

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SECAGEM DE SÍLICA GEL EM LEITO FIXO

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036125



EDUARDO AUGUSTO FERREIRA PIERRI

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: PROF. DR. SAMUEL WASHINGTON CELERE

São Carlos
1998

Class.	TESE/EESC
Curr.	4449
Tombo	0258198

31100036125

st 0999170

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

P623s Pierri, Eduardo Augusto Ferreira
Secagem de sílica gel em leito fixo / Eduardo
Augusto Ferreira Pierri. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Samuel Washington Celere.

1. Sílica gel. 2. Secagem em leito fixo.
3. Estudo experimental. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **EDUARDO AUGUSTO FERREIRA PIERRI**

Dissertação defendida e aprovada em 21-08-1998
pela Comissão Julgadora:



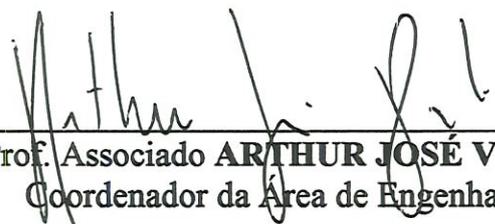
Prof. Dr. **SAMUEL WASHINGTON CELERE (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **JOSMAR DAVILSON PAGLIUSO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **DANTE CONTIN NETO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho :

a meus pais Olga e Neval por sempre terem dirigido-me palavras de incentivo;

a memória de minha irmã Magda que, na última conversa séria que tivemos, perguntou-me quando terminaria este trabalho;

a meus filhos Ricardo, Vinicius e Isabella e esposa Elaise, pela compreensão e paciência dispendida

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Crosfield Brasil Ltda pelo apoio na realização deste trabalho fornecendo equipamentos e tempo livre para realização dos ensaios, em particular a Flávio Ribeiro, ao pessoal do Laboratório de Controle de Qualidade, da produção das domas e da oficina;

Agradeço a meu orientador Prof. Dr. Samuel Washington Celere por sempre ter se mostrado solícito a meus pedidos;

Agradeço ao pessoal do Laboratório de Termodinâmica, por ajustar o sistema de aquisição de dados, ao Prof Dr. Geraldo Lombardi, por emprestar o LAMET para ensaio da placa de orifício e aos Prof. Dr. Antônio Moreira, Fernando Milioli e principalmente ao Prof. Dr. Josmar Pagliuso pelo apoio prestado;

Agradeço ao pessoal da secretaria de pós-graduação, em especial a Bete, a Ana Paula e a Nazareth;

Agradeço aos meus colegas de pós-graduação pelo tempo e experiência compartilhada

Agradeço ao Prof. Dr. Rosalvo Ruffino pelo apoio logístico e orientação;

Agradeço aos senhores Baltazar Silva, Paulo Stoduto e Manoel Dias por terem cedido/fabricado praticamente todo o aparato experimental;

Enfim, agradeço a Deus por abençoar a todos nós.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 - INTRODUÇÃO	1
2.- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1- Secagem por batelada com fluxo de ar através do leito	5
2.2- Revisão bibliográfica	12
3- SISTEMA EXPERIMENTAL	18
3.1- Estabelecimento dos parâmetros de secagem	19
3.2- Descrição do experimento	20
3.3- Evolução do processo experimental	29
3.4- Metodologia de ensaio	37
3.5- Sistema de medição de vazão	40
3.6- Calibração dos termopares	46
4- CÁLCULOS E DEFINIÇÕES	49
4.1- Balanço de massa de sílica durante a secagem	50
4.2- Balanço de massa de água entre o material do leito e o ar de secagem	51
4.3- Equação para a taxa de secagem no período de taxa de secagem constante	53
4.4- Equação geral da taxa de secagem	53
4.5- Apresentação dos dados dos ensaios	55

5-	RESULTADOS	57
5.1-	Perda de material do leito por fragmentação e elutriação	58
5.2-	Varição Granulométrica	60
5.3-	Varição microscópica da sílica	64
5.4-	Análise do processo de secagem	66
5.5-	Taxa de secagem	81
5.6-	Equação geral da taxa de secagem	88
5.7-	Equação do Ntg	94
6-	CONCLUSÕES.....	102
7-	ANEXOS	104
7.1-	Resultado granulometria	104
7.2-	Resultados dos ensaios - Planilhas	118
7.3-	Difusão em meio poroso	165
8-	BIBLIOGRAFIA	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-	Secagem de material granular com fluxo de ar através do leito	05
Figura 2.2-	Curva típica de taxa de secagem, para condições constantes (Treybal, 1980).....	06
Figura 2.3-	Curva de secagem para as diversas camadas de material do leito (Pikon, 1984)....	06
Figura 2.4-	Esquema da migração de água no grão da sílica e representação imaginária da tensão de capilar.....	11
Figura 3.2.1-	Vista geral do aparato experimental, com o sistema de coleta de dados.....	20
Figura 3.2.2-	Esquema do aparato experimental	21
Figura 3.2.3-	Detalhe da câmara de secagem na sua configuração atual.....	22
Figura 3.2.4-	Vista interna da estufa. Detalhe do plenum de pressão à montante e do conjunto homogeneizador do fluxo de ar.....	23
Figura 3.2.5-	Posicionamento dos termopares na região inferior da estufa.....	24
Figura 3.2.6-	Bandeja de secagem. A) Configuração atual B) Configuração anterior.....	25
Figura 3.2.7-	Detalhe do ventilador e damper de controle da vazão, placa de orifício e sensor de pressão, e entrada dos termopares na estufa	26
Figura 3.2.8-	Detalhe dos termopares na entrada ventilador, para medida de TBS e TBU.....	28
Figura 3.2.9-	Detalhe da medição da TBU na saída da estufa.....	28
Figura 3.3.1-	Esquema do aparato experimental, primeira configuração.....	30
Figura 3.3.2-	Detalhe da câmara de secagem. Primeira configuração	31
Figura 3.3.3-	Primeira configuração da estufa, com o came e cilindro pneumático que o movimenta	32
Figura 3.3.4-	Ensaio preliminar de secagem com o mecanismo de elevação da bandeja acionado	33
Figura 3.3.5-	Ensaio preliminar secagem com mecanismo de elevação bandeja desabilitado	33
Figura 3.3.6-	Detalhe da câmara de secagem. Segunda configuração.....	34
Figura 3.3.7-	Ensaio preliminar de secagem sem modificações internas na câmara de secagem.....	36
Figura 3.3.8-	Ensaio preliminar de secagem com melhorias internas na câmara de secagem e alterações na bandeja	36
Figura 3.4.1-	Identificação dos termopares do aparato experimental.....	39
Figura 3.5.1-	Placa de orifício e câmara de alta e baixa pressão.....	44
Figura 3.5.2-	Esquema de ensaio da placa de orifício	46
Figura 3.5.3-	Comparação vazão real x vazão teórica.....	47

Figura 5.1-	Colapso do grão com a intensidade da secagem para sílica de granulometria inicial 1,6 - 2,6 mm. - Distribuição granulométrica	61
Figura 5.2-	Colapso do grão com a intensidade de secagem para sílica de granulometria inicial 3,7 - 5,1 mm - Distribuição granulométrica	62
Figura 5.3-	Variação área superficial em função da condição de ensaio. Sílica granulometria inicial 1,6 - 2,6 mm.	65
Figura 5.4-	Variação área superficial em função da condição de ensaio. Sílica granulometria inicial 3,7 - 5,1 mm.	65
Figura 5.5-	Variação do volume dos poros em função da condição de ensaio. Sílica granulometria inicial 1,6 - 2,6 mm.	65
Figura 5.6-	Variação do volume dos poros em função da condição de ensaio. Sílica granulometria inicial 3,7 - 5,1 mm.	65
Figura 5.7-	Resultado do ensaio D2.1-V60-T80-C.....	67
Figura 5.8-	Resultado do ensaio D4.4-V60-T120-C.....	69
Figura 5.9-	Resultado do ensaio D4.4-V60-T80-A.....	70
Figura 5.10-	Resultado do ensaio D4.4-V110-T120-B.....	72
Figura 5.11-	Resultado do ensaio D2.1-V110-T120-C.....	73
Figura 5.12-	Gráfico do comparativo da umidade relativa final do processo de secagem - umidade medida e calculada.....	76
Figura 5.13-	Resultado do ensaio D4.4-V210-T180-A.....	78
Figura 5.14-	Comparação do tempo adimensional do ponto crítico da secagem para cada configuração de secagem.....	79
Figura 5.15-	Comparação da perda de carga no leito no início da secagem.....	79
Figura 5.16-	Comparação da variação relativa da pressão no leito durante a secagem em função da perda de carga inicial.....	80
Figura 5.17-	Taxa de secagem para sílica de granulometria média 2,1 mm e vazão de ar inicial de 60 kg/h	82
Figura 5.18-	Taxa de secagem para sílica de granulometria média 2,1 mm e vazão ar inicial de 110 kg/h.....	83
Figura 5.19-	Taxa de secagem para sílica de granulometria média 2,1 mm e vazão de ar inicial de 210 kg/h.....	84
Figura 5.20-	Taxa de secagem para sílica de granulometria média 4,4 mm e vazão de ar inicial de 60 kg/h.....	85
Figura 5.21-	Taxa de secagem para sílica de granulometria média 4,4 mm e vazão de ar inicial de 110 kg/h.....	86

Figura 5.22- Taxa de secagem para sílica de granulometria média 4,4 mm e vazão de ar inicial de 210 kg/h.....	87
Figura 5.23- Curva do coeficiente α_D para a relação da granulometria com a taxa de secagem.....	91
Figura 5.24- Curva do coeficiente α_T para a relação da temperatura com a taxa de secagem.....	92
Figura 5.25- Curva do coeficiente α_G para a relação da descarga com a taxa de secagem.....	93
Figura 5.26- Gráfico do espalhamento da equação geral para a taxa de secagem.....	94
Figura 5.27- Ntg para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial 60 kg/h.....	95
Figura 5.28- Ntg para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial 110 kg/h.....	96
Figura 5.29- Ntg para sílica de granulometria média 2.1mm e vazão de ar inicial 210 kg/h.....	97
Figura 5.30- Ntg para sílica de granulometria média 4.4mm e vazão de ar inicial 60 kg/h.....	98
Figura 5.31- Ntg para sílica de granulometria média 4.4mm e vazão de ar inicial 110 kg/h.....	99
Figura 5.32- Ntg para sílica de granulometria média 4.4mm e vazão de ar inicial 210 kg/h ..	100
Figura 5.33- Curva de Ntg médio.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Características experimentais dos trabalhos analisados.....	15
Tabela 3.5.1-	Parâmetros básicos para as vazões do experimento	44
Tabela 3.5.2-	Calibração placa de orifício - equacionamento teórico e ensaio	47
Tabela 5.1-	Resumo dos dados coletados durante os ensaios	59
Tabela 5.2-	Distribuição granulométrica após a secagem da sílica com granulometria inicial no intervalo 1,6 - 2,6 mm.....	61
Tabela 5.3-	Distribuição granulométrica após a secagem da sílica com granulometria inicial no intervalo 3,7 - 5,1 mm.....	62
Tabela 5.4-	Análise microscópica da sílica gel. Valores determinados da Área Superficial e do Volume dos Poros.....	64
Tabela 5.5-	Resumo dos principais parâmetros do processo de secagem para cada ensaio realizado.....	74
Tabela 5.6-	Resumo dos principais parâmetros do processo de secagem para as dezoito configurações de ensaio.....	75
Tabela 5.7-	Taxa de secagem média em função do teor de umidade do leito para cada configuração de ensaio.....	88
Tabela 5.8-	Valores do coeficiente α_D em função do teor de umidade combinando as duas faixas granulométricas.....	91
Tabela 5.9-	Valores do coeficiente α_T em função do teor de umidade combinando as temperaturas de secagem, duas a duas.....	92
Tabela 5.10-	Valores do coeficiente α_G em função do teor de umidade combinando as descargas de secagem, duas a duas.....	93
Tabela 5.11-	Valores do Ntg em função do teor de umidade para as configurações de ensaio.....	101

SÍMBOLOS

a	área da seção transversal da placa	[m ²]
a	área da superfície do material por unidade de volume	[m ² /m ³]
A	área da seção transversal do leito	[m ²]
C	coeficiente de descarga	adim
d, d _g	diâmetro do grão/partícula	[mm]
d _p	diâmetro da placa de orifício	[mm]
d _t , D	diâmetro do tubo	[mm]
D	média granulométrica do material a ser seco	[mm]
D _g	difusividade do gás pg.10	[m ² /s]
D _{H₂O, ar}	coeficiente de difusão ordinário para misturas água-ar (anexo3)	[m ² /s]
D _K	coeficiente de difusão Knudsen para misturas água-ar (anexo3)	[m ² /s]
D _{K, eff}	coeficiente de difusão Knudsen para misturas água-ar (anexo3)	[m ² /s]
D _s	coeficiente de difusão de superfície para misturas água-ar (anexo3)	[m ² /s]
D _{s, eff}	coeficiente de difusão de superfície para misturas água-ar (anexo3)	[m ² /s]
DPI	variação da pressão no leito, perda de carga	[mmca]
[DPI]	variação adimensional da pressão no leito - pg. 56	adim
G	descarga de ar	[kg/h]
[G]	descarga adimensional de ar	adim
g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
g	descarga ar unitária	[kg/min m ²]
h	altura do leito	[mm]
h	coluna de pressão diferencial pg.40	[mmca]
H _{ads}	calor de adsorção (anexo 3)	[kJ/kg _{água}]
j _D	fator de transferência de massa de Colburn (k _Y p _{gr} Sc ^{2/3} /G) pg.10	adim
Sc	número de Schmidt (μ / ρ D _g) pg.10	adim
K	coeficiente de vazão pg.41	adim
k _Y	coeficiente de transferência de massa fase gasosa	[kg/m ² h]
m	massa	[kg]
M	massa molecular	[kg/kmol]
n	taxa de secagem unitária	[kg _{água} /min.m ₂]
N	taxa de secagem	[kg _{água} /min]
Ntg	número de unidade de transferência de gás no leito pg.9	adim
p	pressão parcial de vapor	[Pascal]
p _{ws}	pressão parcial de vapor na saturação	[Pascal]
p _{gr}	pressão parcial logarítmica média do ar no leito pg.10	[Pascal]
P _{abs}	pressão absoluta local	[Pascal]
P _{est}	pressão estática à montante da placa de orifício	[Pascal]
P _p	pressão total na placa de orifício	[Pascal]
q	vazão de ar	[m ³ /h]
Re	número de Reynolds	adim
S	superfície interfacial do material por unidade de área da seção transversal do leito	[m ² /m ²]
t	tempo	[min]
t _r	tempo do início do período de taxa de secagem decrescente	[min]
t _F	tempo do fim da secagem	[min]
T	temperatura	[°C]
T _{eq}	acréscimo na temperatura do ar gerado pelo ventilador	[°C]
T _{mm}	temperatura média dos nove termopares na saída da estufa	[°C]
[TETAs,m]	temperatura adimensional média de saída pg.56	adim
UR	umidade relativa da sílica	[%]

