é um pouco diferente dos balanços de energia da superfície interior das paredes laterais, esquerda e direita, pois a parede superior troca calor por radiação apenas com a superfície superior do elemento superior da carga, uma vez que ela “enxerga” apenas esta superfície.

Um esquema dos modos de troca de calor encontra-se na Fig. 4.4, onde aparece tanto a superfície interna quanto a externa da parede superior (teto).

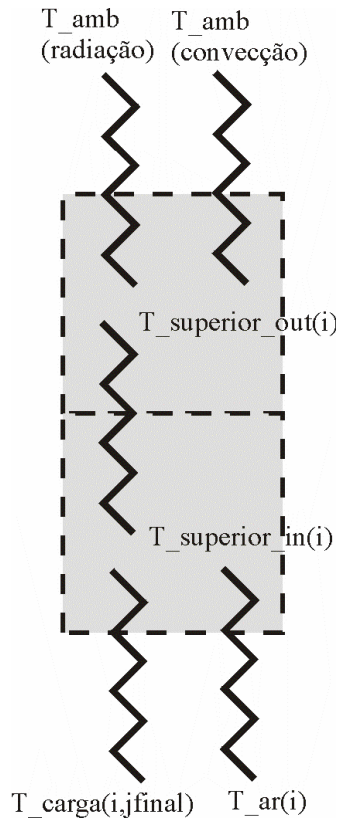


Figura 4.4 - Balanço de energia das superfícies da parede superior.

Observando-se as trocas de calor na superfície interna da parede superior do secador e lembrando que ocorre troca de calor por radiação apenas com o elemento superior da carga, desenvolve-se a Eq. (4.19).

$$\begin{aligned}
 & h_{\text{superior,in}}(i) \cdot A_{\text{superior,in}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{superior,in}}(i)) + \frac{k_{\text{superior}} \cdot A_{\text{superior,med}} \cdot (T_{\text{superior,out}}(i) - T_{\text{superior,in}}(i))}{\text{espessura}_{\text{superior}}} \\
 & + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i, j_{\text{final}}) - T_{\text{superior,in}}^4(i))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{superior,in}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} - 1} = 0
 \end{aligned}
 \tag{4.19}$$

Linearizando-se os termos de troca de calor por radiação na Eq. (4.19) e isolando-se, então, a variável $T_{\text{superior,in}}(i)$, obtém-se a Eq. (4.20), que será utilizada no programa de simulação numérica.

$$T_{\text{superior,in}}(i) = \frac{\left(h_{\text{superior,in}}(i) \cdot A_{\text{superior,in}} \cdot T_{\text{ar}}(i) + \frac{k_{\text{superior}} \cdot A_{\text{superior,med}} \cdot T_{\text{superior,out}}(i)}{\text{espessura}_{\text{superior}}} \right.}{\left. + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j_{\text{final}}) + T_{\text{superior,in}}^2(i)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j_{\text{final}}) + T_{\text{superior,in}}(i)) \cdot T_{\text{carga}}(i, j_{\text{final}})}{\left(\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{superior,in}}} - 1 \right)} \right)}{\left(h_{\text{superior,in}}(i) \cdot A_{\text{superior,in}} + \frac{k_{\text{superior}} \cdot A_{\text{superior,med}}}{\text{espessura}_{\text{superior}}} \right.}{\left. + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i, j_{\text{final}}) + T_{\text{superior,in}}^2(i)) \cdot (T_{\text{carga}}(i, j_{\text{final}}) + T_{\text{superior,in}}(i))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{superior,in}}} - 1} \right)} \quad (4.20)$$

Para a superfície externa da parede superior a Eq. (4.21) apresenta o balanço de energia, levando em conta as trocas de calor apropriadas.

$$\begin{aligned} & h_{\text{superior,out}} \cdot A_{\text{superior,out}} \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{superior,out}}(i)) \\ & + \sigma \cdot A_{\text{superior,out}} \cdot \epsilon_{\text{superior,out}} \cdot (T_{\text{amb}}^4 - T_{\text{superior,out}}^4(i)) \\ & + \frac{k_{\text{superior}} \cdot A_{\text{superior,med}} \cdot (T_{\text{superior,in}}(i) - T_{\text{superior,out}}(i))}{\text{espessura}_{\text{superior}}} = 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Apenas linearizando-se os termos de troca de calor por radiação e isolando-se a variável $T_{\text{superior,out}}(i)$ encontra-se a equação a ser utilizada no programa de simulação numérica, Eq. (4.22).

$$T_{\text{superior,out}}(i) = \frac{\left(\begin{array}{l} h_{\text{superior,out}} \cdot A_{\text{superior,out}} \cdot T_{\text{amb}} \\ + \sigma \cdot A_{\text{superior,out}} \cdot \epsilon_{\text{superior,out}} \cdot (T_{\text{amb}}^2 + T_{\text{superior,out}}^2(i)) \cdot (T_{\text{amb}} + T_{\text{superior,out}}(i)) \cdot T_{\text{amb}} \\ + \frac{k_{\text{superior}} \cdot A_{\text{superior,med}} \cdot T_{\text{superior,in}}(i)}{\text{espessura}_{\text{superior}}} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} h_{\text{superior,out}} \cdot A_{\text{superior,out}} \\ + \sigma \cdot A_{\text{superior,out}} \cdot \epsilon_{\text{superior,out}} \cdot (T_{\text{amb}}^2 + T_{\text{superior,out}}^2(i)) \cdot (T_{\text{amb}} + T_{\text{superior,out}}(i)) \\ + \frac{k_{\text{superior}} \cdot A_{\text{superior,med}}}{\text{espessura}_{\text{superior}}} \end{array} \right)} \quad (4.22)$$

O último balanço a ser desenvolvido é o da parede inferior do secador, ou seja, aquela que compõe o piso. Este elemento troca calor por convecção com o ar de secagem, por condução com o interior da terra e por radiação apenas com o elemento inferior da carga. Um esquema de seu balanço de energia pode ser visto na Fig. 4.5.

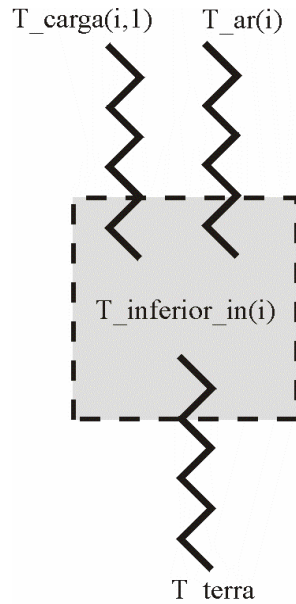


Figura 4.5 - Balanço de energia da superfície interna da parede inferior.

Assim, observando-se as trocas de calor na superfície interna da parede inferior do secador e lembrando-se que ocorre troca de calor por radiação apenas com o elemento inferior da carga, desenvolve-se a Eq. (4.23).

$$\begin{aligned}
& h_{\text{inferior,in}}(i) \cdot A_{\text{inferior,in}} \cdot (T_{\text{ar}}(i) - T_{\text{inferior,in}}(i)) \\
& + \text{fator}_{\text{forma da terra}} \cdot k_{\text{inferior}} \cdot (T_{\text{terra}} - T_{\text{inferior,in}}(i)) \\
& + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^4(i,j) - T_{\text{inferior,in}}^4(i))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{inferior,in}}} - 1} = 0
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Linearizando-se os termos de troca de calor por radiação na Eq. (4.23) e isolando, então, a variável $T_{\text{inferior,in}}(i)$ obtém-se a Eq. (4.24), que será utilizada no programa de simulação numérica.

$$T_{\text{inferior,in}}(i) = \frac{\left(h_{\text{inferior,in}}(i) \cdot A_{\text{inferior,in}} \cdot T_{\text{ar}}(i) + \text{fator}_{\text{forma da terra}} \cdot k_{\text{inferior}} \cdot T_{\text{terra}} + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i,1) + T_{\text{inferior,in}}^2(i)) \cdot (T_{\text{carga}}(i,1) + T_{\text{inferior,in}}(i)) \cdot T_{\text{carga}}(i,1)}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{inferior,in}}} - 1} \right)}{\left(h_{\text{inferior,in}}(i) \cdot A_{\text{inferior,in}} + \text{fator}_{\text{forma da terra}} \cdot k_{\text{inferior}} + \frac{\sigma \cdot A_{\text{carga,superior}} \cdot (T_{\text{carga}}^2(i,1) + T_{\text{inferior,in}}^2(i)) \cdot (T_{\text{carga}}(i,1) + T_{\text{inferior,in}}(i))}{\frac{1}{\epsilon_{\text{carga}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{inferior,in}}} - 1} \right)} \tag{4.24}$$

4.1.3. Balanços de Massa

O balanço de massa dentro do secador pode ser dividido em duas partes: o balanço de massa dos elementos da carga e do líquido (umidade) e, o balanço de massa do ar e do vapor d'água. Vale lembrar que todas as variáveis discutidas no balanço de massa referem-se às vazões mássicas, embora seus nomes possam sugerir que se trate, de forma absoluta, de massa.

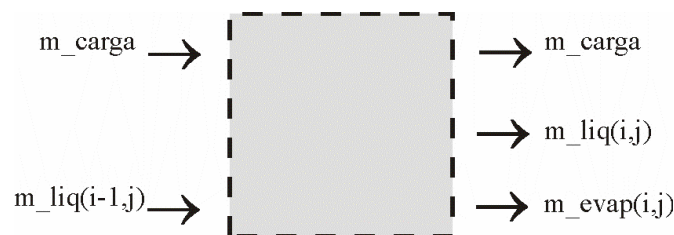


Figura 4.6 - Balanço de massa da carga de peças.

O balanço de massa da carga seca e do líquido (umidade) é bastante simples, uma vez que a massa da carga é em base seca, Eq. (4.25), havendo variação ao longo do secador apenas na quantidade de líquido presente em cada volume. Esta variação da massa de líquido é justamente a massa evaporada em cada volume de controle, conforme mostra a Eq. (4.26).

$$m_{\text{carga}, i} = m_{\text{carga}, i+1} = \text{cte} \quad (4.25)$$

$$m_{\text{liq}}(i, j) = m_{\text{liq}}(i-1, j) - \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} m_{\text{evap}}(i, j) \right) \quad (4.26)$$

Para que se possa determinar a quantidade de massa de líquido que evapora em cada volume de controle é necessário observar-se o fenômeno da evaporação mais detalhadamente. Para a primeira fase da secagem podem-se adotar algumas hipóteses simplificativas.