[UR]	umidade relativa adimensionalizada da sílica	
V	velocidade média de escoamento	[m/s]
X	teor de umidade do leito	[kg _{água} /kg _{sílica}]
Y ₁	coeficiente de expansão da placa de orifício pg.42	adim
w	umidade absoluta	[kg _{água} /kg _{ar seco}]
ws	umidade absoluta na saturação	[kg _{água} /kg _{ar seco}]
Wa	massa de água	[kg]

Letras gregas

α_D	coeficiente de variação da granulometria	adim
α_G	coeficiente de variação da descarga	adim
α_T	coeficiente de variação da temperatura	adim
ε	porosidade do leito	adim
ρ	densidade	[kg/m ³]
μ	viscosidade	[Pa.s]
γ	peso específico	[N/m ³]
β	razão de diâmetro da placa de orifício /placa	adim
τ_g	tortuosidade do gás no leito (anexo3)	adim
τ	tempo adimensional	adim
τ_f	tempo adimensional início período da taxa de secagem decrescente	adim
Λ	altura piezométrica	[m]

Subscrito

0	inicial
1	posição à montante da placa de orifício
2	posição à jusante da placa de orifício
amb	ambiente
band	bandeja
calc	calculada
e	entrada
f	final
H ₂ O	água
i	início da secagem
inf	inferior
k	temperatura em graus Kelvin
L	leito
m	média
máx	máximo
med	medida
med	média
p	partícula/ grão
r	ponto crítico pg. 5
R	removida
s	saída
sil	sílica

sup superior
t teórico
u úmido (início da secagem)

Sobrescrito

* saturação, na temperatura de saturação adiabática
' base seca

RESUMO

PIERRI, E.A.F. *Secagem de sílica gel em leito fixo*. São Carlos, 1998 . 171p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

A secagem em leito fixo de sílica gel de forma e tamanho irregulares com fluxo de ar forçado através do leito foi estudada neste trabalho, sob condições adiabáticas. A granulometria variou de 1,6 a 5,1 mm, a temperatura de 80 a 180 °C e a descarga de ar quente de 60 a 210 kg/h. A bandeja de secagem possuía seção quadrada de 300 mm e altura do leito de 100 mm. O registro de temperaturas e pressões ao longo do experimento, possibilitou a obtenção da taxa de secagem e do adimensional N_{tg} que relaciona a taxa de secagem durante o processo com a máxima taxa de secagem obtida nas condições de saturação adiabática. Uma equação geral para a taxa de secagem foi gerada válida dentro das faixas de temperatura, descarga de ar e granulometria da sílica do experimento.

As características da sílica ao longo do leito permaneceram homogêneas corroborando a hipótese de curvas de secagem semelhantes em qualquer seção do leito. A sílica sofreu intenso processo de fragmentação, numa relação direta à taxa de secagem. A diminuição da área superficial e o aumento do volume dos poros em relação à variação da taxa de secagem foram pequenos. A taxa de secagem variou pouco com o tamanho da partícula, mas variou significativamente com a temperatura e a descarga de ar. Os coeficientes de variação de granulometria, descarga de ar e temperatura da equação geral da taxa de secagem obtidos foram: -0,116, 1,76 e 1,229.

Palavras chaves: sílica gel; secagem em leito fixo; estudo experimental.

ABSTRACT

PIERRI, E.A.F. *Fixed bed drying of silica gel*. São Carlos, 1998 . 171p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Through drying of silica gel of irregular shape and size was studied under adiabatic conditions. The granulometry was varied from 1.6 to 5.1 mm, the temperature was varied from 80 to 180 °C and de mass flow rate from 60 to 210 kg/h. The drying tray section was squared with 300 mm width and bed height of 100 mm. Temperature and pressure records collected during the tests allowed to get the drying rate and the dimensionless factor N_{tg} , that relates the drying rate along the drying process with the maximum drying rate on adiabatic conditions. A general drying rate equation was established strong for the experiment temperature, mass flow rate and granulometry ranges.

Silica characteristics along the bed keep homogeneous, agreeing with similar drying curves hypothesis for the bed. The silica gel suffered huge fragmentation process, in direct relation with drying rate. The action of the drying rate on the superficial area and on the pore volume was very small. The first had a slightly diminished curve, in opposite to the second. Drying rate had small variation with the particle size, but it varied significantly with temperature and mass flow rate. Particle size, temperature and mass flow rate variation coefficients for the general drying rate equation were: -0,116 , 1076 and 1,229.

Keywords: silica gel; fixed bed drying; experimental study

1- INTRODUÇÃO

A sílica gel é obtida da reação de silicato de sódio com ácido sulfúrico sob condições apropriadas. Em um primeiro momento, ocorre a formação do hidrossol, que consiste na dispersão de partículas coloidais muito pequenas em água. Em seguida, essas partículas começam a crescer e a interagir transformando o hidrossol em uma massa gelatinosa conhecida como hidrogel. O hidrogel, constituído de 33 % em peso de sílica (SiO_2) fortemente hidratada, não é uma matriz contínua como, por exemplo, o cristal de sílica, mas consiste na aglomeração de partículas na faixa de tamanho de angstroms formando uma estrutura tipo esponja. Os espaços entre essas micropartículas atuam como verdadeiros poros.

Diversos parâmetros influenciam na formação da sílica gel:

- na fase química: temperatura de reação, concentração das matérias-primas e tempo de gelificação;
- na fase física: método, temperatura e tempo das etapas de lavagem, secagem e moagem.

Através de controle cuidadoso em todas as etapas do processo de fabricação, pode-se gerar sílica gel dentro de uma grande faixa de parâmetros tais como:

- área de superfície: 240 a 850 m^2/g ;
- volume dos poros: 0,4 a 2,0 cc/g ;
- tamanho dos poros: 20 a 140 Å ;
- tamanho das partículas: 2 μm a 8 μm .

A sílica gel obtida pelo processo descrito acima possui algumas características que a tornam um material de grande uso industrial: ela é inerte, com mais de 99,5 % de dióxido de silício, SiO_2 , não sendo atacada ou corroída e não reagindo com a maioria dos outros materiais; mantém suas características mesmo quando saturada; é altamente higroscópica, e pode ser regenerada.

Dentre as aplicações da sílica gel temos: dessecante (remoção de umidade), agente fosqueante de tintas e vernizes, agente antibloqueante em filmes plásticos, agente opacificante e espessante de dentífricos e agente de microfiltração de cervejas e óleos.

Dependendo do tipo de sílica gel que se quer produzir, por exemplo, sílica com volume de poros da ordem de 1,2 cc/g ou mais, ela precisa ser envelhecida após o processo de gelificação e lavagem. Este envelhecimento consiste no tratamento da sílica gel em meios alcalino e ácido com a finalidade de reorganizar as micropartículas do grão e conseqüentemente aumentar o volume dos poros.

A secagem da sílica gel é de grande importância devido às suas características; quais sejam, estrutura esponjosa e higroscopicidade. Vários fenômenos podem ocorrer, entre eles os fenômenos de encolhimento dos grãos e de rompimento de sua rede microestrutural microscópica, dependendo do tipo de sílica e do gradiente de secagem. Para grãos com poros pequenos, as variações na intensidade de secagem refletem principalmente na rede microestrutural: rápida secagem causa o colapso da rede microestrutural, aumentando o tamanho dos poros; este aumento não é absoluto por haver o encolhimento do grão, ainda que em pequena intensidade. Já para os grãos com poros médio e grande, as variações na intensidade de secagem refletem principalmente no encolhimento ou não dos grãos: menor taxa de secagem causa maior encolhimento dos grãos enquanto que sistemas de secagem rápida, via transporte pneumático, praticamente não alteram o tamanho dos grãos. No âmbito macroscópico, soma-se a esses efeitos a fragmentação dos grãos da sílica gel devido a tensões de capilaridade internas. Quanto maior a intensidade de secagem, maior a fragmentação.

A quantidade de água que a sílica gel acumula em sua estrutura esponjosa após o processo de lavagem / envelhecimento chega a duas vezes o seu peso, exigindo uma significativa quantidade de energia durante a secagem.

Os gradientes de tensão/ capilaridade, relacionados ao seu poder higroscópico, aumentam a quantidade de energia necessária para a secagem. Deste modo, durante a produção da sílica gel, deve haver um equilíbrio entre as várias etapas de conformação para que se atinja as características adequadas para o fim a que ela se destina.

Neste trabalho, patrocinado pela Crosfield Brasil Ltda, procuramos estudar a secagem de sílica gel tipo MPV (medium porous volume) que possui volume dos poros da ordem de 1,2 - 1,4 cc/g

e é utilizada principalmente como agente fosqueante e espessante de tintas. O intuito de estudar este tipo de sílica reside no fato de ele ser um dos mais produzidos pela fábrica e aquele que necessita de maior compreensão e aprimoramento do processo. Através dos ensaios, podemos analisar a influência dos parâmetros de secagem da sílica gel - temperatura, vazão do ar e granulometria do material - sobre as características de granulometria e volume dos poros apresentadas pelos grãos secos. Também é possível analisarmos as curvas experimentais e obtermos equações governantes das taxas de secagem.

Embora a sílica gel MPV seja normalmente secada em secador tipo rotativo, neste experimento utilizamos uma estufa de secagem por batelada, estacionária e com fluxo de ar através do material, isto é, secagem em leito fixo. Este tipo de estufa, de relativa facilidade de execução e operação, possibilita a execução de ensaios sob diversas condições o que facilita a obtenção dos objetivos propostos. Estes serão de grande valia para o aprimoramento do processo de secagem utilizado na Crosfield Brasil Ltda.

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os processos de secagem, do ponto de vista do material que esta sendo seco, podem ser classificados genericamente em: secagem por batelada ou secagem contínua. Os processos chamados secagem por batelada ocorrem quando uma quantidade discreta do material a ser seco é exposto a um fluxo contínuo de ar no qual a umidade evapora. Em processos contínuos, o material a ser seco e o gás passam continuamente através do equipamento. Ambos os processos, porém, envolvem contato contínuo entre o gás e o material sendo seco. Segundo Treybal (1980), a seguinte classificação pode ser utilizada com o propósito de se traçar teorias de secagem e métodos de projeto:

Método do processo, i.e., por batelada ou contínuo. Para secagem por batelada, o equipamento trabalha intermitente ou ciclicamente sob condições não permanentes: o secador é abastecido com material, que permanece no equipamento até secar, quando então é esvaziado e recarregado. Secadores contínuos, por outro lado, trabalham geralmente em regime permanente.

Método como o calor é suprido para a evaporação da umidade. Em secadores diretos, o calor é totalmente transferido pelo contato direto do material com o gás quente, no qual a evaporação ocorre. Nos secadores indiretos, o calor é suprido de modo independente do gás usado para remover a umidade. Como exemplo, o calor pode ser fornecido por condução de uma parede metálica em contato com o material, ou, menos freqüentemente, pela exposição do material à radiação infravermelha ou por aquecimento dielétrico.

Natureza do material a ser secado. O material pode ser um sólido rígido, como madeira ou prancha de fibra, um material flexível como tecido ou papel, um material granular como sílica gel ou cereal, uma pasta espessa, uma massa fina, ou uma solução. A forma física do material e os métodos diversos de manuseio têm indiscutível influência no tipo de secador utilizado.

2.1- Secagem por batelada com fluxo de ar através do leito

O processo de secagem por batelada com fluxo de ar através do leito aplica-se geralmente para materiais granulares ou que possam ser preparados para assim ficarem, como por exemplo: areia, carvão, cavaco de madeira, ração animal. Quando um gás (geralmente ar) passa através de leito com material granular úmido, arrasta umidade diminuindo o seu teor no leito. Considere o caso onde o leito de material sólido granular tem uma espessura apreciável em relação ao tamanho dos grãos, como exemplificado na figura 2.1. A evaporação da umidade do material e sua incorporação no fluxo do gás ocorre em uma zona relativamente estreita que se move lentamente através do leito e, a menos que o leito seja internamente aquecido, o gás deixando esta zona está saturado à temperatura de saturação adiabática, para todo propósito prático. Esta é também a temperatura da superfície do material molhado. A taxa de secagem é constante ao longo do tempo no qual a zona de secagem permanece totalmente dentro do leito.

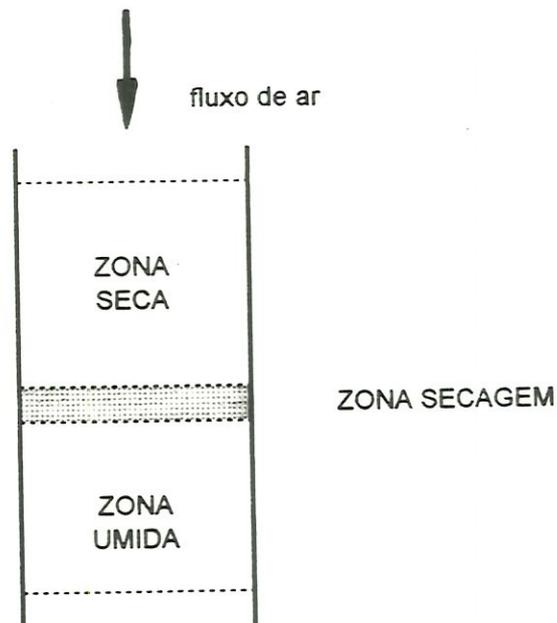


Figura 2.1- Secagem de material granular com fluxo de ar através do leito

Quando a zona de secagem alcança o fim do leito, a taxa de secagem começa a cair porque o gás não mais sai na condição de saturação. Este ponto é definido como ponto crítico de secagem, r . Em outras palavras, uma onda de dessorção passa pelo leito. Desta forma, pode-se verificar a existência de dois períodos de secagem: período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente com curvas da taxa de secagem semelhantes às da figura 2.2.

Segundo Pikon (1984) o sistema de secagem de material granular com fluxo de ar através do leito é caracterizado por ser de grande intensidade de modo que uma completa secagem do material da região de entrada do gás é observada, enquanto na região de saída do gás a secagem ainda está incipiente. A figura 2.3 representa bem este comportamento, onde t_1 , t_2 até t_k representam a curva de temperatura das camadas 1, 2 até a k -ésima do leito, em sua seção transversal. Da análise da figura vê-se que, até o teor de umidade atingir o seu ponto crítico X_r , a taxa de secagem é constante. Após X_r , a taxa de secagem diminui, com o gráfico apresentando-se curvilíneo.

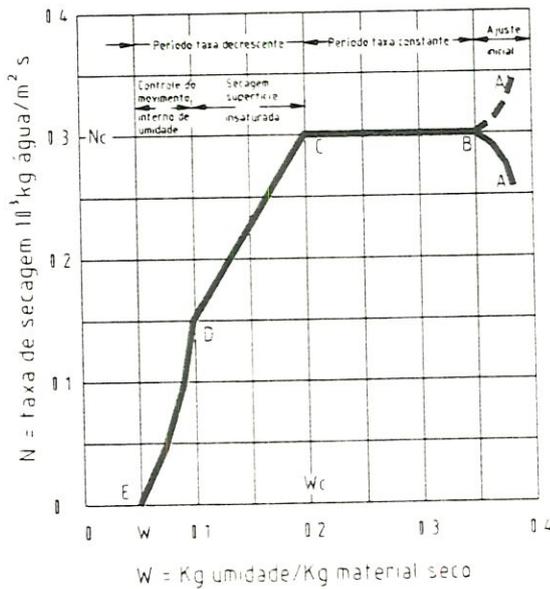


Figura 2.2- Curva típica de taxa de secagem, para condições constantes (Treybal, 1980)

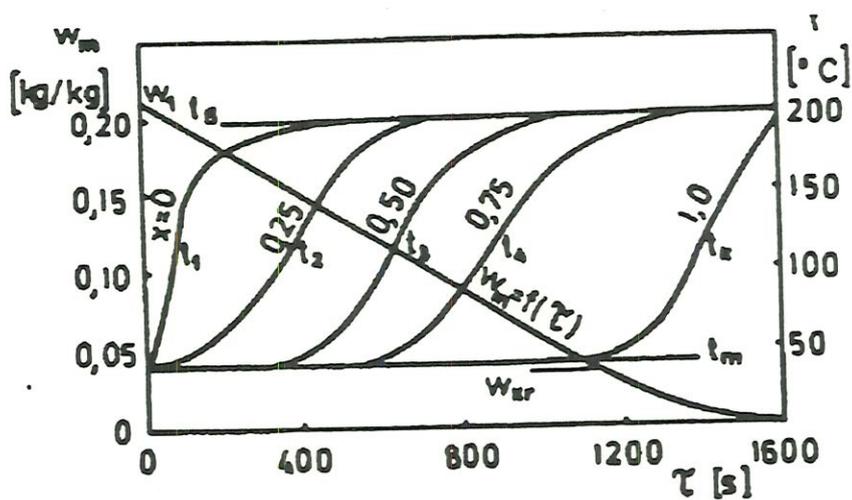


Figura 2.3- Curva de secagem - temperatura - para as diversas camadas de material do leito. (Pikon, 1984)

A taxa de secagem no período de taxa de secagem constante é determinada por parâmetros externos ao material, tais como: temperatura, velocidade do gás, pressão total no secador, e pressão parcial de vapor - Waananen *et al* (1993). Os mecanismos que controlam a secagem podem estar associados com a transferência de energia para o material ou com a transferência de massa do material. A transferência de massa envolve a difusão de vapor d'água da superfície do material através de uma camada limite existente no meio de secagem.

No período de taxa de secagem decrescente, a taxa de transferência interna de massa do material para a sua superfície controla o processo. O período de taxa de secagem decrescente pode ser observado quando o mecanismo externo de transferência de massa é controlado, assim como a pressão de vapor na superfície do material é diminuída, pela queda do teor de umidade do leito.

Ainda segundo Waananen *et al* (1993), o processo de secagem pode ser controlado pela transferência de energia ou de massa. Se a temperatura de secagem é igual à temperatura de bulbo úmido - TBU - do meio a secagem é controlada pela transferência de energia, enquanto que se a temperatura de secagem alcança a temperatura de bulbo seco - TBS - do meio, a secagem é controlada pela transferência de massa.

Baseado na identificação do mecanismo de controle da secagem, modelos apropriados podem ser desenvolvidos, muitos dos quais levando em consideração mais de um mecanismo de controle de secagem. Esses mecanismos devem levar em conta, segundo Rajan & Ibrahim (1984):

- a natureza do grão/partícula: higroscópico ou não higroscópico, poroso ou não poroso;
- o tamanho do grão e a estrutura do poro;
- a altura e a compactação do leito;
- as propriedades termofísicas do material;
- o teor instantâneo de umidade do leito.

Embora o ponto de interesse seja o teor de umidade do material, para a secagem de material granular com fluxo de ar através do leito, há uma relação unívoca entre o teor de umidade e a concentração de vapor d'água no gás de saída, relação esta dada via balanço de massa. Assim, a taxa de secagem N da umidade em uma determinada fase do processo pode ser calculada pela equação (Treybal, 1980 e Allerton *et al*, 1949):

$$N = G' (w_s - w_e) \quad (2.1)$$

com:

N = taxa de secagem;	[kg _{água} /min]
G' = descarga de ar na base seca;	[kg/min]
w_s = umidade absoluta do ar na saída da câmara de secagem;	[kg _{água} /kg _{arseco}]
w_e = umidade absoluta do ar na entrada da câmara de secagem.	[kg _{água} /kg _{arseco}]

A máxima taxa de secagem é alcançada quando o ar na saída fica completamente saturado, isto é, quando atinge a temperatura de saturação adiabática T_s^* . Então:

$$N_{max} = G' (w_{s_s^*} - w_e) \quad (2.2)$$

onde:

$w_{s_s^*}$ = umidade absoluta do ar na saída da câmara de secagem à temperatura de saturação adiabática T_s^* [kg_{água}/kg_{arseco}];

Em outra análise, a taxa de secagem pode ser calculada considerando o processo de transferência de massa, de modo que a máxima taxa de secagem é dada por:

$$N_{max} = k_y S (w_{s_s^*} - w_e) A \quad (2.3)$$

onde:

k_y = coeficiente de transferência de massa na fase gasosa; [kg/min m²]

S = superfície de interface do material por unidade de área da seção transversal do leito; [m²/m²]

A = área da seção transversal do leito. [m²]

Para uma seção diferencial do leito onde o gás sofre uma mudança na umidade dw e apresenta uma superfície interfacial do leito dS , a taxa de secagem diferencial pode ser escrita, tomando-se como base as equações (2.2) e (2.3):

$$dN = G' dw \quad (2.4)$$

$$dN = k_y dS (w_{s_s^*} - w_e) A \quad (2.5)$$

Combinando as equações (2.4) e (2.5) temos:

$$dN = G' dw = k_y dS(w_{S_s^*} - w_e)A \quad (2.6)$$

Se a representar a superfície de interface do material por unidade de volume do leito com espessura h , tem-se:

$$dS = a dh \quad (2.7)$$

e da equação (2.6) temos, rearranjando e integrando:

$$\int_{w_e}^{w_s} \frac{dw}{w_{S_s^*} - w} = \int^h \frac{k_y a dh A}{G'} \quad (2.8)$$

$$\ln \frac{w_{S_s^*} - w_e}{w_{S_s^*} - w_s} = Ntg = \frac{k_y a h A}{G'} \quad (2.9)$$

onde o termo Ntg é chamado de número de unidades de transferência do gás no leito, sendo um número adimensional. A força motora média para evaporação é então a média logarítmica de $w_{S_s^*} - w_e$ e $w_{S_s^*} - w_s$. Combinando as equações (2.1), (2.2) e (2.9) temos:

$$\frac{N}{N_{m\acute{a}x}} = \frac{w_s - w_e}{w_{S_s^*} - w_e} = 1 - \frac{w_{S_s^*} - w_s}{w_{S_s^*} - w_e} = 1 - e^{(-Ntg)} = 1 - e^{(-k_y a h A / G')} \quad (2.10)$$

A equação (2.10) fornece a taxa de secagem N se tivermos valores de k_y e a ou Ntg . Para o período de taxa de secagem constante, Allerton *et al* (1949) obtiveram uma equação genérica para Ntg considerando grãos pequenos não porosos de diâmetro d_g entre 0,074 e 2,03 mm, e altura do leito maior que 11mm, como abaixo:

$$Ntg = \frac{0,273}{d_g^{0,35}} \frac{(d_g G')^{0,215}}{\mu} (w\rho_L h)^{0,64} \quad (2.11)$$

onde :

ρ_L = densidade aparente do leito; [kg/m³]

μ = viscosidade do ar. [Pa.s]

Marshall & Hougen (1942), por sua vez, obtiveram valores de k_y para grãos de 3,2 a 20 mm e altura do leito variando entre 10 e 64 mm.

$$k_y = \frac{j_D G'}{Sc^{2/3}} \quad (2.12)$$

onde:

j_D = fator de transferência de massa de Colburn ($k_y p_{gf} Sc^{2/3} / G$), Allerton (1949);

Sc = número de Schmidt ($\mu / \rho D_g$);

p_{gf} = pressão parcial logarítmica média do ar no leito; [Pa]

D_g = difusividade do gás. [m²/s]

Para o período de taxa de secagem decrescente, Rajan & Ibrahim (1984) chegaram a uma equação generalizada para Nt_g para carvão ativado e sílica gel entre outros materiais dentro da faixa de $Re(\text{partícula})$ de 30 a 300, com o diâmetro dos grãos variando de 0.89 a 5.35 mm:

$$Nt_g = (11.25 - 28.12(X_0 \rho_r))(d_g/h)^{-0.544} (X)^\delta \quad (2.13)$$

onde:

X = teor de umidade do leito [kg_{água} / kg_{sílica}]

δ = constante.

Um equacionamento específico do processo de secagem depende basicamente dos três fatores mencionados previamente: processo de secagem, método como o calor é suprido e a natureza do material a ser secado. Para o processo de secagem com ar através do leito, a natureza do material a ser secado define basicamente os mecanismos que regem o fenômeno.

Embora não seja o objetivo deste trabalho, a descrição do fenômeno de secagem da sílica gel a nível microscópico é importante para que se possa compreender os mecanismos envolvidos durante a secagem. A modelagem matemática do processo de secagem é bastante complexa por ser a sílica um material amorfo, poroso, higroscópico e que sofre fragmentação e encolhimento durante a secagem.

De modo simplificado, o processo de secagem para o grão de sílica exposto ao fluxo de ar quente pode ser modelado conforme descrição abaixo e esquema mostrado na figura 2.4:

- na interface ar-sílica gel forma-se uma camada limite onde ocorre o processo de transferência de calor e massa;

- calor é transferido na camada limite por convecção, propagando-se para seu interior através de condução pelo esqueleto sólido. A maior parte deste calor, porém, está ligado ao processo de vaporização da água;
- a água vaporizada na superfície é removida por difusão de superfície e convecção mássica ao fluxo gasoso;
- a vaporização da água na camada limite faz com que surja um gradiente de concentração de umidade entre a camada limite e o interior do grão. Tensões de capilaridade surgem ocorrendo a difusão de água de dentro do grão para a sua superfície;
- dependendo da estrutura do grão, durante o processo de migração da água, as altas tensões de capilaridade envolvidas na água refletem na estrutura sólida causando o seu colapso (Scherer *et al*, 1996). Davis et al (1992 a/b) verificaram pressão de capilar de até 140 atmosferas em sílica gel com diâmetro médio dos poros na faixa de 10 μm ;
- alguns grãos, porém, não sofrem colapso, mas podem ter sua rede microestrutural rompida, aumentando o volume dos poros. De modo inverso, com a remoção da água do grão, sua rede microestrutural se rearranja, diminuindo o volume do poro. O predomínio de um efeito sobre o outro depende do diâmetro do poro no início do processo de secagem e da taxa de secagem.