Hipótese simplificada 1:

- Há uma interface entre a superfície do líquido presente na carga e o ar; nesta interface o ar encontra-se saturado de vapor;

Hipótese simplificada 2:

- A massa de vapor gerada é proveniente da região saturada da interface e que o líquido evapora constantemente para manter esta região saturada;

Hipótese simplificada 3:

- A quantidade de massa de líquido evaporada é proporcional à diferença de concentração de vapor do ar circulante e da interface líquido-vapor saturada;

Em primeiro lugar, é razoável se considerar que na superfície de uma gota de líquido qualquer, presente na carga, haja uma interface entre o líquido e o ar e que muito próximo desta interface, o ar encontra-se saturado de vapor. Admite-se então que a massa de vapor gerada é proveniente desta região de vapor saturado e que sua quantidade seja proporcional à diferença de concentração de vapor no ar e na interface líquido-vapor saturado. Assim, o líquido evapora constantemente para manter a região de interface saturada, independente da temperatura em que esta se encontre (desde que abaixo da temperatura de ebulição, quando então o mecanismo propulsor da evaporação passa a

ser outro). Tal modelo corresponde mais fielmente à primeira fase da secagem, onde a maior parte do líquido presente na carga é evaporada. Esta etapa da secagem ocorre de forma lenta, sem que a superfície da peça venha a apresentar fortes diferenças de umidade em relação ao centro da mesma.

A taxa de massa evaporada é calculada conforme a Eq. (4.27), onde A_{carga} é a área superficial do elemento de carga, $w_{\text{sat,carga}}(i, j)$ e $w_{\text{ar}}(i)$ são, respectivamente, as umidades absolutas, saturada da carga e superaquecida do ar; $\text{difusao}(i, j)$ é um coeficiente de proporcionalidade entre estas grandezas e funciona como um coeficiente de troca de massa entre a carga e o ar.

A concentração de vapor pode ser expressa de diversas formas, mas a mais conveniente de se trabalhar nesta modelagem é a forma absoluta, ou seja, como fração de massa de vapor sobre massa de ar seco. A concentração expressa assim, como uma umidade absoluta, pode ser facilmente calculada para o volume de controle de ar, em função das próprias massas de ar seco e vapor de água e para a interface líquido-vapor, uma vez que esta se encontra saturada à pressão ambiente e sua temperatura é conhecida (sendo a mesma da carga, $T_{\text{carga}}(i, j)$).

$$m_{\text{evap}}(i, j) = \text{difusao}(i, j) \cdot A_{\text{carga}} \cdot (w_{\text{sat,carga}}(i, j) - w_{\text{ar}}(i)) \quad (4.27)$$

O valor do coeficiente de difusão da massa evaporada no ar do secador é um ponto crucial para o ajuste das curvas das simulações e, realizou-se uma série de experimentos de secagem em estufa controlada, para encontrar uma faixa valores adequados para esta variável, que controla o processo na primeira fase da secagem. Sua influência no comportamento do secador contínuo será analisada mais adiante. Este coeficiente de difusão (externo) funciona como uma variável de ajuste da equação, quando a secagem é controlada pela parte superficial. Quando a resistência interna é dominante, não funciona mais.

Já o balanço de massa do ar possui muito mais termos, pois em cada volume de controle ocorre a entrada e a saída de ar e vapor longitudinal e transversalmente, além da entrada da massa evaporada (proveniente do líquido da carga no volume de controle). O esquema do balanço de massa do ar pode ser visto na Fig. 4.7.

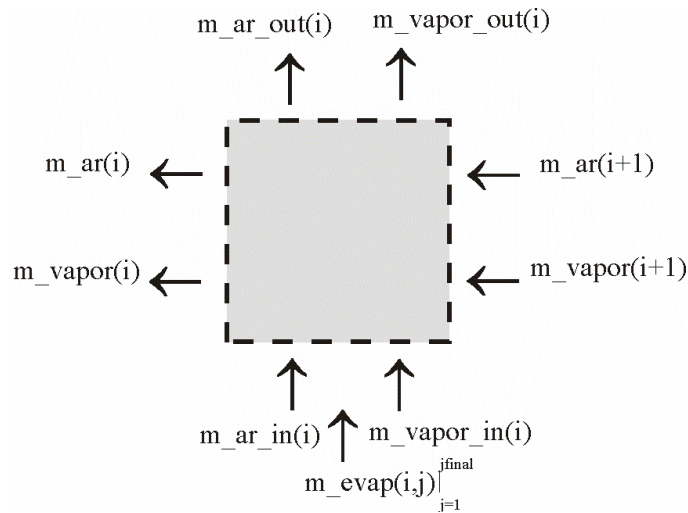


Figura 4.7 - Balanço de massa do ar.

Entretanto, as relações entre as massas que entram e saem do volume são bastante simples, sendo todas as entradas e saídas transversais já pré-determinadas como dados de entrada e a massa evaporada no volume já anteriormente calculada no balanço de massa da carga e do líquido (umidade). Assim, as entradas e saídas longitudinais de massa de ar seco, Eq. (4.28), e vapor d'água, Eq. (4.29), são resultantes da soma de todas as entradas e saídas de massa no volume de controle.

$$m_{\text{ar}}(i) = m_{\text{ar}}(i+1) + m_{\text{ar,in}}(i) - m_{\text{ar,out}}(i) \quad (4.28)$$

$$m_{\text{vapor}}(i) = m_{\text{vapor}}(i+1) + \left(\sum_{j=1}^{j_{\text{final}}} m_{\text{evap}}(i, j) \right) + m_{\text{vapor,in}}(i) - m_{\text{vapor,out}}(i) \quad (4.29)$$

4.1.4. Balanço Global de Energia

No final da execução do programa de simulação, quando ocorrer a convergência, deve-se proceder a um balanço global de energia e outro de massa, a fim de se determinar se toda a energia e se toda a massa que entram pelas fronteiras do sistema são iguais às quantidades que saem por estas mesmas fronteiras.

Portanto, observam-se todas as entradas e saídas de energia e de massa que cruzam as fronteiras dos elementos mais externos do secador, ou seja, das paredes externas (esquerda, direita, superior e inferior), dos volumes inicial e final de carga, umidade, ar e vapor, assim como os fluxos transversais de ar seco e vapor de água. As

diferenças entre entradas e saídas devem ficar muito próximas de zero. Naturalmente, em uma simulação numérica onde ocorre um processo iterativo de resolução do sistema de equações térmicas, esta diferença nunca será zero, uma vez que existe uma tolerância da convergência a ser obedecida pelo programa de simulação. Mesmo assim os valores do balanço global são um excelente indicativo da qualidade da simulação.

Assim, observando-se os fluxos pelas fronteiras do secador, conclui-se que existem seis formas distintas de entradas de energia associadas à entradas de massa: com a carga e o líquido (umidade) entrando no início do secador, com o ar e o vapor entrando no final do secador e também o ar e o vapor entrando transversalmente ao longo do secador. Este balanço de energia pode ser visto na Eq. (4.30)

$$qt_{in} = qt_{in,carga} + qt_{in,liq} + qt_{in,ar} + qt_{in,vapor} + qt_{in,ar\ in} + qt_{in,vapor\ in} \quad (4.30)$$

Quanto às perdas no secador, existem 11 formas distintas de saída ou consumo de energia: com a carga e o líquido (umidade), saindo no final do secador, com o ar e o vapor saindo no início do secador, com o ar e o vapor saindo transversalmente ao longo do secador, pelas superfícies externas das paredes lateral esquerda, lateral direita e superior e também pela superfície interna da parede inferior. Além disso, uma parcela de energia é consumida pela mudança de fase da água (evaporação). Este balanço de energia pode ser visto na Eq. (4.31).

$$qt_{out} = qt_{out,carga} + qt_{out,liq} + qt_{out,ar} + qt_{out,vapor} + qt_{out,ar\ out} + qt_{out,vapor\ out} + qt_{out,esquerda\ out} + qt_{out,direita\ out} + qt_{out,superior\ out} + qt_{out,inferior\ in} + qt_{out,entalp\ lv} \quad (4.31)$$

Os erros numéricos associados ao balanço global do programa de simulação são calculados com base na entrada total e na perda total de energia do secador.

O erro do balanço de energia global em relação à energia que entra no secador está expresso na Eq. (4.32).

$$erro_{in,out} = \left| \frac{qt_{in} - qt_{out}}{qt_{in}} \right| \quad (4.32)$$

4.2. Programa de Simulação Numérica

O programa foi desenvolvido na linguagem computacional FORTRAN 90, utilizando-se um processo iterativo para cálculo das temperaturas dos elementos e do balanço de massa no secador.

Entretanto, pela íntima relação existente entre a temperatura do elemento de carga, a massa evaporada por volume de controle do mesmo e a energia associada a esta evaporação, o processo de iteração para cálculo simultâneo do balanço de energia e do balanço de massa pode se tornar instável e fazer com que a simulação não alcance a convergência.

Para contornar este problema, a atualização do balanço de massa, ou seja, uma nova iteração do balanço de massa só ocorre quando as temperaturas alcançam a convergência. Assim, como o balanço de massa altera a distribuição de temperaturas dentro do secador, para cada iteração do balanço de massa passam-se várias iterações do balanço de energia. O programa de simulação tornou-se estável desta maneira. Constatou-se ser mais rápido e preciso o processo iterativo, como um todo, se o balanço de massa for calculado não apenas uma vez, mas sim diversas vezes, até sua convergência também, entre cada convergência das temperaturas.

4.2.1. Erro Numérico do Balanço Global e Tolerância

Resultados aceitáveis para os erros numéricos associados ao balanço global de energia só foram obtidos utilizando-se valores muito baixos para as tolerâncias dos balanços de energia e de massa, valores estes que vieram a tornar o processo de convergência muito demorado e as simulações muito lentas. Por esta razão, um controle para a convergência do programa de simulação numérica foi desenvolvido, onde o valor da tolerância do balanço de energia diminui aos poucos, ao longo do processo de convergência, até atingir o valor final desejado. Para o balanço de massa, um processo iterativo é necessário porque o potencial que determina a taxa de evaporação está relacionado com a concentração de vapor (umidade) no ar, e o valor desta variável, por sua vez, está diretamente relacionado com a própria taxa de evaporação. Felizmente, o processo iterativo para cálculo do balanço de massa é bastante rápido, sua convergência ocorre em algumas iterações, uma vez que este balanço é muito mais simples que o balanço de energia e, assim, o valor da tolerância do balanço de massa pode ser mantido baixo e constante.

Caso a maior variação da temperatura entre as primeiras iterações for de ordem de grandeza muito maior do que a sua tolerância, a convergência será muito demorada, e a nova convergência do balanço de energia causará uma perturbação muito grande no balanço de massa. Este era, na verdade, um problema freqüente antes da alteração do processo de convergência para o atual.

O gráfico da Fig. 4.8 apresenta um típico processo de convergência do programa de simulação, mostrando a maior variação da temperatura entre iterações sucessivas do balanço de energia.

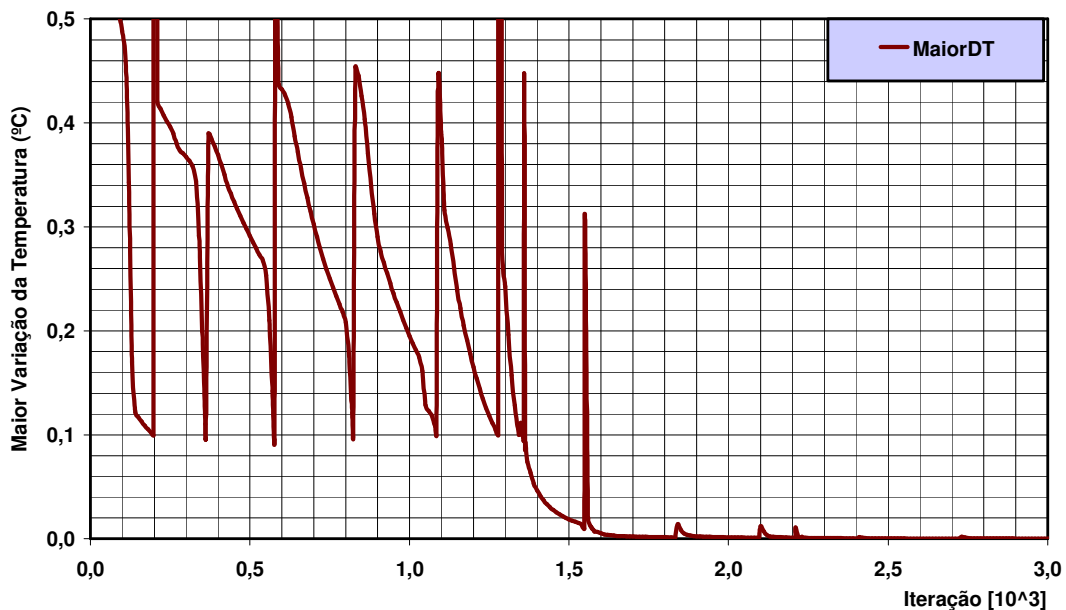


Figura 4.8 - Processo de convergência do programa de simulação.

Neste gráfico percebe-se claramente que a maior variação da temperatura entre iterações sucessivas do balanço de energia vai diminuindo, mas que diversas vezes ocorrem saltos repentinos para valores altos. Estes saltos acontecem logo após o balanço de massa alcançar a convergência, ou seja, logo após a maior variação da temperatura entre iterações sucessivas alcançar valores abaixo da sua tolerância. Isto porque neste momento se processam as iterações do balanço de massa, onde são calculadas as novas taxas de evaporação nos volumes de controle da carga. A alteração destas taxas perturba o já convergido balanço de energia, pelo fenômeno do resfriamento evaporativo, e, por isso, o balanço de energia precisa novamente recomeçar seu processo iterativo de convergência.

Além disso, pode-se observar nestes gráficos que em determinados momentos o ponto de convergência da maior variação de temperatura diminui. Este é exatamente o momento em que o programa de simulação alcança a sua convergência geral, ou seja,

tanto o balanço de energia quanto o balanço de massa estão convergidos e novas iterações do balanço de massa não mais perturbam o balanço de energia.

4.3. Resultados Obtidos com o Programa de Simulação Numérica

O tempo de convergência depende fortemente do número de volumes de controle, dos dados de entrada e das tolerâncias, inicial e final, determinadas para o balanço de energia. Contrariando as expectativas iniciais, o número de volumes de controle afeta o tempo de convergência de forma não linear, fugindo à lógica de que quanto mais volumes de controle houver, maior será tempo computacional. Isto acontece porque o balanço de massa, ao calcular a taxa de evaporação, pode causar perturbações muito grandes no balanço de energia, caso esta taxa tenha um valor alto, o que pode vir a acontecer ao se trabalhar com poucos volumes de controle. Constatou-se ainda que, a influência da curva inicial de temperaturas, ou de entrada do programa, tem pouca influência sobre o tempo de convergência da simulação, assim como a tolerância do balanço de massa.

Quanto aos erros associados ao balanço global de energia, verificou-se que estes apresentam valores aceitáveis, menores que 0,001 %, com a utilização de valores da ordem de 10^{-6} para ambas as tolerâncias, a do balanço de massa e a final do balanço de energia.

4.3.1. Resultados Numéricos

Os resultados têm relação com o tipo e o modo de preparação da argila. A caracterização das relações matemáticas entre a operação de secagem e estas variáveis é alvo de estudos e, para as simulações numéricas, estas complexas relações estão contidas no coeficiente de difusão da Eq. (4.27). Apesar dessa simplificação, os dados das simulações numéricas fornecem informações importantes sobre a tendência de comportamento de qualquer secador contínuo, quando da mudança de alguma variável operacional do mesmo, o que destaca a importância deste procedimento para a análise, projeto e ajuste de secadores.

Os resultados obtidos com a utilização do programa de simulação numérica, tais como perfis de temperatura e umidade de diversas regiões do secador, perdas de energia, propriedades físicas relevantes e curvas de vazão de ar seco, vapor, líquido e taxas de evaporação, servem para se determinar condições ideais de operação para um secador real. Para gerar estes resultados, estabeleceu-se uma curva de secagem típica utilizada em indústrias de cerâmica vermelha. O secador simulado no programa

computacional tem suas características apresentadas na Tab. 4.1, sendo que todas as unidades não especificadas seguem o sistema internacional de unidades. Por simplificação, foram tomados os calores específicos e o calor latente de vaporização da água como constantes, a 300K.

Tabela 4.1. - Características do secador simulado.

Significado	Valor
Altura interna do secador	2,00
Área total da carga	4,00
Área das superfícies internas das paredes laterais	0,178
Área das superfícies externas das paredes laterais	0,196
Área da superfície interna da parede superior	0,178
Área da superfície externa da parede superior	0,213
Área da superfície interna da parede inferior	0,178
Calor específico do ar	1010
Calor específico da carga	880
Calor específico da água líquida	4180
Calor específico do vapor	1900
Ciclo (horas)	43,6
Comprimento do secador	40,00
Comprimento das vagonetas	2,00
Coeficiente de difusão do líquido na carga, no vol. De controle i,j	10^{-4}
Coef. de troca de calor por convecção da carga no vol. de controle i,j	75
Coef. de troca de calor por convecção das sup. internas das paredes	75
Coef. de troca de calor por convecção das sup. externas das paredes	25
Condutividade das paredes	0,72
Espessura das paredes laterais	0,20
Espessura da parede superior	0,20
Espessura da parede inferior	0,20
Entalpia de vaporização da água no volume de controle i,j	$2,430 \cdot 10^6$
Emissividade da carga	1,00
Emissividade das superfícies internas das paredes	1,00
Emissividade das superfícies externas das paredes	0,90
Fator de forma da terra (de um sólido semi-infinito)	1,40
Largura interna do secador	2,00
Massa da peça	4,0
Temperatura de referência (°C)	0
Temperatura de entrada do ar de secagem (°C)	95
Umidade relativa do ar ambiente (25°C)	50
Umidade da peça (%)	15
Vagonetas por dia	22
Vazão mássica de ar	9,500
Vazão mássica de carga	0,662
Vazão mássica de líquido	0,099
Peças por vagoneta	650

Os resultados das simulações numéricas revelam a condição de funcionamento do secador, onde, com a menor vazão de ar quente (95°C), pode-se secar completamente uma carga determinada de peças. Esta condição foi adotada como padrão e todas as análises comparativas de condições operacionais alternativas tomam-na como referência.

A vazão de ar quente utilizada nesta simulação-padrão é de $9,500\text{ kg/s}$, ar este que carrega a umidade encontrada no ambiente para dentro do secador, $0,096\text{ kg/s}$ de vapor. Este vapor representa em um ambiente a 25°C , exatamente 50% de umidade relativa, mas no ar quente (95°C) apenas 2%. A vazão da carga de peças é de $0,662\text{ kg/s}$, o que é equivalente a uma produção de 22 vagonetes por dia, carregadas com 650 peças de $4,0\text{ kg}$ cada (base seca). A umidade inicial das peças na simulação é de 15 %, ou seja, uma vazão de $0,099\text{ kg/s}$ de líquido com a carga. Note-se que a massa de água que entra com o ar quente é praticamente igual à massa de água que entra com a carga.

O gráfico da Fig. 4.9 apresenta a curva de aquecimento da carga de peças no interior do secador.

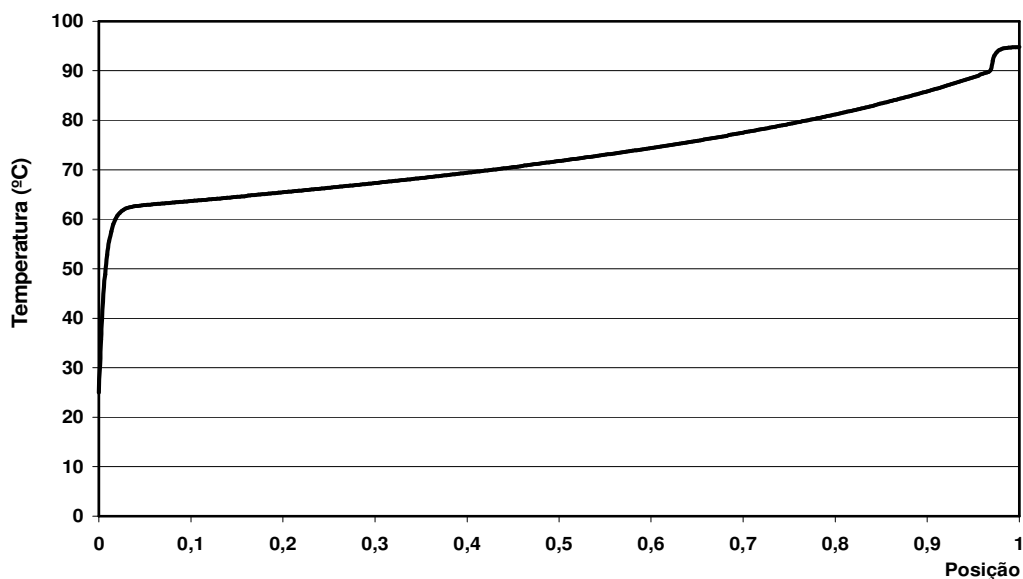


Figura 4.9 - Temperatura da carga ao longo do secador.