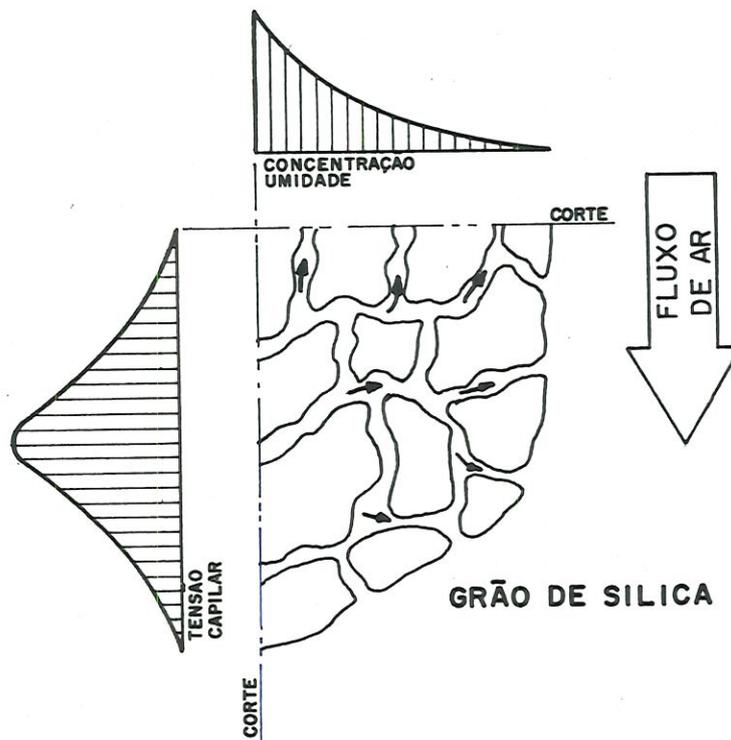


Figura 2.4- Esquema da migração de água no grão da sílica e representação imaginária da tensão de capilar

2.2- Revisão bibliográfica

A secagem de material poroso pode ser analisada segundo o conceito de transferência de calor e massa em meio poroso, havendo vasta literatura sobre este assunto. Porém, em se tratando de sílica gel, e mais propriamente em secagem em leito compactado com fluxo de ar através da sílica, há poucos trabalhos desenvolvidos no meio científico.

Um dos primeiros trabalhos publicados sobre secagem por circulação através do leito foi o de Marshall & Hougen (1942). Neste trabalho, aspectos básicos do sistema de secagem por circulação de ar através do leito foram analisados, e comparados com o sistema com fluxo de ar sobre bandeja. Os parâmetros básicos dos ensaios estão listados na tabela 2.1. A maior vantagem do primeiro sistema está no menor tempo de secagem requerido. Diversos materiais foram estudados: amido, carbonato de cálcio, dióxido de titânio, óxido de zinco, asbestos, sílica gel, lã e carvão entre outros. Foram analisados: variação do teor de umidade com o tempo e variação da taxa de secagem com o teor de umidade. Através do estudo da variação da taxa de secagem com a vazão mássica do ar para o período de taxa de secagem constante, os autores chegaram à equação:

$$(dW/dt)_c = a' G'^{0,81} w \quad (2.14)$$

onde:

$(dW/dt)_c$ = variação do teor de umidade no período de taxa de secagem constante [kg/min]

a' = constante = 97 para sílica gel;

G' = descarga base seca; [kg/min]

w = umidade absoluta do ar. [kg_{água}/kg_{seco}]

Algumas considerações sobre o trabalho de Marshall & Hougen (1942): a remoção da bandeja com tela para pesagem da umidade remanescente durante o processo de secagem gera perturbações no processo e mascara resultados como pode ser visto na seção 3.3- Evolução do Processo Experimental. Não há nenhuma consideração no trabalho sobre a uniformidade de secagem dos materiais, que pode ter apresentado razoável oscilação pela própria configuração do equipamento, além de fatores intrínsecos dos materiais, conforme apresentado na seção 3.4.

Allerton *et al* (1949) estudaram a secagem de esferas de vidro e quartzo moído nas condições listada na tabela 2.1. Os dois períodos de secagem - taxa de secagem constante e taxa de secagem decrescente - foram evidenciados assim como um início do processo de secagem com

fluxo de água não vaporizada devido à alta umidade inicial do leito. Foi postulado que no período de taxa de secagem constante, o ar deixa o leito à temperatura de saturação adiabática, uma vez que a câmara de secagem é isolada termicamente; à medida que se processa a secagem, a zona de vaporização recua, tendo sido encontrados valores de 3 a 6,5 mm para esta zona. Uma teoria de secagem foi desenvolvida relacionando taxa de secagem e eficiência de vaporização através de uma equação semelhante a eq. (2.10).

Na obtenção da equação, os autores admitiram: variação de pressão no leito desprezível, fator de transferência de massa, j_D , e número de Schmidt, SC , constantes, devido a Reynolds, Re , e diâmetro dos grãos, d_g , e as condições do meio poroso serem praticamente constantes para os ensaios.

Assim como no trabalho de Marshall & Hougen (1942), Allerton *et al* (1949) removeram a bandeja do experimento para pesagem. Também não foi verificada aqui a condição do fluxo de ar no leito, tendo a geometria da câmara de secagem fortes características de não uniformidade.

Rajan e Ibrahim (1984) estudaram as características de secagem através do leito para diferentes materiais, inclusive sílica gel, utilizando um sistema de monitoramento do peso do material a ser secado tipo braço de alavanca. Os parâmetros básicos dos ensaios estão listados na tabela 2.1. Os autores perceberam uma relação entre o N_{tg} - número de unidades de transferência na fase gás - e os seguintes parâmetros: teor de umidade do leito, diâmetro dos grãos, altura do leito e a densidade aparente do leito, obtendo uma equação generalizada, eq. (2.13), com precisão de $\pm 20\%$.

Pikon (1984) em seu estudo de secagem através do leito, coletou valores de temperatura em alturas distintas do leito, elaborando a curva de secagem conforme figura 2.3 e parâmetros listados na tabela 2.1. Através da relação existente entre a variação do teor de umidade do leito e o tempo de secagem, determinou um fator de velocidade de secagem. A partir deste fator, e seguindo o método de análise dimensional, determinou um número adimensional Π , característico da intensidade da secagem convectiva do material, que mostrou-se função de Re , K (número de mudança de fase), relação altura do leito/ diâmetro dos grãos, e relação densidade do leito/ densidade gás.

Balköse *et al* (1990) estudaram os efeitos do tipo e tamanho da sílica, da altura do leito e do fluxo de ar na adsorção de umidade do ar no leito de sílica gel.

Pesaran & Mills (1987a) estudaram o mecanismo de difusão de vapor dentro de sílica gel em leito compactado de desumidificador de ar. Para sílica gel microporosa, difusão de superfície foi o mecanismo dominante de transporte de vapor, enquanto que para sílica gel macroporosa tanto a difusão de superfície como a difusão Knudsen mostraram-se importantes. Partindo da análise de transporte de vapor dentro da partícula, um modelo foi proposto para a transferência transiente simultânea de calor e massa em um leito compactado de grãos de sílica gel, que leva em conta, para a difusão de vapor dentro dos grãos, tanto a difusão de superfície quanto a Knudsen. Em seu segundo trabalho (1987b) ensaios de adsorção e dessorção em regime transiente, foram feitos para sílica de densidade regular (porosidade de 11 %) e de densidade intermediária (porosidade de 68 %), com os parâmetros básicos reunidos na tabela 2.1. Os parâmetros coletados foram comparados às predições feitas pelos modelos de controle do lado sólido e do pseudo controle do lado gás, tendo o primeiro modelo mais se aproximado aos dados coletados. Histerese dinâmica entre adsorção e dessorção foi bem aparente para a sílica microporosa, julgando-se devida ao coeficiente de difusão efetivo do lado sólido, que diminui com o aumento do teor de umidade, e, em menor escala, à histerese intrínseca da isoterma de adsorção. O Anexo 3 apresenta um resumo teórico sobre difusão em meio poroso, contido no trabalho de Pesaran e Mills (1987a), muito útil para o entendimento dos mecanismos de difusão.

San & Jiang (1994) investigaram a resposta transiente de um sistema de leito compactado de desumidificação de sílica gel durante operação normal. Baseando-se no trabalho de Pesaran & Mills (1987 a/b), analisaram a transferência de calor e massa usando o método de controle do lado sólido com consideração do efeito de fricção do fluido. A magnitude do efeito de fricção do fluido é governado pelo número de Reynolds e por um fator de tamanho não adimensional. Para leito de grande espessura ou alta velocidade de ar, o efeito de fricção do fluido torna-se significativo. As características básicas dos ensaios estão compiladas na tabela 2.1.

Langrish *et al* (1991) utilizaram o conceito empírico de “curva característica de secagem” para estudar a cinética de secagem de grãos com ar através do leito. O conceito desta curva postula que um dado material tem uma curva de taxa de secagem normalizada que representa o processo. Ela é considerada independente das condições externas de secagem, tais como: temperatura, umidade e velocidade do ar. Combinando a curva característica de secagem com as equações de balanço de massa, Langrish *et al* obtiveram um conjunto de equações diferenciais para parâmetros adimensionais de umidade do leito e do ar em função da distância relativa através do leito e do tempo relativo de secagem, ambos também adimensionais. Este conceito não leva em

conta, na sua modelagem, o mecanismo como o vapor no leito é movimentado e/ou retido, sendo portanto mais abrangente e geral. A tabela 2.1 reúne os parâmetros básicos dos ensaios.

Tabela 2.1- Características experimentais dos trabalhos analisados

AUTOR	MATERIAL ANALISADO	GRANUL DIÂM. (mm)	ÁREA LEITO (cm ²)	ALTURA LEITO (cm)	FLUXO AR (kg/dm ² .h)	TEMP. (°C)	VOLATIL ENVOLVIDO
Marshall & Hougén (1942)	diversos incluindo sílica gel	diversos	77,4	2,5	Pt = 2,5 mm	71	água
Allerton <i>et al</i> (1949)	esferas vidro e quartzo moído	0,11 - 2,11	89,5	1,1 - 2,8	8,94 - 45,92	32	água
Rajan & Ibrahim (1984)	silica gel, carvão e outros	0,89 - 5,55	N.D.	N.D.	Re = 30 - 300	50 - 100	água
Pikón (1984)	N.D.	N.D.	N.D.	10 - 15 - 20	0,2 - 1,0 m/s	120 - 200	água
Pesaran & Mills (1987a)	silica gel	0,66 - 5,20	132	3 - 7,8	0,18 - 0,67 m/s	23	água
San & Jiang (1994)	silica gel	5	19,7	9 - 15 - 24	133	65 - 85	água
Langrish <i>et al</i> (1991)	silica gel e purolita	1,14 e 0,6	N.D.	0,35 e 0,2	3,5 - 7 m/s	60 - 150	água

N.D. não disponível

Além destes trabalhos, existem outros relacionados não diretamente com a secagem de sílica gel em leito fixo com fluxo de ar através do leito, mas que contribuem para ampliar a fundamentação teórica nesta área. Waananen *et al* (1993), em seu trabalho de revisão, compilaram os diversos modelos matemáticos desenvolvidos identificando características principais que descrevem os processos de secagem em materiais porosos como; mecanismos de controle da secagem, mecanismos internos do movimento de umidade, e métodos para determinação dos coeficientes, da solução e da validação dos modelos. Uma descrição básica dos mecanismos que controlam a secagem de materiais foi apresentada assim como a importância que ambos os mecanismos interno e externo de controle da transferência de massa têm entre si.

Soininen (1987) estudou a secagem de tecido poroso, mais precisamente papel, passando ar através dos poros. O equilíbrio termodinâmico entre o material e o ar de secagem foi admitido constante por ser a área superficial interna do material muito grande comparada a sua seção. Em sua modelagem, há uma camada limite entre o ar e o material úmido que torna contínuas as mudanças de temperatura e pressão do vapor do ar. Esta modelagem foi comparada com o equacionamento do balanço de massa e energia tanto para o material como para a camada limite, apresentando boa aproximação.

Polat *et al* (1987) estudaram a secagem de papel de diferentes gramaturas, exposto a uma grande faixa de temperaturas e vazões de ar. Valores instantâneos da taxa de secagem e transferência de massa foram obtidos através da medição dos parâmetros que controlam o processo.

Caimcross *et al* (1997) apresentaram um modelo de secagem para revestimentos à base de gel poroso e deformável, com relação à evolução do poro e transporte do solvente. Durante a secagem, quando o meio poroso torna-se parcialmente saturado, a tensão de capilar no líquido causa uma deformação compressível no esqueleto sólido e uma conseqüente redução na espessura e tamanho do poro do revestimento. A evolução deste processo é explicada por uma teoria relacionando a grande deformação do esqueleto sólido com a pressão de capilaridade no líquido intersticial. Esta teoria prevê um efeito de recuperação elástica do esqueleto no último estágio da secagem, com a diminuição da pressão de capilaridade.

Simpkins *et al* (1989) estudaram o comportamento da secagem de sílica gel coloidal, onde várias técnicas foram examinadas para evitar a fratura da sílica. Uma modelagem do processo de secagem parecida com a de Caimcross *et al* (1997) foi descrita primeiro, porém relacionando o efeito de fratura da sílica com a ocorrência de diferentes estágios de tensões em partes distintas do material, conforme a evolução da secagem. Assim, a parte já seca do material, estando com seu esqueleto solidificado, aumenta a tensão na parte do material que está ainda em processo de secagem, ocorrendo a fratura.

Scherer *et al* (1996) desenvolveram modelo para prever o efeito de encolhimento que ocorre na secagem de sílica gel fabricada pela reação de TEOS (tetraetóxido de silício), água, etanol, ácido clorídrico e hidróxido de amônio. O encolhimento é determinado pela pressão de capilaridade no líquido e é suportado pelo módulo do esqueleto da sílica, função da variação da densidade do leito. O efeito da recuperação elástica do esqueleto do leito foi estudado, verificando-se que a presença de água nos poros faz com que este efeito seja praticamente desprezível.