Uma outra variável importante, para o controle do secador e para comparação entre a simulação numérica e as medições, é a umidade relativa do ar no interior do secador. A umidade relativa é uma propriedade de fácil medição e carrega consigo reflexos, tanto da temperatura, quanto da concentração de vapor do seu ambiente. O resultado apresentado pela simulação para a umidade relativa do ar pode ser visto no gráfico da Fig. 4.10. Este gráfico é bastante suave, exceto na região do início do secador,

onde o ar se depara com a carga de peças frias, e na região final do secador, onde a massa de vapor contida no ar é constante, pois não ocorre evaporação. No final do secador, a carga já se encontra completamente seca e, assim, a umidade relativa do ar só se altera devido ao seu resfriamento, que também é lento nesta região.

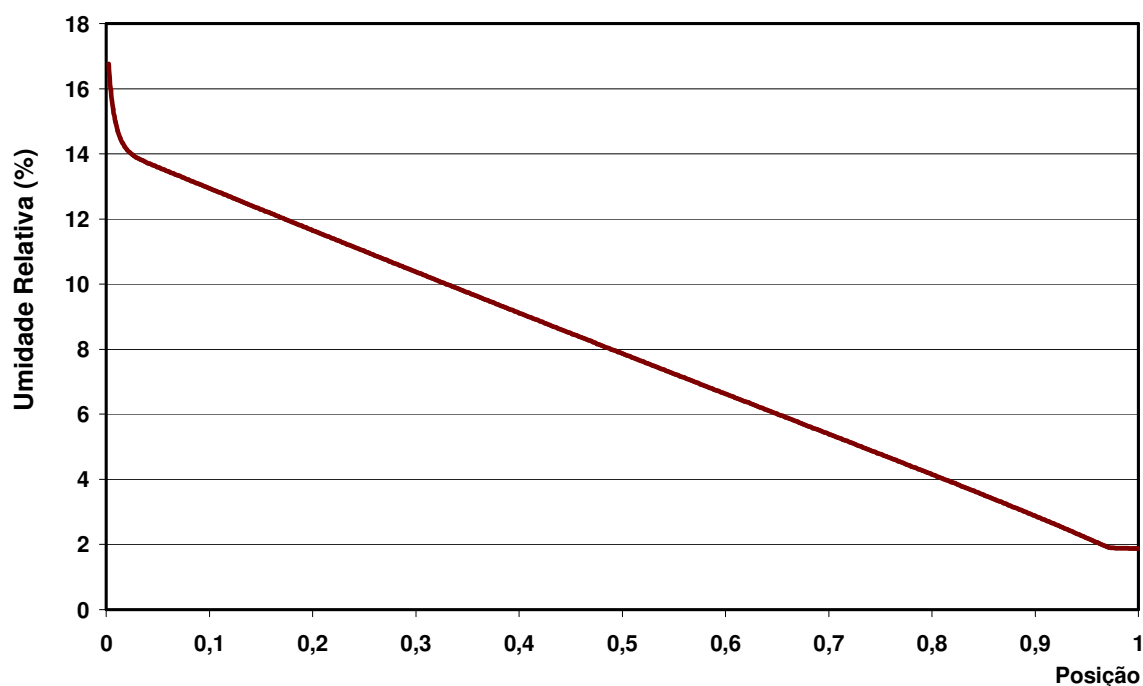


Figura 4.10 - Umidade relativa do ar no interior do secador.

A Tab. 4.2 apresenta as entradas de energia no secador, resultado do balanço global de energia realizado depois da convergência da simulação.

Tabela 4.2 - Entradas de energia no secador. Simulação-padrão.

Parcela	Potência [kW]	Percentual [%]
Ar seco	910,62	95,61
Carga	14,56	1,53
Líquido	10,38	1,09
Vapor	16,90	1,78
Total	952,46	100

Já a Tab. 4.3 apresenta as saídas de energia no secador, onde se percebe que a maior parte da energia deixa o secador com a vazão de ar que sai pela entrada deste (escoamento em contracorrente). A segunda maior parcela de energia é a consumida pela mudança de fase da água. Estas duas parcelas de energia representam 85,6% do total.

Para o cálculo das perdas pelo piso, este foi considerado um meio semi-infinito, cuja temperatura superficial é calculada pela equação 4.24.

Tabela 4.3 - Saídas de energia do secador. Simulação-padrão.

Parcela	Potência [kW]	Percentual [%]
Ar seco	557,8	58,6
Carga	55,3	5,8
Líquido	0	0
Vapor (sensível)	21,3	2,2
Vapor (latente)	248,4	26,1
Paredes laterais	30,0	3,1
Teto	15,6	1,6
Piso	24,1	2,5
Total	952,5	100

A Tabela 4.4 apresenta o consumo específico de energia térmica resultante da simulação-padrão, expresso tanto em função da massa de peças secadas, quanto em função da quantidade de água evaporada.

Tabela 4.4. – Consumo específico do secador. Simulação-padrão.

Consumo Específico	Unidade
344	kcal/kg _{carga}
1.439	kJ/kg _{carga}
2.295	kcal/kg _{água}
9.591	kJ/kg _{água}

Modificando as variáveis de entrada do programa, podem-se gerar novos resultados baseados nas características do secador real estudado no capítulo 3, pertencente à Cerâmica Heinig, após as reformas realizadas, e comparar, assim, os resultados obtidos (experimentais e simulados). As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam as parcelas de energia que entram e saem do secador real. A Tabela 4.7 mostra o consumo específico de energia térmica resultante da simulação do secador real, expresso tanto em função da massa de peças secadas, quanto em função da quantidade de água evaporada.

Tabela 4.5 - Entradas de energia no secador real.

Parcela	Potência [kW]	Percentual [%]
Ar seco	490,9	98,0
Carga	0,0	0,0
Líquido	0,0	0,0
Vapor	9,9	2,0
Total	500,8	100

Tabela 4.6 - Saídas de energia no secador real.

Parcela	Potência [kW]	Percentual [%]
Ar seco	141,9	28,3
Carga	20,4	4,1
Líquido	3,7	0,7
Vapor (sensível)	7,2	1,4
Vapor (latente)	257,4	51,4
Paredes laterais	36,4	7,3
Teto	15,9	3,2
Piso	17,9	3,6
Total	500,8	100

Tabela 4.7 – Consumo específico do secador real.

Consumo Específico	Unidade
308	kcal/kg _{carga}
1.286	kJ/k _{carga}
1.161	kcal/kg _{água}
4.853	kJ/kg _{água}

A Tabela 4.8 traz um resumo comparativo dos resultados apresentados. É importante destacar que o trabalho em campo foi desenvolvido concomitantemente ao programa de simulação e que, alguns dados numéricos foram obtidos antes dos dados experimentais.

Tabela 4.8 – Comparativo das simulações.

	Simulação Padrão	Secador Real (Medido)	Secador Real (Simulação)
Produção [ton/mês]	1.716	925	1.009
Umidade [%]	15	27,5	26,5
Vazão de ar [kg/s]	9,5	5,48	6,9
Difusão [kg/m ² .s]	0,0001		0,0002
Consumo [kcal/kgcarga]	344	377	308
Percentual [%]	112	122	100
Consumo [kcal/kgágua]	2.294	1.370	1.161
Percentual [%]	198	118	100

Os trabalhos de Nicolau et al (2002) demonstram que é possível atingir um consumo específico de 470 kcal/kg de material queimado em um forno túnel típico da indústria de cerâmica vermelha, operado a gás natural. Assim, se o calor que alimenta os secadores não for recuperado de fornos, os secadores podem representar cerca 50% do consumo de energia térmica de uma empresa, como demonstra a Tab. 4.9.

Tabela 4.9 – Consumo de energia térmica de um secador contínuo tipo túnel.

Equipamento	Consumo Específico [kcal/kgcarga]	Percentual [%]
Forno	470	55,5
Secador	377	44,5
Total	847	100

4.3.2. Condições Operacionais Alternativas

Foram também simuladas diversas condições operacionais alternativas para o mesmo secador. No caso-padrão a vazão de ar quente especificada foi de 9,5 kg/s. Este valor foi alterado em diversas outras simulações para representar outras condições operacionais. Utilizando-se, então, as demais condições constantes, a vazão de ar quente foi alterada de 1,5 kg/s até 10,5 kg/s, e obtiveram-se, assim, os resultados apresentados nas Fig. 4.11 a 4.14. As Fig. 4.15 a 4.17 apresentam resultados destas mesmas simulações, mas também de uma simulação com 11,5 kg/s de vazão de ar quente, e se referem ao balanço global de energia do programa de simulação numérica.

Na Fig. 4.11 estão os perfis de temperatura da carga de peças para as diversas vazões de ar quente especificadas. Pode-se observar na região inicial do secador que ocorre o que parece ser um rápido aquecimento da carga, causado pelo encontro da

carga fria com o ar quente do interior do secador. Entretanto este aquecimento não compromete a carga, pois a diferença de temperatura é, na verdade, pequena. Além disso, percebe-se nas duas curvas superiores, para as vazões de 9,5 e 10,5 kg/s, que há no final do secador uma brusca variação na temperatura da carga. Isto ocorre porque nestes dois casos a carga alcança 0,0% de umidade, e, portanto, cessa o dispêndio de energia com a mudança de fase líquido-vapor e a curva de temperatura ganha uma nova forma.

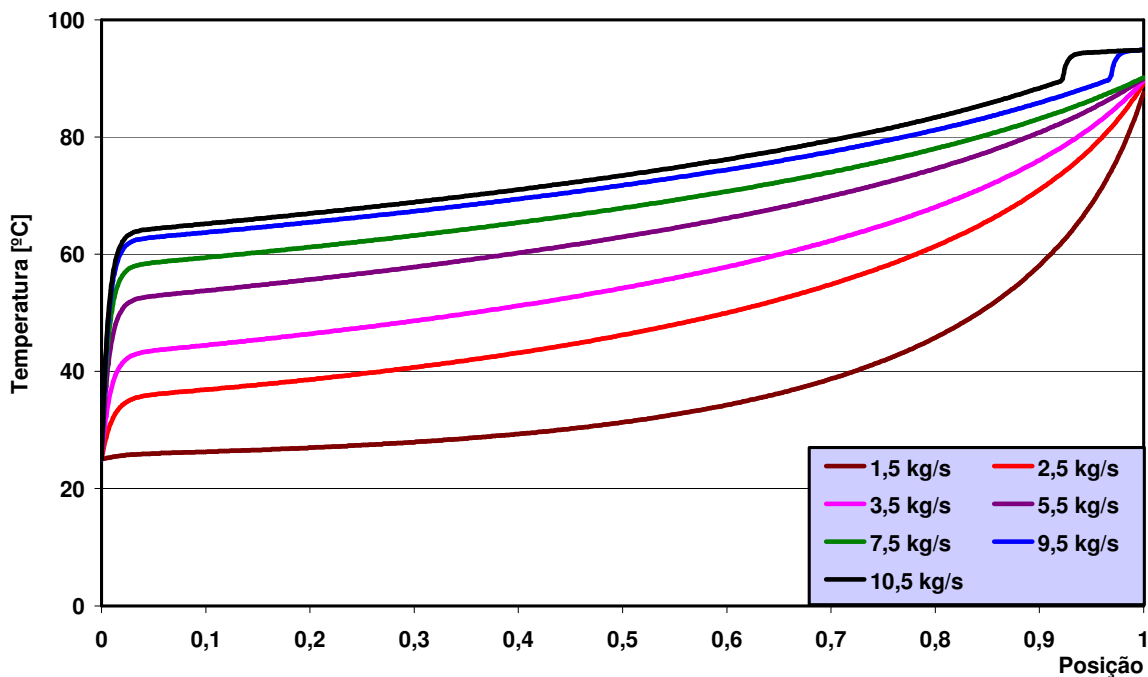


Figura 4.11 - Temperaturas da carga para diversas vazões de ar quente.

No gráfico da Fig. 4.12 encontram-se as curvas de umidade relativa do ar no interior do secador, para as diversas vazões de ar quente especificadas. Percebe-se, neste gráfico, que a umidade relativa aumenta de forma não proporcional à diminuição da vazão de ar quente, pois além de uma menor vazão de ar quente tornar-se saturada com uma menor vazão de vapor, ela ainda tende a se resfriar mais rapidamente.

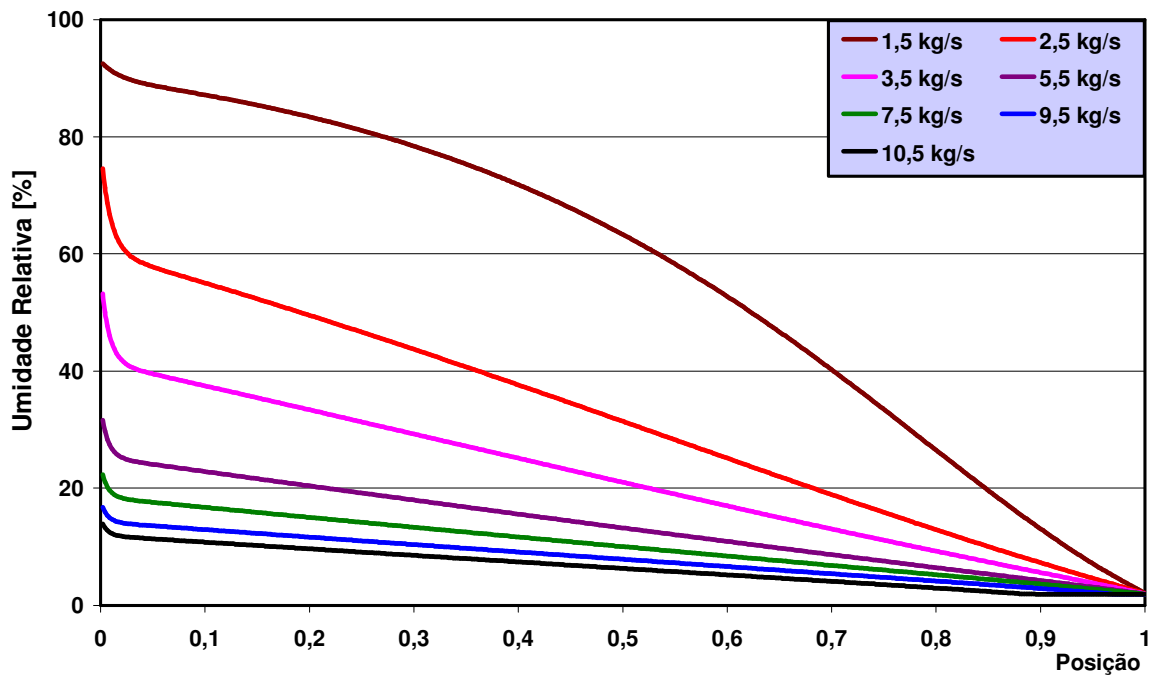


Figura 4.12 - Umidade relativa no interior do secador para diversas vazões de ar quente.

No gráfico da Fig. 4.13 encontram-se as curvas de vazão de líquido no secador, para as diversas vazões de ar quente especificadas, onde se percebe claramente a forte influência da vazão de ar quente sobre a qualidade de secagem.

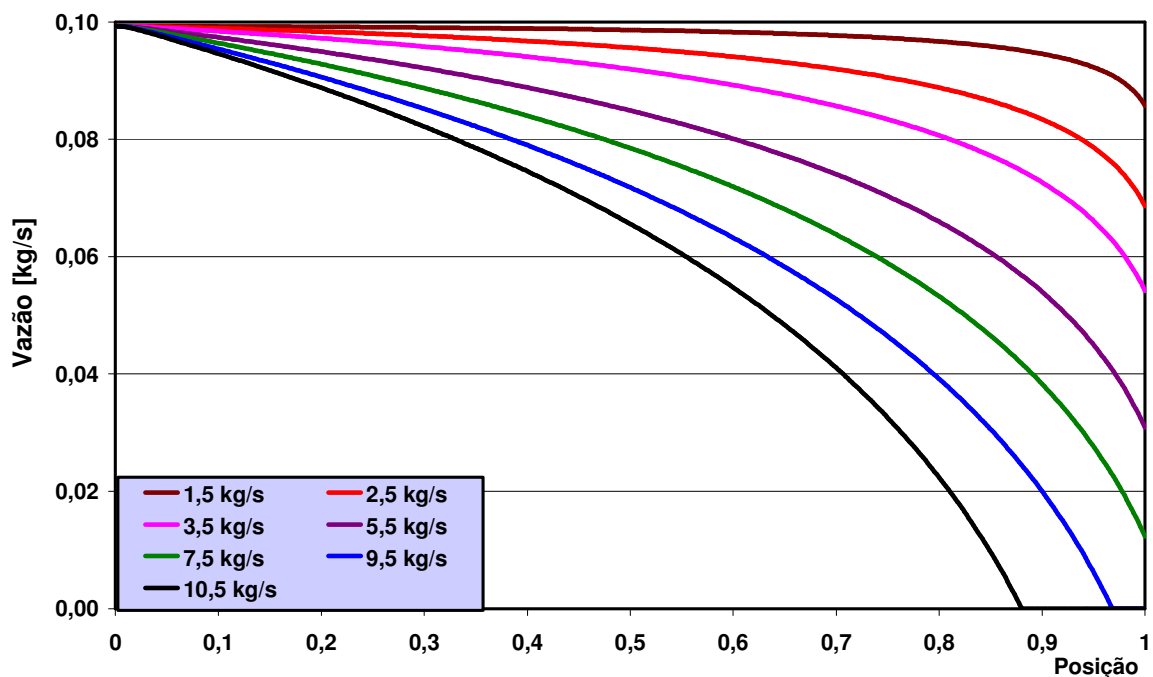


Figura 4.13 - Vazão de líquido no interior do secador para diversas vazões de ar quente.

No gráfico da Fig. 4.14 encontram-se as curvas de vazão de vapor no secador, para as diversas vazões de ar quente especificadas. Pode-se notar pela presença de um patamar da vazão de vapor nas duas curvas superiores, para as vazões de 9,5 e 10,5 kg/s, que a carga de tijolos encontra-se completamente seca.

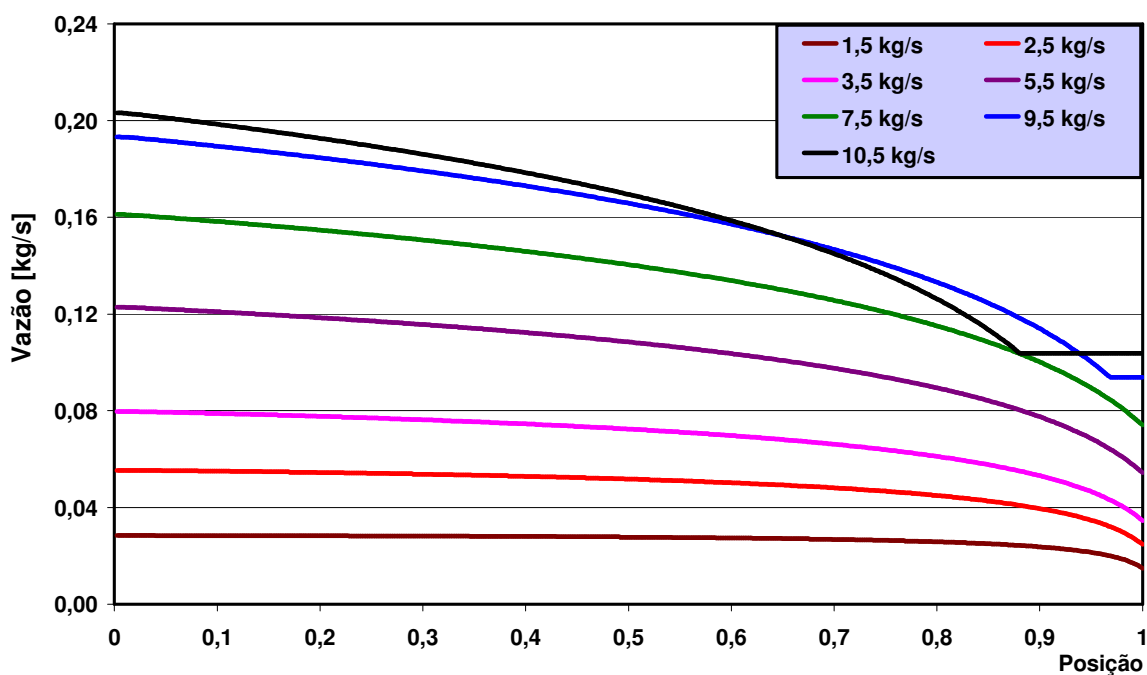


Figura 4.14 - Vazão de vapor no interior do secador para diversas vazões de ar quente.

O gráfico da Fig. 4.15 mostra, percentualmente, a energia consumida na mudança de fase líquido-vapor, em relação ao consumo total de energia, para as diversas vazões de ar quente especificadas. Foi acrescentado a esta figura, e também às duas seguintes, Fig. 4.16 e 4.17, o resultado de uma simulação com uma vazão de 11,5 kg/s de ar quente, para demonstrar que a parcela de energia consumida na evaporação diminui continuamente após a secagem completa da carga, conforme já era esperado. Percebe-se nesta figura que para as vazões de 5,5 a 9,5 kg/s, esta parcela de energia encontra-se na faixa de 30,5 a 26,0 %, respectivamente. Estas vazões são justamente aquelas em cujas simulações a carga deixa o secador com menos de 31,1 % da umidade de entrada, ou seja, suficientemente seca para a posterior queima.