Trabalhos foram desenvolvidos relacionados com a evolução da estrutura do poro de sílica gel. Davis *et al* (1992 a) analisaram os efeitos do tempo e da temperatura de envelhecimento na estrutura do poro de sílica gel. Em outro trabalho, Davis *et al* (1992 b) estudaram a ação do fluido presente nos poros sobre sua estrutura. Segundo o autor, a área superficial da sílica seca é sempre menor que a da sílica gel úmida devido a vários fatores: fechamento e colapso do poro devido à tensão superficial, aumento das reações de condensação e a presença de espécies de sílica de baixo peso molecular no fluido do poro que condensam na superfície do poro durante a secagem. Um dos pontos observados é que o tipo de solvente presente nos poros afeta grandemente as características da sílica gel, obtendo-se volumes dos poros maiores com presença de etanol no lugar de água.

Deshpande *et al* (1992) observaram que grande tensão superficial na sílica gel causa maior colapso da matriz durante os estágios finais de secagem levando a uma estrutura de poros menores. Em outro trabalho, Davis *et al* (1994) estudaram os efeitos da variação do pH do solvente sobre a evolução da estrutura do poro da sílica gel durante seu envelhecimento e secagem. Maior pH de envelhecimento levou à obtenção de sílica gel de menor área superficial e de maior volume de poros, e à um estreitamento da distribuição do tamanho do poro.

3- SISTEMA EXPERIMENTAL

Para o estudo de secagem da sílica gel utilizamos uma estufa de secagem por batelada com fluxo de ar através do leito, processo conhecido como secagem em leito fixo. O fluxo de ar foi definido na direção descendente, a favor da gravidade, de modo que as vazões de ar estabelecidas para ensaio pudessem ser atingidas sem que provocassem possível expansão do leito e mudança de suas características. Em um leito com fluxo de ar ascendente, tanto a expansão como a elutriação do material do leito poderiam ocorrer devido à combinação de velocidades elevadas nos vazios entre os grãos, e a baixa densidade da sílica quando seca.

Foi utilizada uma bandeja de aço inoxidável com fundo de tela para permitir a passagem do ar através do leito. Na determinação da malha da tela foram considerados efeitos de perda de carga e a abertura necessária para reter a sílica gel que encolhe e fratura em pedaços menores durante a secagem.

Este capítulo contém:

- as condições operacionais e os parâmetros de secagem;
- descrição do experimento, com as características dos equipamentos que o compõem tanto no aspecto processual como físico;
- descrição cronológica da evolução do processo experimental, com os problemas encontrados, os ajustes e modificações efetuados e a confiabilidade obtida;
- descrição do sistema de medição de vazão tipo placa de orifício utilizado, com seu dimensionamento e calibração;
- calibração dos termopares do experimento.

3.1- Estabelecimento dos parâmetros de secagem

O seguintes aspectos foram considerados na determinação dos parâmetros de secagem:

- existência de dados similares em trabalhos já publicados;
- importância do parâmetro para o desenvolvimento do trabalho, tanto no aspecto industrial como científico;
- possibilidade de se atingir os parâmetros com os recursos físicos disponíveis.

Como já visto, temperatura e vazão do ar de secagem, granulometria do grão de sílica gel e altura do leito são parâmetros que afetam a secagem da sílica gel.

A altura do leito afeta os resultados do ensaio devido à condução e inércia térmica existentes no conjunto bandeja/estufa. Foi fixada a altura de 100 milímetros que propicia tempo suficiente de secagem para que os efeitos de borda possam ser desprezados. Alguns recursos foram também utilizados para minimizar este efeito, e são discutidos na seção 3.2.

Os demais parâmetros ficaram assim definidos:

- temperatura do ar de secagem = 80 , 120 e 180 °C
- vazão do ar de secagem = 60, 110 e 210 kg/h
- granulometria da sílica gel = faixa de 1,6 - 2,6 mm e 3,7 - 5,1 mm, correspondendo, respectivamente, às malhas Tyler 14 - 8 e 6 - 4

A faixa de temperatura do ar de secagem procura registrar dados abaixo e acima da temperatura de ebulição da água, respectivamente 80 e 120 °C. A temperatura de 180 °C é da mesma magnitude da utilizada na secagem em estufas semelhantes a deste experimento, embora seja bem inferior àquela praticada na secagem rotativa que, para a sílica gel, chega a 450 °C.

A escolha de faixas não contíguas de granulometria objetivou tornar mais evidentes dois pontos de análise:

- o efeito da secagem sobre a estrutura dos grãos, pois sabe-se que em condições normais de secagem os esforços de dessorção da sílica geram o rompimento do grão e a conseqüente formação de outros menores, fato confirmado nos ensaios;
- a influência da granulometria na taxa de secagem.

As vazões de ar utilizadas nos ensaios correspondem a uma velocidade sobre a superfície da sílica de 0,16 , 0,30 e 0,57m/s. Considerando fração de vazios entre os grãos do leito variando de 0,3 a 0,4 (Howard,1989), temos velocidades intersticiais compreendidas entre 0,4 e 1,9 m/s. Em escala industrial, mais precisamente em um sistema de umidificação de sílica com mistura ar/vapor, são fixados valores de velocidade do ar na faixa de 0,2 - 0,4 m/s com pequena elutriação de grão de pequeno diâmetro. Isto corrobora a posição de que, insuflando ar no sentido vertical descendente, é evitada a expansão do leito e a elutriação do material.

3.2- Descrição do Experimento

Para o experimento de secagem da sílica gel foi montado um conjunto composto por ventilador centrífugo, estufa em aço carbono e resistências de aquecimento. As figuras 3.2.1 e 3.2.2 apresentam vista geral e esquemática do aparato experimental .



Figura 3.2.1- Vista geral do aparato experimental, com o sistema de coleta de dados.

O conjunto foi isolado com manta de fibra de vidro em toda a sua extensão, exceto o duto de saída, que não foi isolado, por não afetar as leituras dos termopares

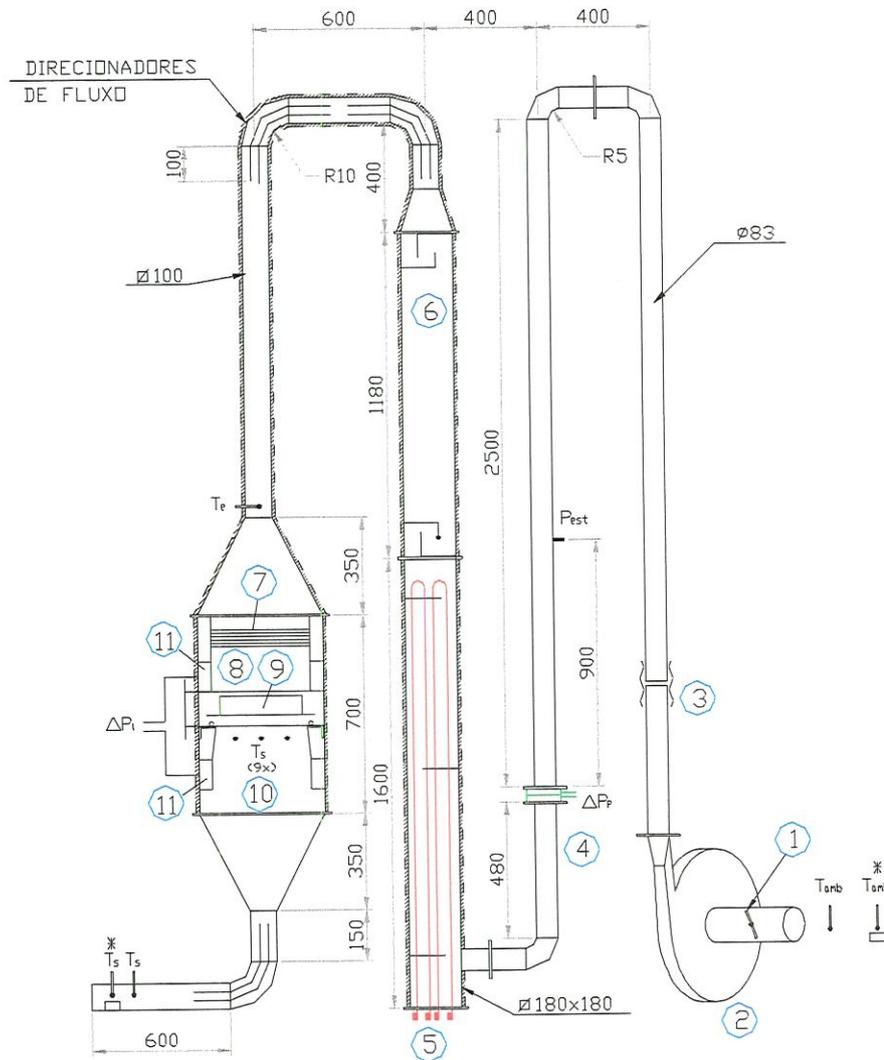
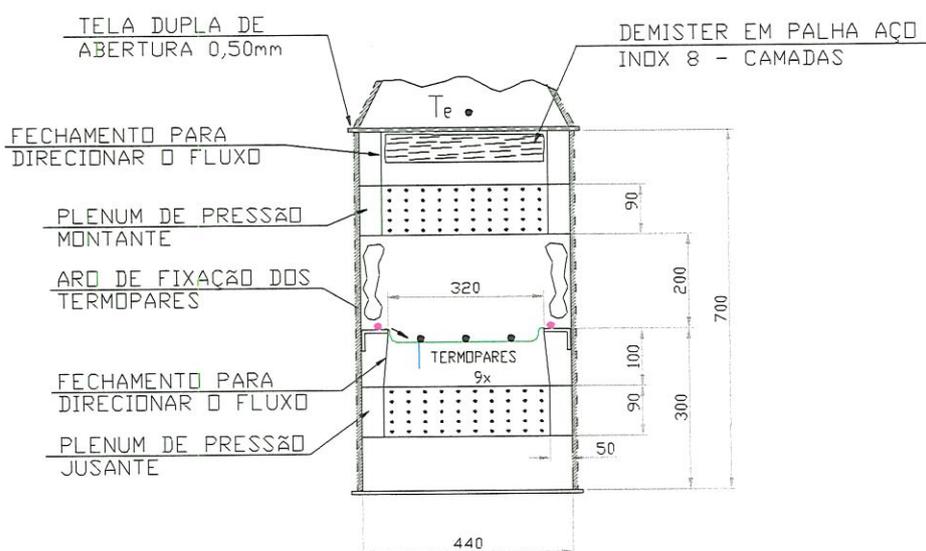


Figura 3.2.2- Esquema do aparato experimental 1). Válvula de controle da vazão; 2). Ventilador; 3). Junta amortecedora de vibração; 4). Placa de orifício; 5). Conjunto de aquecimento; 6). Plenum de estabilização da temperatura; 7). Estratificador de fluxo; 8). Câmara de montante; 9). Bandeja; 10). Câmara de jusante, com nove termopares; 11). Anel de tomada de pressão (montante e jusante).

Câmara de secagem

A câmara de secagem é composta por um duto retangular com duas câmaras contíguas que são separadas quando da introdução da bandeja com sílica. Na região onde a bandeja é introduzida há

um quadro de cantoneira que funciona como berço. A vedação entre as câmaras é garantida por uma borracha macia de silicone de diâmetro 3/8". Em ambas as câmaras foi construído um anel circundando internamente a estufa, com 24 furos de 5 mm de diâmetro na face interna, para tomada de pressão. Fechamentos internos unem-se a esses anéis com o objetivo de direcionar o fluxo de ar, tornando-o mais homogêneo possível, e sem singularidades relevantes que possam causar vórtices e turbulências no ar sobre a bandeja de secagem. Com este mesmo propósito, foram utilizadas almofadas nos espaços entre a estufa e a bandeja. Essas precauções foram tomadas a despeito da baixa velocidade na câmara. O desenho 3.2.3 mostra detalhe da câmara de secagem.



CONFIGURAÇÃO ATUAL

Figura 3.2.3- Detalhe da câmara de secagem na sua configuração atual. Nove termopares na saída, com modificação na câmara a montante - diminuição da câmara para direcionar o fluxo e implantação de estratificador de fluxo. Almofadas laterais à bandeja também foram utilizadas para direcionar o fluxo.

No flange que conecta o duto de entrada de ar - após a expansão piramidal - há uma dupla camada de tela em aço inoxidável de abertura 0,50 mm com o intuito de amortecer os eventuais vórtices e homogeneizar a velocidade do ar. Um estratificador de fluxo logo após a tela propicia uma equalização do fluxo de ar adequada à realização do experimento, figura 3.2.4. Este estratificador é composto pela justaposição de um tecido duplo, trançado, em fios de aço inoxidável. Foram utilizadas oito camadas deste tecido dispostas de modo cruzado para não criar caminho preferencial ao fluxo de ar.