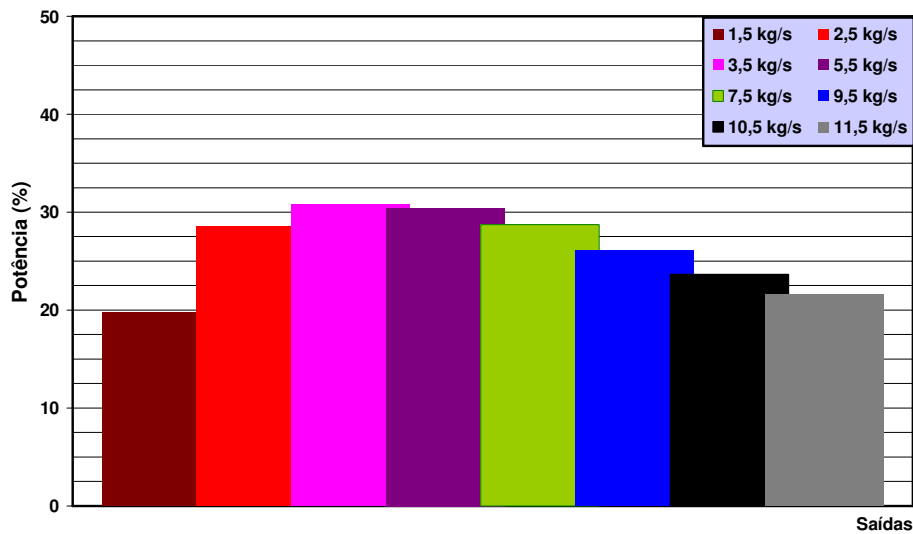


Figura 4.15 - Parcela de energia consumida na mudança de fase de líquido para vapor.

O gráfico da Fig. 4.16 apresenta a diferença de energia associada ao ar seco entre a entrada e a saída de ar do secador, para as diversas vazões de ar quente especificadas. A vazão de ar seco representa praticamente toda a energia entrando no secador, conforme mostrado na Tab. 4.2. Pode-se perceber uma leve tendência no valor desta diferença para vazões de ar capazes de secar completamente a carga de peças.

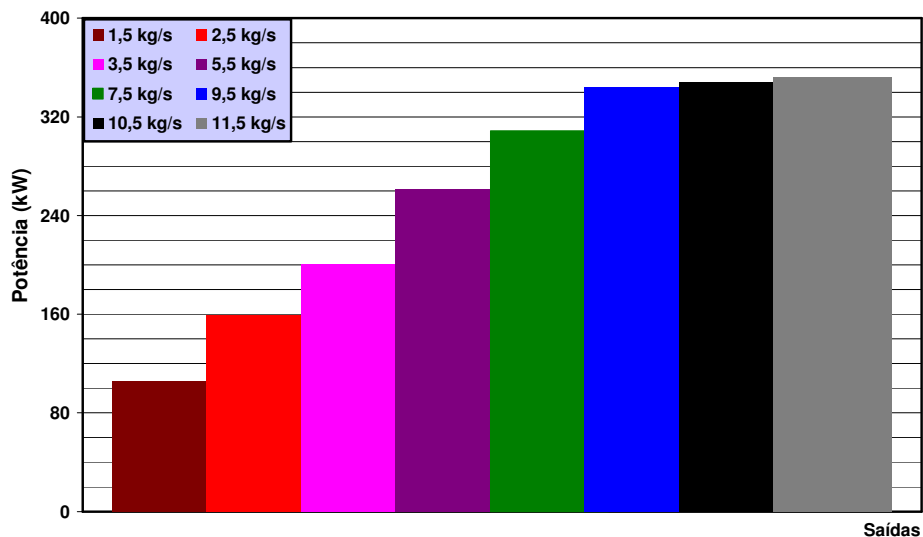


Figura 4.16 - Diferença de energia do ar seco entre a entrada e saída do secador, para diversas vazões de ar quente.

O gráfico da Fig. 4.17 apresenta, percentualmente, a energia consumida com a evaporação de líquido no secador em relação à diferença de energia entre a entrada e

saída do ar seco no secador, apresentada no gráfico da Fig. 4.16, para as diversas vazões de ar quente especificadas nas simulações. Percebe-se neste gráfico, para as simulações com vazões maiores que 5,5 kg/s (aquelas capazes de satisfazer a secagem dos tijolos) que, de 65,4 a 72,3 % da diferença de energia entre a entrada e saída do ar seco no secador ocorre pelo consumo com a mudança de fase líquido-vapor do líquido (umidade) da carga.

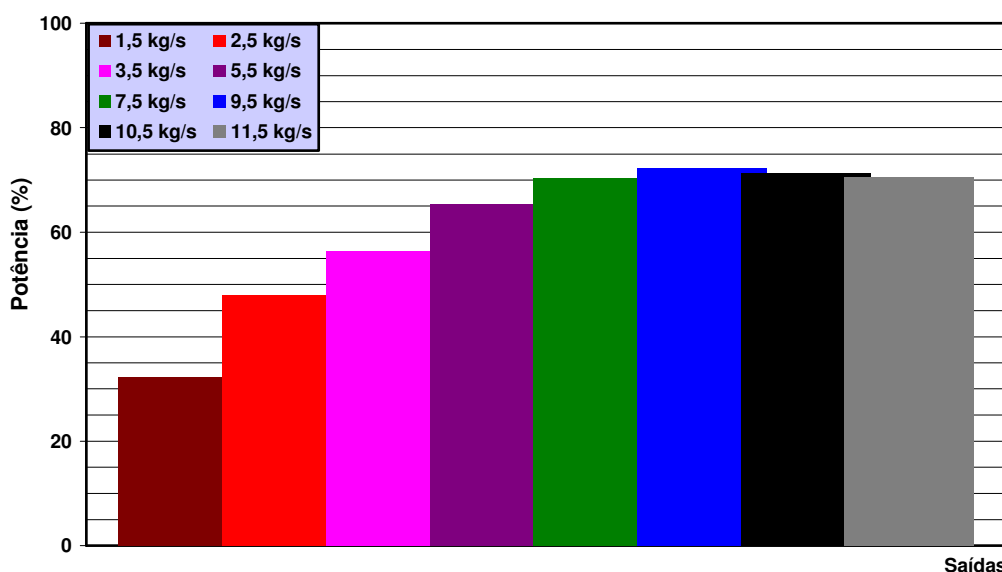


Figura 4.17 - Parcela da diferença de energia do ar seco entre a entrada e saída do secador, consumida na evaporação, para diversas vazões de ar quente.

4.4. O Coeficiente de Difusão

Também foram realizadas simulações com diferentes valores para o coeficiente de difusão. Seu valor foi alterado de $0,25 \cdot 10^{-4}$ à $2,5 \cdot 10^{-4}$ kg/m².s. O valor das demais variáveis permaneceram constantes.

Os resultados e as análises destas simulações encontram-se nos gráficos das Fig. 4.18 a 4.21. Pode-se perceber que estes gráficos são do mesmo tipo daqueles traçados anteriormente. Entretanto, há uma grande diferença na funcionalidade dos mesmos.

No gráfico da Fig. 4.18 encontram-se as curvas de vazão de líquido (umidade) no interior do secador, para os diversos coeficientes de difusão estabelecidos. Percebe-se que apenas para coeficientes de difusão maiores que $1,00 \cdot 10^{-4}$, todo o líquido (umidade) da carga evapora.

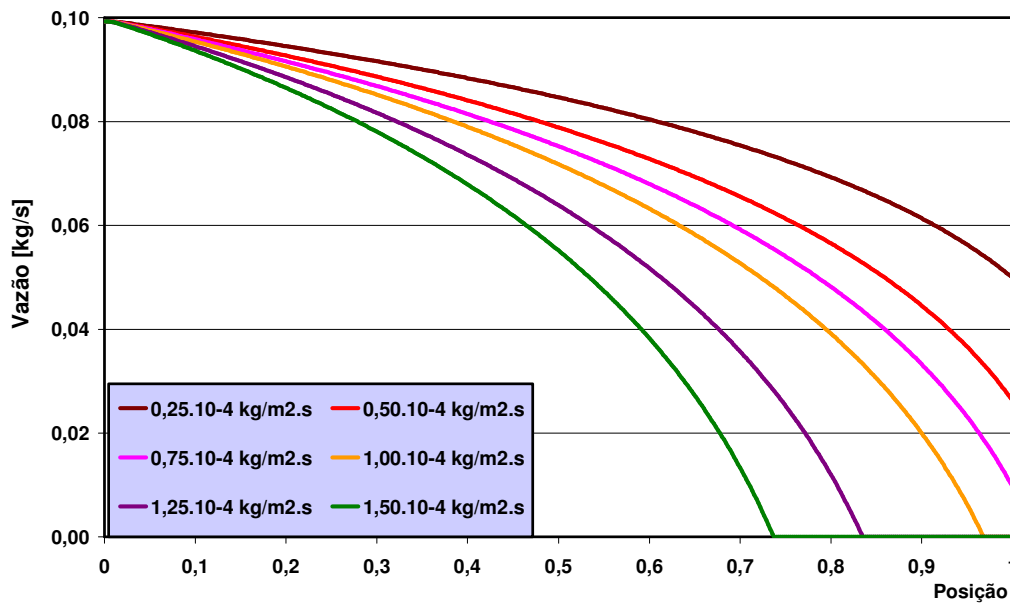


Figura 4.18 - Vazão de líquido no interior do secador para diversos coeficientes de difusão.

No gráfico da Fig. 4.19 encontram-se as curvas vazão de vapor no interior do secador, para os diversos coeficientes de difusão. Percebe-se novamente que apenas para coeficientes de difusão maiores que $1,00 \cdot 10^{-4}$ [kg/m².s], a vazão de vapor alcança seu valor máximo, no início do secador, isto é, todo o líquido (umidade) da carga evapora.

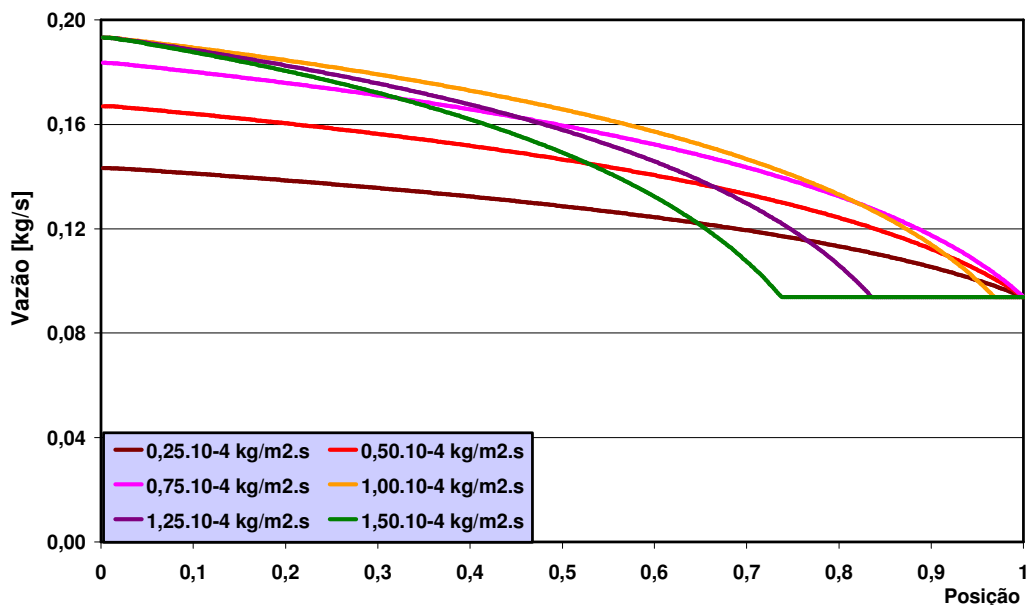


Figura 4.19 - Vazão de vapor no interior do secador para diversos coeficientes de difusão.

No gráfico da Fig. 4.20 encontram-se as curvas de umidade relativa do ar no interior do secador, para os diversos coeficientes de difusão estabelecidos. Note-se que

foi incluída uma simulação com coeficiente de difusão igual a zero neste gráfico, assim como no seguinte, Fig 4.21. Neste gráfico pode-se perceber que, para uma dada condição operacional, existem curvas-limite para a umidade relativa no interior do secador. Estes limites são a curvas em que nenhuma secagem ocorre, ou seja, *difusao* igual a zero, e aquela em que a secagem completa somente ocorre no final do secador, ou seja, aquela em que a carga deixa o secador no momento exato em que acaba de secar, neste caso a curva de difusão $1,00 \cdot 10^{-4}$ [kg/m².s]. Esta situação sugere que se pode desenvolver uma forma de se determinar, aproximadamente, o coeficiente de difusão, utilizando-se apenas de medições da umidade relativa no interior do secador, mas este tema não será aprofundado aqui.

A rigor esta análise é válida somente para o coeficiente externo de difusão, que domina a primeira fase da secagem, quando a maior parte da água é eliminada. Para as demais fases da secagem, o coeficiente interno de difusão é que passa a controlar o processo.

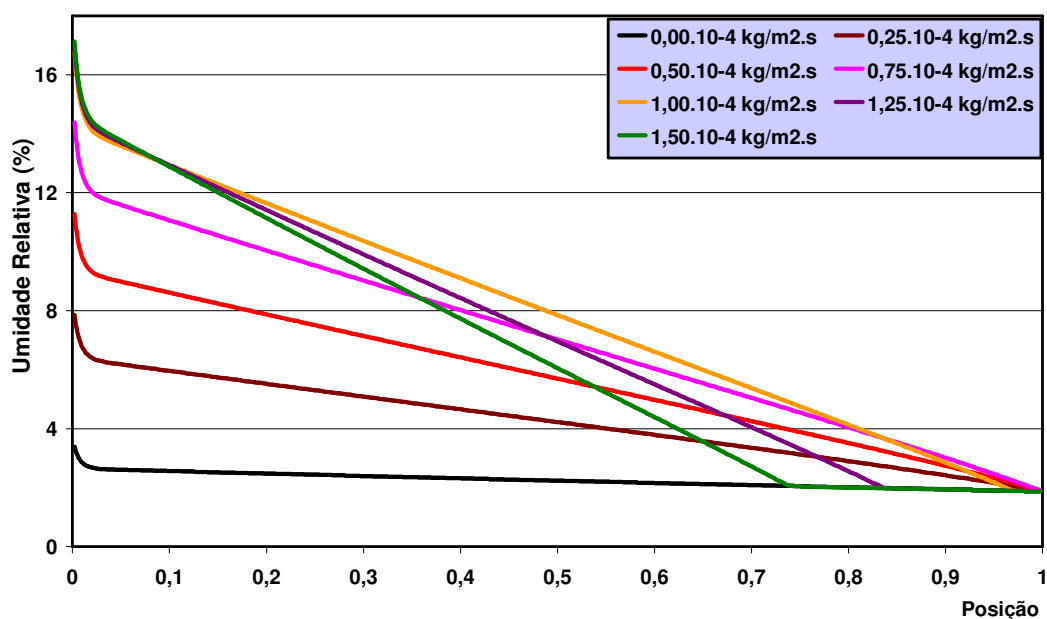


Figura 4.20 - Umidade relativa do ar no interior do secador para diversos coeficientes de difusão.

O gráfico da Fig. 4.21 mostra, percentualmente, a energia consumida na mudança de fase da água, em relação ao consumo total de energia, para os diversos coeficientes de difusão especificados. Percebe-se, neste gráfico, que para um coeficiente de difusão maior ou igual a $1,0 \cdot 10^{-4}$ [kg/m².s], quando é possível se evaporar toda a umidade, a parcela de potência consumida no processo de secagem alcança cerca de 26%.

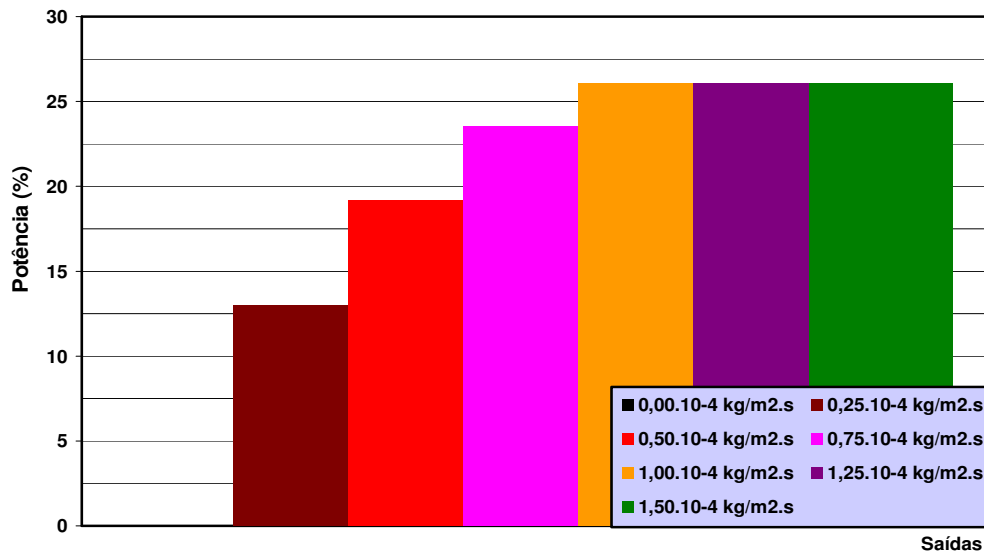


Figura 4.21 - Parcela da potência consumida na evaporação para diversos coeficientes de difusão.

4.5. Discussão

O desenvolvimento de uma ferramenta de simulação numérica é um trabalho bastante complexo e demorado, exigindo muitas vezes soluções criativas para problemas de ordem computacional e muito bom senso na aplicação de conceitos físicos e simplificações.

O programa de simulação demonstrou ser uma importante ferramenta na predição do comportamento e o projeto de secadores tipo túnel. Qualitativamente, o programa computacional pode mostrar a direção do comportamento do secador simulado, quando exposto a determinadas condições e ambientes. A utilização de uma ferramenta como esta pode trazer muitos conhecimentos sobre o funcionamento e o comportamento de um secador real, mesmo diante dos mais variados ambientes e condições operacionais.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

1. O fenômeno da secagem pode ser traduzido esquematicamente pelo diagrama de Sherwood e pela curva de Bigot. Mais de 60 % da umidade é liberada do produto na primeira fase da secagem. Nesse período ocorre também retração, processo de grande interferência na qualidade da peça. O gradiente de umidade prevalecendo na secagem do produto é responsável pela tendência da formação de fissuras. Em algumas ocasiões as trincas são causadas mais por baixa resistência mecânica do que por pequenas contrações. O gradiente de umidade, responsável pelo risco de rachaduras, pode ser reduzido com a diminuição da velocidade de secagem. A tendência de a peça rachar também pode ser reduzida ao se aumentar o coeficiente de condutividade hidráulica da peça. Reduzir a velocidade de secagem e aumentar a temperatura do produto verde a um valor abaixo da temperatura crítica da matéria-prima são técnicas sutis, a fim de se obter produtos que não apresentem rachaduras e eflorescências.

2. As experiências de laboratório tiveram o objetivo de investigar a influência de alguns parâmetros de preparação da massa cerâmica no tempo de secagem. De maneira geral, pode-se dizer que, nos ensaios realizados, as taxas de secagem se igualam depois de transcorrido cerca de 50% do tempo de secagem, com as amostras apresentando umidade abaixo de 6%. Vale lembrar que, na indústria, é usual se retirar peças dos secadores com teor de umidade em torno de 3%. Assim, metade do tempo de secagem é utilizada para se eliminar os últimos 3% de umidade e que, a otimização dos parâmetros de confecção da amostra, influencia, de forma moderada, somente os primeiros 50% do tempo total.

3. Como o processo de fabricação dos produtos da indústria de cerâmica vermelha exige uma grande demanda energética, este trabalho visou racionalização do consumo da energia empregada no processo de secagem. Deste modo tem-se como contribuição final a proposição de melhorias a serem implementadas no processo de secagem e nos secadores, visando uma redução no desperdício de energia. Melhorias na secagem de peças de um secador real foram obtidas com pequenas regulagens, após a diminuição da temperatura e o aumento da umidade relativa na região de entrada do secador, assim como o desligamento dos primeiros ventiladores autoviajantes, o que eliminou a

ventilação direta sobre as peças, no início do processo de secagem. O resultado foi surpreendente, pois esta nova situação acelerou significativamente a taxa de secagem e ainda permitiu que as peças saíssem do secador com um conteúdo de umidade menor do que na situação original. A explicação está no fato de que com uma secagem mais lenta no início, a superfície da peça não sofreu secagem e retração superficial tal que dificultasse a migração da umidade localizada nas partes mais interiores da peça. Assim, a primeira fase da secagem pode se desenvolver, após a etapa de adaptação, com uma maior e, aproximadamente constante taxa de secagem. Com isso, ao percorrer 65% do comprimento do secador, as peças já estavam tecnicamente secas com a nova regulagem, enquanto que na situação original era preciso se percorrer 80% para se obter o mesmo efeito. Portanto, além da ampliação da capacidade de secagem, o secador passou a economizar energia elétrica, uma vez que vários motores de ventiladores autoviajantes foram desligados.