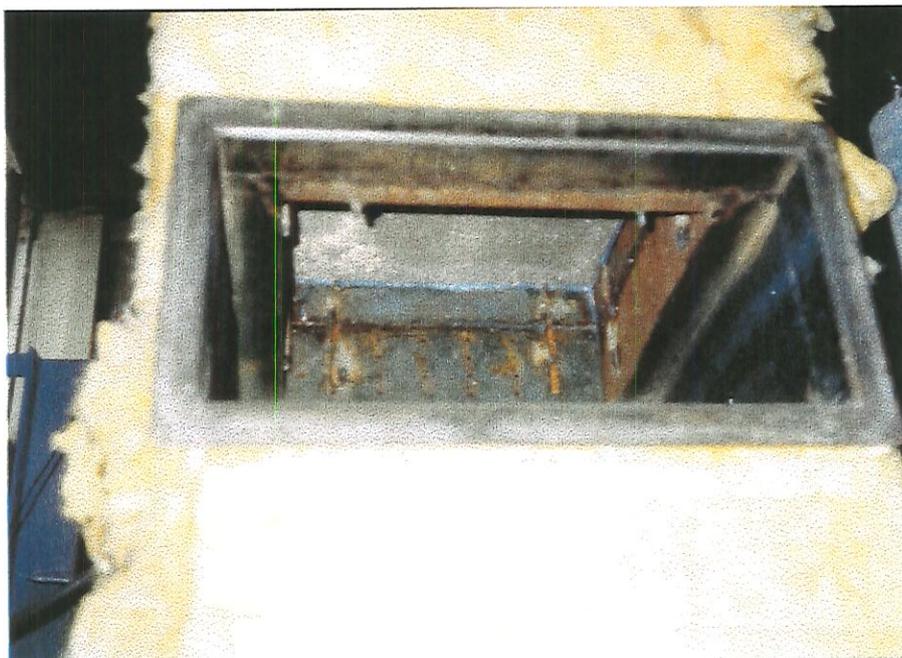


Figura 3.2.4- Vista interna da estufa. Detalhe do plenum de pressão a montante do conjunto homogeneizador do fluxo de ar

Toda a parte interior da câmara de secagem foi calafetada com borracha silicone, para que não houvesse caminhos preferenciais para o ar durante os ensaios.

No duto de entrada, 100 mm antes da expansão piramidal, está situado o termopar que mede a temperatura de entrada do fluxo de ar, T_e . Abaixo da bandeja, há nove termopares medindo a temperatura do ar após o contato com a sílica, isto é, a temperatura de saída, T_s . Estes termopares estão presos a varetas de aço inoxidável adequadamente dobradas e encaixadas entre a borracha de silicone de vedação, de modo a deixar uma folga de 15 a 20 mm entre a tela da bandeja e a extremidade do termopar - figura 3.2.5.

Bandeja

A bandeja foi construída em aço inoxidável nas dimensões: 300 x 300 mm e altura 120 mm. Na sua parte inferior há uma aba que serve para fixar a tela e apoiar a bandeja sobre o berço na câmara de secagem. O material da tela utilizada é aço inoxidável AISI 304 malha Tyler 35 (0,50 mm de abertura). Um quadro sob a aba da bandeja, possuindo uma armação de quatro pequenas barras transversais perpendiculares duas a duas, possibilita que a tela fique plana, mesmo com o

peso da sílica molhada. A figura 3.2.6.A- mostra a bandeja atual e a figura 3.2.6.B- mostra a configuração anterior, sem as barras transversais. A bandeja é revestida externamente com placas de asbestos de espessura 3/8" para minimizar os efeitos de condução de calor pelas suas laterais durante o experimento. A dimensão da bandeja foi projetada para que seja um protótipo de uma futura estufa em escala industrial.



Figura 3.2.5- Posicionamento dos termopares na região inferior da estufa. Vista dos aros (3x) de suportação dos termopares, com os nove termopares isolados com fita de teflon.

Resistências.

O ar quente é fornecido por um sistema de aquecimento constituído por nove resistências cilíndricas blindadas de 2260 W / 220 V cada, dispostas numa caixa vertical conforme esquema mostrado na figura 3.2.2. O controle de temperatura é efetuado por um controlador marca RobertShaw modelo Indic 50 de escala até 300 °C e precisão +/- 2 °C.

Sobre a caixa das resistências há uma câmara equalizadora com sistema de labirinto em suas extremidades, que proporciona uma homogeneização da temperatura de entrada na câmara de secagem, T_e . Nos ensaios, a variação da temperatura de entrada foi da ordem de +/- 0,6 °C, considerada muito boa para o experimento.

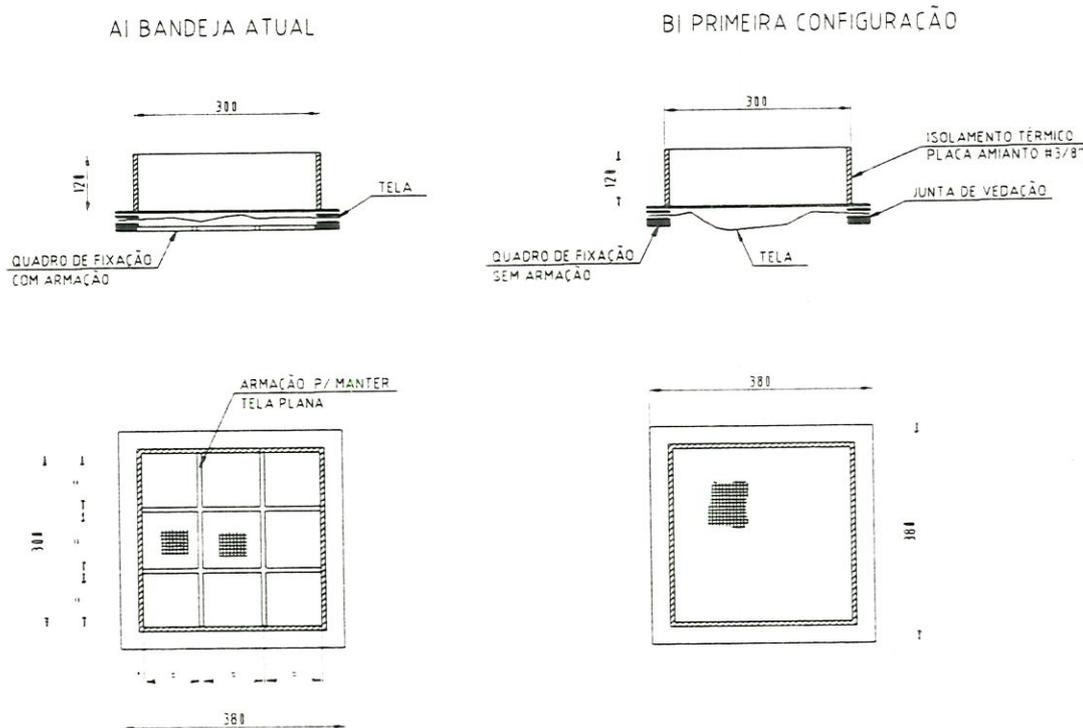


Figura 3.2.6- Bandeja de secagem. A) Configuração atual B) Configuração anterior

Placa de orifício

Uma placa de orifício é utilizada para medir a vazão do ar de secagem. Ela está montada na parte fria do experimento, entre o ventilador e as resistências. Seu dimensionamento e calibração estão descritos na seção 3.5. Sua montagem seguiu recomendações de Delmeé (1983), possuindo trechos retos a montante e jusante de $22D$ e $6D$ do diâmetro da tubulação.

Na região do duto antes da placa está instalado um ponto de tomada de pressão estática através de manômetro de coluna em U.

A figura 3.2.7 mostra a placa de orifício, as mangueiras de transmissão de pressão, o sensor de pressão da placa, a entrada dos termopares na parte inferior da câmara de secagem e o ventilador.

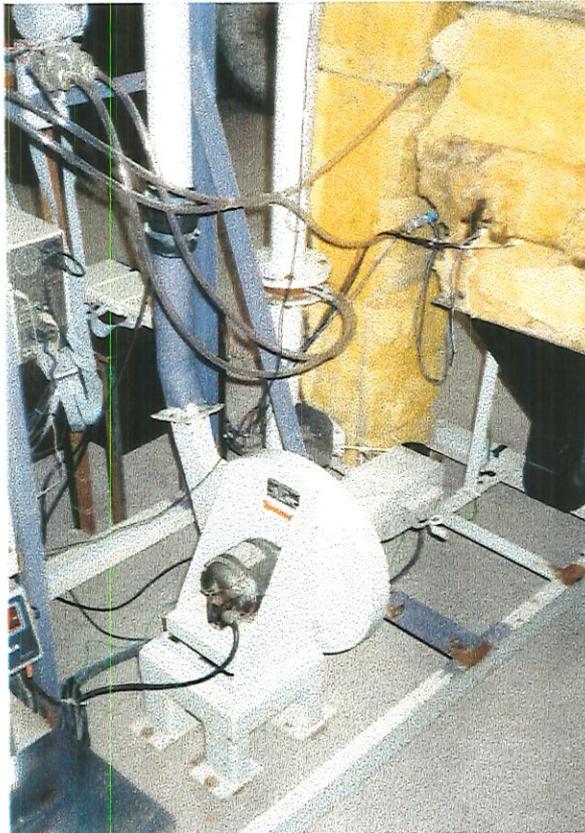


Figura 3.2.7- Detalhe do ventilador e damper de controle da vazão, placa de orifício e sensor de pressão, e da entrada os termopares na estufa.

Ventilador

Um ventilador centrífugo é responsável pelo bombeamento do ar para o experimento. Suas características são: fabricação SEI, tipo 45RC250, vazão nominal $180 \text{ m}^3/\text{h}$, DP 500 mmCa, potência do motor 1CV a 3450 rpm.

Sua montagem é independente da estrutura onde a estufa é fixada para evitar transmissão de vibrações. O controle da vazão de secagem é feito por uma válvula borboleta instalada na entrada do ventilador - figura 3.2.7.

Sistema de dutos.

Os dutos do experimento são em aço carbono, possuindo duas medidas básicas:

- . antes das resistências = tubo redondo $\phi = 83 \text{ mm}$
- . depois das resistências = tubo quadrado $\square = 100 \text{ mm}$

A região entre as resistências e a câmara de secagem é isolada termicamente.

Pesagem da Bandeja

Para a pesagem da bandeja carregada com a sílica gel úmida ou seca é utilizada uma balança eletrônica marca Filizola modelo E15, tipo 2C com capacidade máxima de 15 kg e resolução de 10 g.

Instrumentos de Medição

Termopares: foram instalados quatorze termopares no experimento, mostrados na figura 3.2.2 e assim instalados no aparato experimental:

- dois termopares localizados na entrada do conjunto medindo TBS e TBU do ar ambiente, T_{amb} e T_{amb}^* ;
- um termopar localizado antes do tronco piramidal de entrada da câmara de secagem medindo a temperatura do fluxo de ar quente, T_e , como descrito no item câmara de secagem;
- nove termopares localizados dentro da câmara de secagem, porém, à jusante da bandeja medindo a temperatura do ar após passar pela sílica gel, T_s ;
- dois termopares localizados na saída do duto de exaustão medindo TBS e TBU do ar úmido, T_s e T_s^* .

As figuras 3.2.8 e 3.2.9 mostram detalhes de instalação dos termopares que coletam TBS e TBU na entrada e na saída do conjunto para determinação da umidade do ar de entrada e do ar que sai da estufa carregando a umidade do leito. A determinação da TBU seguiu metodologia apresentada pelo ASHRAE Handbook of Fundamentals (1982). Os termopares foram envoltos por uma mecha que permaneceu constantemente molhada através da introdução de sua parte inferior dentro de uma cuba com água.



Figura 3.2.8- Detalhe dos termopares na entrada do ventilador para a medida da TBS e TBU

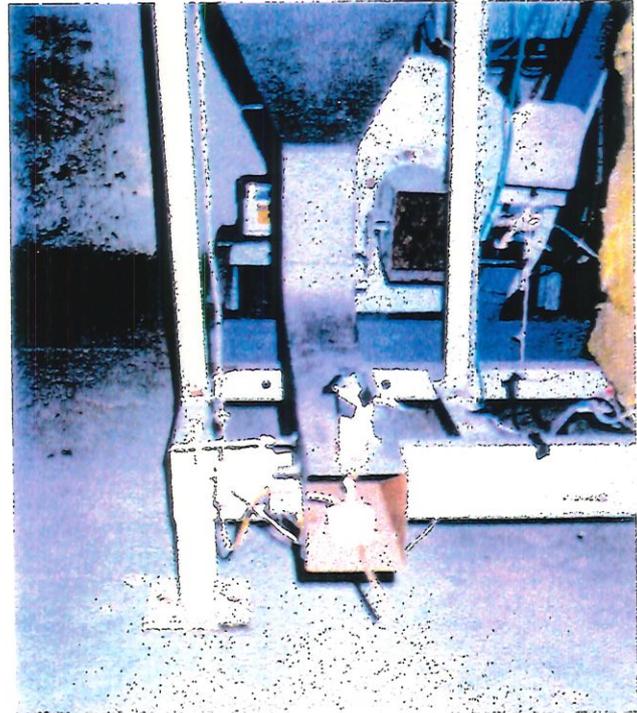


Figura 3.2.9- Detalhe da medição da TBU na saída da estufa

Para a leitura da TBU do ar de saída da estufa, o maior desafio foi manter o recipiente sempre com água, devido às altas taxas de evaporação verificadas. Várias alternativas foram testadas - descritas na seção 3.3- Evolução do processo experimental. A utilização de um sistema de aplicação de soro solucionou este problema .

Os termopares foram construídos e calibrados como descrito na seção 3.6. Todos foram revestidos com fita de teflon para proteção térmica e dielétrica.

Medidores de pressão: foram utilizados dois medidores capacitivos de pressão diferencial marca SMAR modelo LD301 e precisão de leitura de 0.1% do fundo de escala. Esses equipamentos possuem sinal de saída linear de 4 - 20 mA e foram ajustados para a faixa de operação de:

- . 0 - 300 mmCa - para a placa de orifício
- . 0 - 150 mmCa, - para a estufa

Na medição da pressão estática à montante da placa de orifício, *P_{est}*, foi utilizado um manômetro de coluna em U, instalado a 900 mm à montante da placa de orifício.

Sistema de aquisição de dados

Para a coleta dos dados do ensaio foi utilizado software e hardware existentes no Laboratório de Termodinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP de fabricação Strawberry Tree. A seguinte configuração foi montada: dois microcomputadores, cada um com uma placa de conversão A/D de 12 bits e 16 canais; três terminais de coletas de dados, sendo dois para temperatura -T21- e outro para multiuso - T31.