Melhorias em um secador túnel mais simples, representativo do modelo encontrado em maior número no mercado, foram implementadas para demonstrar que, com pequenas obras e ajustes, pode-se adequar o funcionamento do equipamento para patamares de maior eficiência e economia. O comparativo entre as condições anterior e posterior às melhorias do secador, demonstra que houve uma retirada maior de umidade e que também se passou a ter uma secagem mais homogênea. A secagem atual difere em apenas 3% entre amostras inferiores e superiores do carregamento, quando anteriormente esta diferença estava em praticamente 12%. Esses resultados foram conseguidos em conjunto com um aumento real de produção de 29%. Na nova condição, o rendimento térmico do secador aumentou, pois a energia total associada aos gases do exaustor – que em última análise é o responsável pelo transporte da umidade para o exterior – aumentou de 12,7% para 63% em relação à energia consumida. A potência de operação do equipamento pôde ainda ser diminuída para 1/3 do valor original.

Este trabalho mostrou os avanços obtidos com a ampliação da capacidade de um sistema de secagem sem o aumento de sua estrutura, apenas através da otimização de seu funcionamento, aproveitando com maior eficiência toda a energia despendida para o secador. Embora apenas no momento de acerto do conjunto (forno + secador), pode-se avaliar o resultado do comportamento do mesmo, dados preliminares indicam que as mudanças já são responsáveis por uma redução das perdas de secagem em cerca de 30%. Se o calor que alimenta o secador não for recuperado do forno, o secador pode representar cerca de 50% do consumo térmico de uma empresa. Por isso, muito cuidado deve ser tomado com a regulagem do conjunto forno + secador. Os resultados mostram

também que os secadores, mais simples que os fornos, apresentam uma facilidade de regulagem e de ajuste. Entretanto estes equipamentos nem sempre são devidamente considerados no momento de sua execução, sendo concebidos com erros e distorções de difícil correção, a não ser com obras como as executadas.

4. O programa de simulação demonstrou ser uma importante ferramenta na predição do comportamento e no projeto de secadores tipo túnel. Os resultados obtidos com a utilização do programa de simulação numérica, tais como perfis de temperatura e umidade do secador, perdas de energia, curvas de vazão de ar seco, vapor, líquido e taxas de evaporação, servem para se determinar condições ideais de operação para um secador real. Estes resultados podem fornecer informações importantes, sobre o comportamento de um secador, quando da mudança de alguma variável operacional do mesmo. Uma condição-padrão de funcionamento do secador foi escolhida em função de ser aquela com a menor vazão de ar quente (95°C) capaz de secar completamente uma carga de peças. Nestas condições, 26% de toda a energia que entra no secador são utilizados na evaporação da água, enquanto 6% são transportados pela carga para o ambiente. A maior parcela, cerca de 60%, sai como calor sensível do ar e do vapor pela chaminé. As perdas pelas fronteiras chegam a 7,3%. Vale lembrar que cálculo da energia transportada leva em conta uma temperatura de referência igual a 273,15 K (0°C).

A curva de vazão de vapor revela a forte influência das condições de umidade do ar ambiente, pois, para um dia relativamente seco, com 50% de umidade relativa, praticamente metade da água que entra no secador se deve ao vapor contido no ar quente. A umidade relativa aumenta de forma não proporcional à diminuição da vazão de ar quente, pois além de uma menor vazão de ar quente tornar-se saturada com uma menor vazão de vapor, ela ainda tende a se resfriar mais rapidamente. Por isso, caso a vazão ou as temperaturas dentro do secador sejam mal estabelecidas, facilmente incorre-se em condensação.

A parcela de energia consumida na evaporação diminui continuamente após a secagem completa da carga, conforme já era esperado. Para as vazões de 5,5 à 9,5 kg/s, esta parcela de energia encontra-se na faixa de 30,5 à 26,0 %, respectivamente, utilizando-se o coeficiente de troca de massa, *difusão*, igual $1,00 \cdot 10^{-4}$ [kg/m².s]. Estas vazões são justamente aquelas em cujas simulações a carga deixa o secador com menos de 30% da umidade de entrada, ou seja, suficientemente seca para ser encaminhada ao forno. Caso se considere somente a diferença de energia entre a entrada e a saída do secador, a parcela utilizada na evaporação varia de 65,4 a 72,3% para as mesmas faixas de vazão. Esta diferença alcança um patamar a partir de coeficientes de difusão

suficientes para secar completamente a carga (maiores do que $1,00 \cdot 10^{-4}$ [kg/m².s]). Assim, conclui-se que ao monitorar a vazão e a temperatura de entrada e saída do ar, podem-se relacionar os dados obtidos ao coeficiente de troca de massa, como um dos parâmetros de avaliação do processo. O parâmetro kcal/kg_{carga} não é muito adequado para se avaliar o desempenho intrínseco um secador. Melhor seria usar a relação kcal/kg_{água}.

Quanto ao programa de simulação, o próximo passo seria a obtenção de uma função adequada para o coeficiente de troca de massa (*difusão*), variável com o conteúdo de umidade da peça, conforme o diagrama de Sherwood propõe, e que seja representativo de todo o processo de secagem. Recomendam-se algumas melhorias no modelo matemático, quais sejam:

1. Divisão dos volumes de ar na altura. Divisão dos volumes de ar e da carga na direção transversal ao escoamento e adoção de um modelo para trocas de massa de vapor entre as camadas de ar.
2. Prever a possibilidade de condensação e temperaturas de entrada para o ar acima de 100°C.
3. Inserir o dimensionamento dos canais de injeção de ar e suas perdas de carga.
4. Modelação do meio poroso da argila, de forma a se obter um coeficiente de troca de massa (*difusão*), variável no tempo e/ou com o conteúdo de umidade da peça.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABC, Associação Brasileira de Cerâmica. *Anuário brasileiro de cerâmica 2003*. São Paulo: ABC, 2003.
2. Abreu, Percy Louzada de., Martinez, José Antônio. *Gás Natural: o combustível do novo milênio*. 2. ed. Porto Alegre: Plural Comunicação, 2003.
3. AMBONI, Nério. *Dissertação de mestrado*: EPS: UFSC, 1997.
4. *Apostila de tecnologia cerâmica*. São Bernardo do Campo: SENAI Mario Amato, 1990.
5. BAZZO, Edson. *Geração de vapor*. 2.ed. Florianópolis: UFSC, 1995.
6. BARBOSA JR, José Celso. *A Influência do Preço do Gás Natural na Secagem por Atomização*. In VIII Encontro de Mineradores e Consumidores, 2000.
7. *Balanco Energético Nacional (BEN2003)*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2003.
8. BUSTAMANTE, G.M., BRESSIANI, J.C. *A indústria cerâmica brasileira*. Cerâmica Industrial, v. 5, n.3, 31-36, 2000.
9. BRISTOT, Vilmar Menego. *Máquinas e equipamentos para cerâmica*: [s.l.]. Luana Ltda, 1996.
10. BROSANAN, Denis A., ROBINSON, Gilbert C. *Introduction to drying of ceramics*. Ohio: The American Ceramic Society, 2003.
11. DADAM A. P., NICOLAU V. P., LEHMKUHL W. A., et al. *Uso do Gás Natural na Queima de Produtos de Cerâmica Vermelha*. In: 47º CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa, 2003.

12. HARTKE, Rafael F., LEHMKUHL, Willian A., NICOLAU, Vicente de P. Análise numérica de um secador contínuo utilizado na indústria de cerâmica vermelha. In ENCIT 2004.
13. INCROPERA, Frank P., DE WITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992.
14. JAHN T. G., NICOLAU V. P., HARTKE R. F., KAWAGUTI W. M., LEHMKUHL W. A., DADAM A. P. *Conversão para o Gás Natural de um Forno Túnel Destinado à Cerâmica Vermelha*. In: II Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, 2003.
15. FACINCANI, Ezio. *Tecnologia cerâmica: i laterizi*. 2.ed. Itália: Faenza, 1992.
16. MÁŠ, Edgar. *Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha*. Criciúma: Pólo Produções Ltda, 2002. V. 3.
17. MAFRA, Antero Tadeu. Dissertação de mestrado. EPS: UFSC, 1999.
18. MALLOL, E. J. E., MONFORT, G., CANTAVELLA, V., et al. *Racionalização de Energia em Fornos de Revestimentos Cerâmicos*. Cerâmica Industrial, 2000.
19. NICOLAU, V. P., JAHN, T. G., HARTKE, R. F., LEHMKUHL, W. A., et al. *Análise energética e um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha*. In: CBE 2002 – Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro, 2002.
20. NICOLAU, V. P., HARTKE, R. F., LEHMKUHL, W. A., et al. *Análise numérica e experimental de um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha*. In: ENCIT 2002.
21. NICOLAU V. P., LEHMKUHL W. A., JAHN T. G., et al. *Análise Experimental de um Secador contínuo Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha*. In: CONEM 2004 – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Belém, 2004.
22. *Portal GásEnergia*. <http://www.gasenergia.com.br>, 2005.
23. READ, Herbert. *O Significado da arte*. Portugal: Ulisseia, 1968.

24. SANTOS, G. M., BAZZO, E., NICOLAU, V. P., et al. *Serragem e gás natural como fontes energéticas em fornos túneis na indústria cerâmica vermelha*. In: ENCIT 2000.
25. SANTOS, Pécio de Souza. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2.ed., v. 1. Edgard Blücher.
26. SECTME. *Diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina*. Florianópolis: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia de Santa Catarina, 1990.
27. SENAI/CET TIJUCAS. *Curso de tecnologia em cerâmica vermelha – Módulo: massa, secagem, queima*. SENAI/CET Tijucas, 1996.
28. TELLJOHANN, Uta. *Influence of dryer atmosphere on the danger of drying cracks and dryer scumming*. [s.l.]. Ziegelindustrie International, 2003.
29. TAPIA, R. E. C., VILLAR, S. C., HENRIQUE JR., M. F., et al. *Manual para a indústria de cerâmica vermelha*. Rio de Janeiro: SEBRAE, 2000, 90 p.
30. VIEIRA, Carlos M. F., FEITOSA, Higina S., MONTEIRO, Sérgio N. *Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot*. Campos dos Goytacazes: UENF.
31. WITWER, E., FARIA, R. W. *Conservação de energia nas pequenas e médias indústrias do Estado do Rio de Janeiro: setor de cerâmica vermelha*. Relatório final, Rio de Janeiro, 1997.