A placa T21 possui sistema próprio de compensação da junção fria para os termopares, fazendo a linearização do sinal.

O sistema de aquisição foi programado para obter e integrar todos os sinais de entrada durante um intervalo de tempo de 15 segundos. Deste modo, ruídos e flutuações de dados puderam ser minimizados.

Para cada ensaio experimental, os dados foram registrados minuto em minuto, e armazenados em arquivo texto, para posterior tratamento matemático. Os arquivos textos gerados seguiram uma identificação cronológica do dia e mês de ensaio, acrescentando uma letra no fim para separar mais de um ensaio realizado no mesmo dia. Após o tratamento matemático, a identificação dos arquivos foi modificada procurando relacionar cada ensaio a sua configuração. O Anexo 1 apresenta tabela relacionando as duas identificações.

3.3- Evolução do processo experimental

Até chegar a configuração apresentada na seção 3.2, o experimento passou por modificações e aperfeiçoamentos. Originalmente o objetivo era fazer a análise do processo de secagem tanto do lado do ar como do lado da sílica gel, para que o balanço de massa da taxa de secagem pudesse ser checado. Assim, valores de temperatura e umidade do ar eram coletados antes e depois da câmara de secagem, para serem comparados com a variação de peso do conjunto bandeja/sílica gel. Com base nos recursos disponíveis, o aparato experimental foi construído conforme mostram as figuras 3.3.1 e 3.3.3.

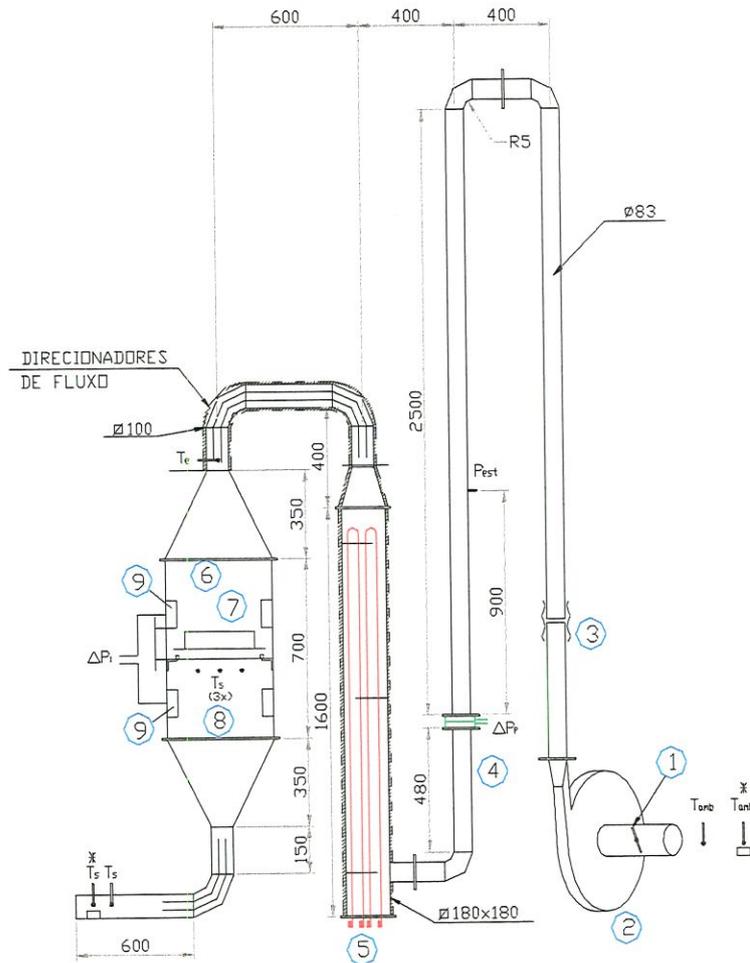
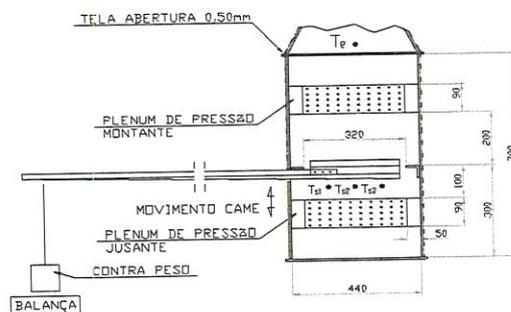


Figura 3.3.1- Esquema do aparato experimental , primeira configuração (não está mostrado o detalhe de elevação da bandeja) 1). Válvula borboleta de controle da vazão; 2). Ventilador; 3). Junta amortecedora vibração; 4). Placa de orifício; 5). Conjunto de aquecimento; 6). Câmara de montante; 7). Bandeja; 8). Câmara de jusante, com os três termopares; 9). Plenum de pressão (montante e jusante).

A câmara de secagem era constituída por um duto quadrado tendo em sua região central um berço de cantoneira para apoio da bandeja de secagem. Na parte a montante da bandeja havia uma tela dupla para homogeneizar o fluxo de ar e o plenum da pressão a montante. Na parte a jusante da bandeja havia três termopares de leitura da temperatura de saída, T_s , e o plenum de pressão a jusante.

O sistema proposto para pesar a bandeja pode ser visto nas figuras 3.3.2 e 3.3.3. Havia um quadro interno localizado logo abaixo do berço de cantoneira. Fixado neste quadro, um braço se projetava para fora da estufa. Na lateral da estufa um came movimentava verticalmente este braço. Na extremidade externa do braço havia um peso que apoiava sobre a balança de leitura,

indicando uma leitura próxima de sua capacidade máxima. Basicamente era um sistema de pesagem indireta, onde o recurso de braço de alavança, na proporção 1:5, foi utilizado devido a balança ter pequena capacidade - 3 kg - face ao peso do conjunto bandeja/silica gel úmida - aproximadamente 13 kg. Quando o came localizado na lateral externa da estufa era acionado, figura 3.3.3, ele movimentava o braço de alavança, que por sua vez elevava o quadro. Este projetando-se para cima do berço de cantoneira suspensia a bandeja. Uma diminuição de peso era verificada na balança. A vedação bandeja / berço era garantida por uma gaxeta de asbestos de seção quadrada 3/8 de polegada.



1ª CONFIGURAÇÃO

Figura 3.3.2- Detalhe da câmara de secagem. Primeira configuração. Medição intermitente do peso da bandeja com sílica.

Para se medir a TBU no ar de saída do aparato experimental foi utilizado um mecanismo que removia o termopar com a mecha do fluxo de ar e o introduzia em um recipiente com água. Após a umidificação, o termopar era novamente introduzido no fluxo.

O acionamento dos sistemas de pesagem e de movimentação do termopar era realizado por um segundo came acoplado a um micro-motoredutor. O ciclo era de 11 minutos assim divididos:

- 9,5 min, onde a bandeja permanecia apoiada no berço e o termopar no fluxo de ar;
- 1,5 min, onde a bandeja era erguida para pesagem e o termopar retirado do fluxo para ser umidecido.

Um ensaio típico está mostrado no gráfico da figura 3.3.4.

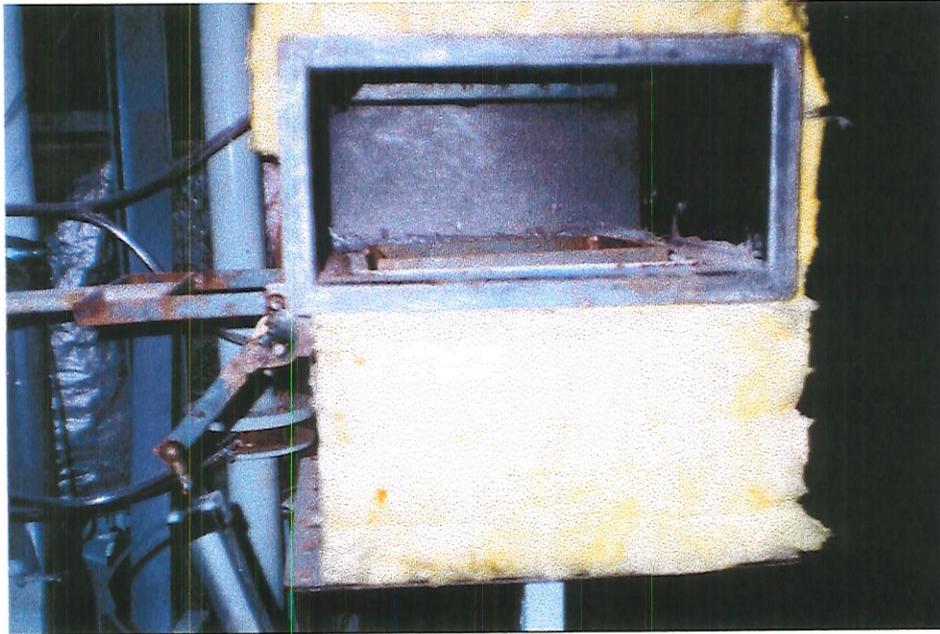


Figura 3.3.3- Primeira configuração da estufa. Detalhe do braço de alavanca , com o came e o cilindro pneumático que o movimenta. O quadro de elevação da bandeja fixado ao braço de alavanca também é mostrado, assim como a vedação em gaxeta utilizada no início.

Através da observação experimental e da análise dos ensaios preliminares verificou-se que alguns dispositivos não propiciavam a obtenção de bons resultados:

- o tempo de 1,5 minutos que a bandeja permanecia suspensa para leitura do peso (tempo este necessário devido ao intervalo de coleta dos dados) afetava grandemente as condições de secagem. O período de secagem tornava-se mais longo, indicando, conseqüentemente, menores taxas de secagem, fato comprovado comparando-se ensaios com o mecanismo de elevação da bandeja ligado e desligado, respectivamente figuras 3.3.4 e 3.3.5. Esta observação praticamente põe em cheque os resultados dos trabalhos de Marshall &Hougen (1942) e Allerton et al (1949), mesmo sendo o tempo de remoção da bandeja do fluxo gasoso em seus trabalhos menor, da ordem de 30 segundos;
- os valores de temperatura a jusante da bandeja (T_s 1,2,3,) e $TBSsaida$ e $TBUsaida$ não eram confiáveis, pois o tempo do ciclo do segundo came, dependendo das condições de secagem, não era suficiente para o equilíbrio das temperaturas;
- temperatura de entrada da estufa, que apresentava variação de $\pm 2,5$ °C causando inconsistências no processo de secagem. Isto deveu-se ao tipo de controlador de temperatura disponível.

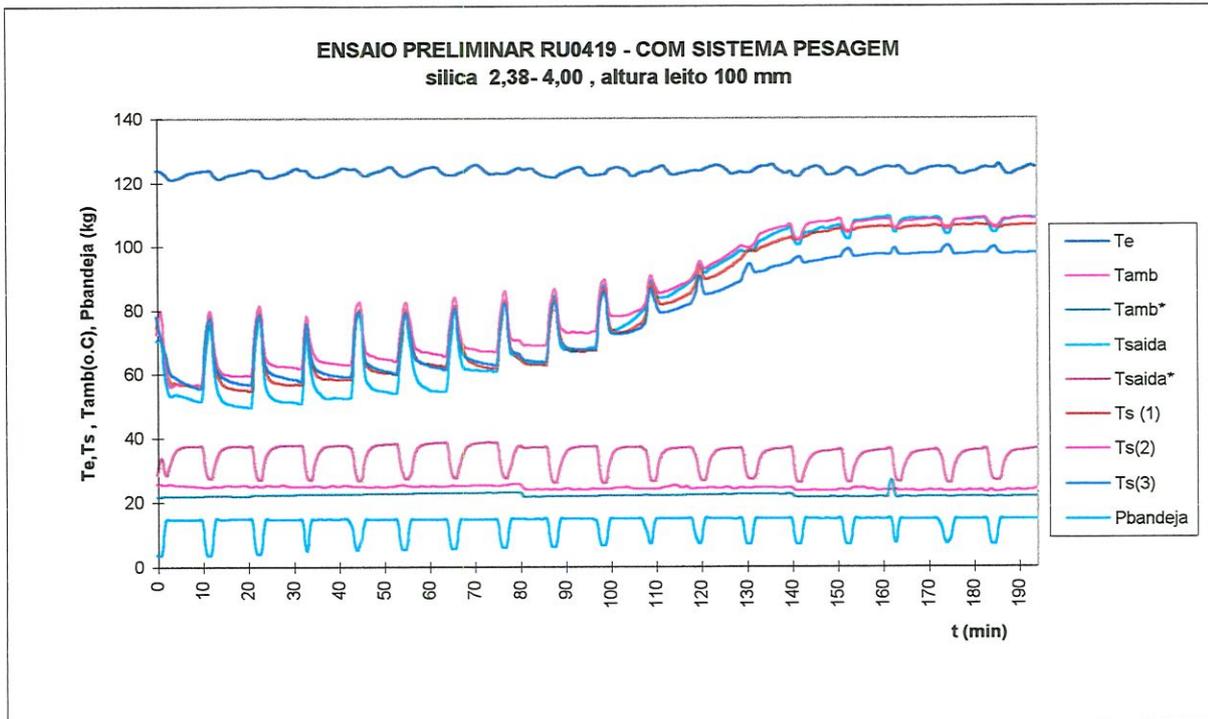


Figura 3.3.4- Ensaio preliminar de secagem com o mecanismo de elevação da bandeja acionado.
Silica 2,38 - 4,00 mm , $T_e = 122^{\circ}\text{C}$, altura do leito 100 mm.

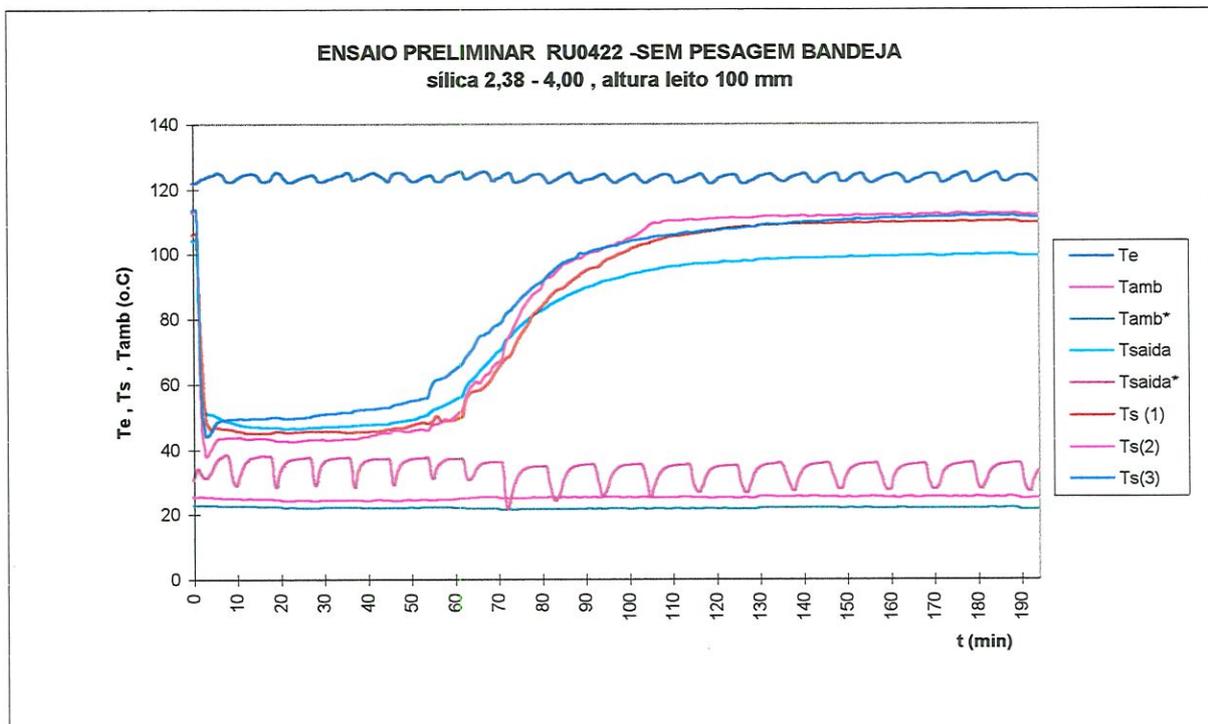


Figura 3.3.5- Ensaio preliminar de secagem com o mecanismo de elevação da bandeja desabilitado.
Silica 2,38 - 4,00 mm , $T_e = 122^{\circ}\text{C}$, altura do leito 100 mm.

- o mecanismo de elevação da bandeja causava seu deslocamento no berço de cantoneira. Com isto, a selagem de gaxeta ficava prejudicada, afetando as leituras de temperatura nos termopares de saída;

- notou-se também uma variação entre as leituras dos termopares de saída, mesmo quando a selagem bandeja - berço era boa.

Baseado nestes resultados e considerando que a verificação do processo de secagem poderia ser realizada de forma integral, isto é, coletando-se valores iniciais e finais da umidade do leito, esta primeira configuração foi abandonada, tendo o sistema sofrido algumas modificações. Foram retirados os mecanismos de elevação da bandeja e de movimentação do termopar de TBU na saída. Foi introduzido um plenum tipo pulmão logo após o sistema de aquecimento, para eliminar as oscilações da temperatura de entrada na estufa, e foram acrescentados seis termopares a jusante da bandeja, para verificar oscilações da temperatura do ar umidecido. A figura 3.3.6 apresenta esta segunda configuração.

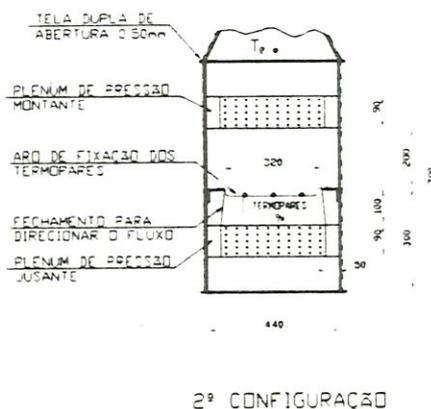


Figura 3.3.6- Detalhe da câmara de secagem. Segunda configuração. Eliminação do sistema de medição intermitente do peso da bandeja com sílica e utilização de nove termopares na saída.

Foi alcançada uma melhoria sensível nos resultados, com a temperatura de entrada apresentando agora oscilações da ordem de +/- 0.6 °C. A adoção de nove termopares abaixo da bandeja, porém, revelou que havia grandes diferenças de tempo de secagem entre as diferentes seções do leito, como pode ser visto na figura 3.3.7.

Outras melhorias, a maioria de cunho fluidodinâmico, foram sendo introduzidas no conjunto para obtermos resultados mais homogêneos, tais como:

- a bandeja original, conforme figura 3.2.6.B, possibilitava que o peso da sílica vergasse a tela e gerasse uma região central de maior altura de leito, conseqüentemente uma região mais lenta para secar. Assim, a fixação da tela foi melhorada deixando-a mais esticada e foram introduzidas no quadro inferior quatro pequenas barras transversais perpendiculares duas a duas, que permitiram a tela permanecer plana mesmo sob o peso da sílica gel, figura 3.2.6.A;
- a vedação em gaxeta foi trocada por outra mais macia e facilmente deformável com o peso da bandeja, confeccionada em mangeira de silicone;
- instalação sequencial, teste a teste de: fechamento em chapa na câmara a jusante para evitar irregularidades na saída do fluxo de ar da bandeja, fechamento semelhante na câmara a montante e retificador de fluxo;
- calafetação com silicone das frestas entre câmaras e entre as chapas;
- adoção de almofadas em tecido apropriado ao calor para preencher o vão existente entre a bandeja e as paredes da estufa, de modo a minimizar a penetração do ar nestas regiões, além de servir como guia ao fluxo. A figura 3.2.3 mostra esquematicamente esta almofada.

Os resultados melhoraram significativamente conforme mostra a figura 3.3.8. As variações então apresentadas deveram-se às próprias características do processo de escoamento em leito fixo para um material irregular como a sílica gel, acrescido do fato da sílica gel fragmentar-se durante a secagem. Problemas com a preparação da sílica são apresentados na seção 3.4. Estes problemas também contribuem para a existência de oscilações, no tempo, das curvas de temperatura dos termopares localizados abaixo da bandeja.

Antes que se pudesse obter um dispositivo confiável para a leitura da TBU na saída, foram testados outros dispositivos, a saber:

- recipiente grande para a imersão da mecha do termopar. Este recipiente, além de perturbar o fluxo de ar de modo significativo, não armazenava água suficiente quando da realização de ensaios com altas taxas de secagem;
- alimentação de água no recipiente onde a mecha do termopar era mergulhada via válvula tipo agulha. A válvula foi incapaz de fornecer um fluxo de água apropriado, com isso a mecha ficava hora seca, hora molhada em demasia.

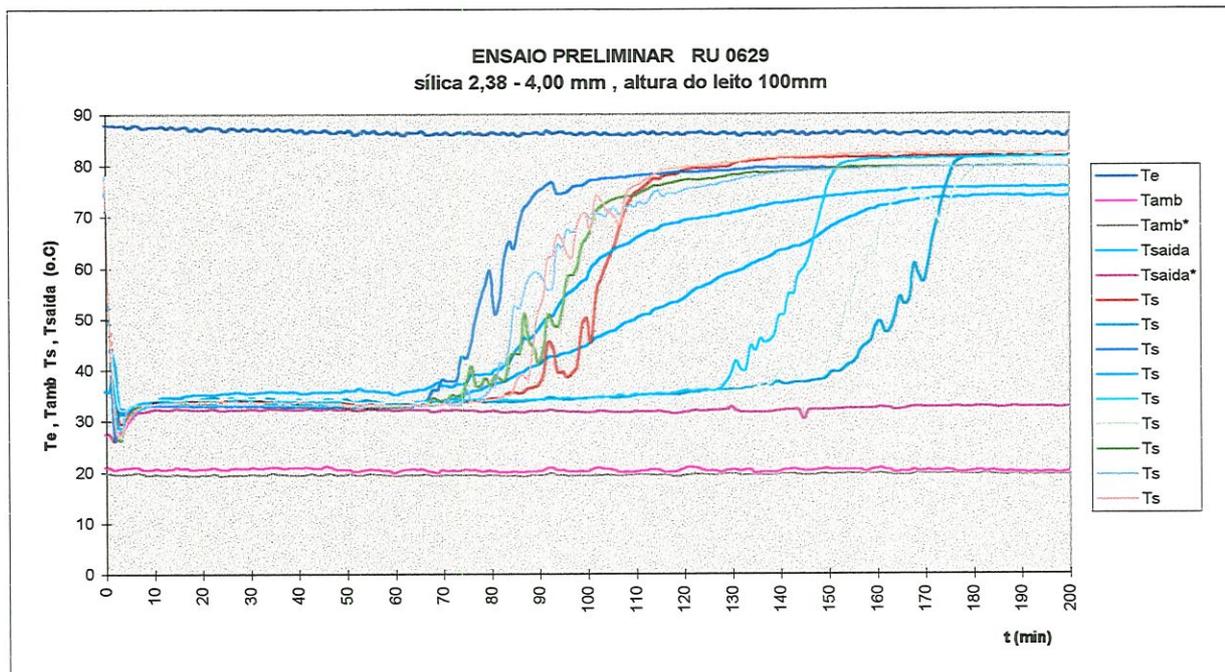


Figura 3.3.7- Ensaio preliminar de secagem sem modificações internas na camara de secagem
Sílica 2,38 - 4,00 mm e altura do leito de 100 mm

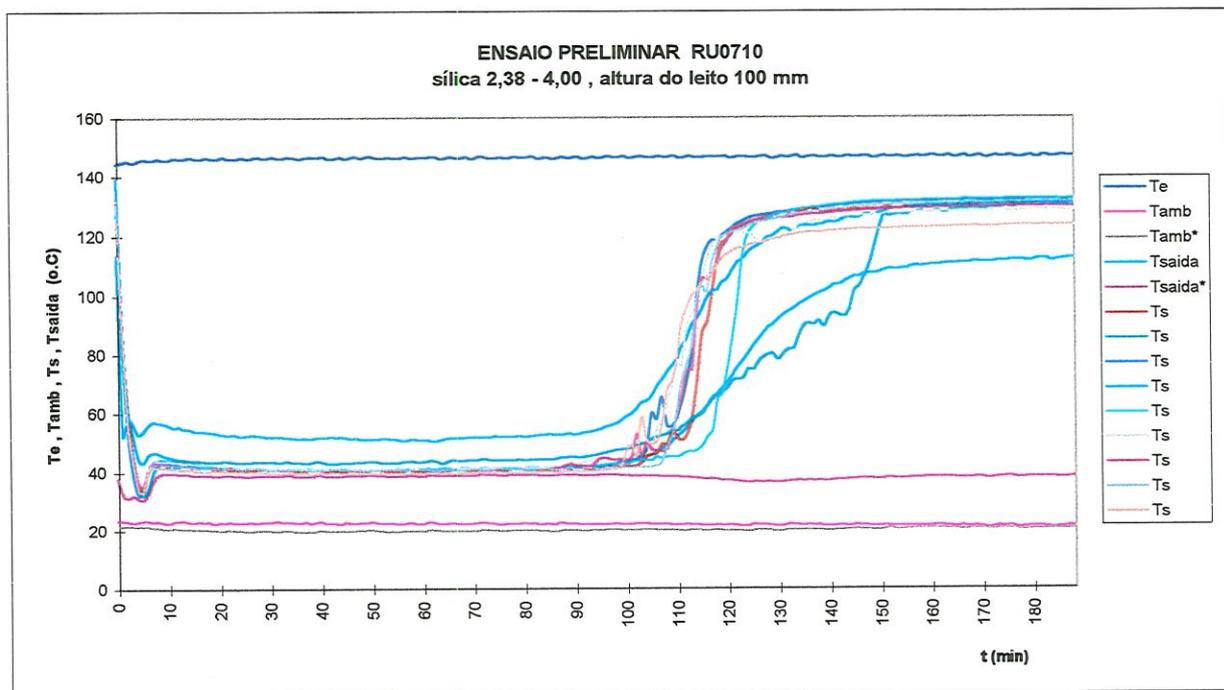


Figura 3.3.8- Ensaio preliminar de secagem com melhorias internas na camara de secagem e alterações na bandeja
Sílica 2,38 - 4,00 mm e altura do leito de 100 mm

A utilização de um sistema de aplicação de soro para abastecer o recipiente de água da mecha apresentou bons resultados. Para cada ensaio era feita uma regulagem no fornecimento de água, mantendo-se o recipiente sempre cheio. Pequeno transbordo, caso ocorresse, era direcionado para fora do duto.

3.4- Metodologia de ensaio

Durante os ensaios preliminares, alguns problemas foram constatados:

- presença de água livre na sílica gel que era expulsa da bandeja na forma líquida pela ação das forças gravitacional e de arraste do fluxo de ar. Esta água livre tornava imprecisa a execução do balanço de massa do processo de secagem;
- inconsistência da umidade da sílica gel durante a preparação, gerando oscilações no tempo de secagem entre os pontos do leito monitorados pelos termopares;
- inconsistência da faixa de granulometria da sílica gel no leito tendo-se algumas vezes presença de finos. Isto ocasionava oscilações nas condições do fluxo de ar e seu reflexo nas taxas de secagem;
- inconsistência na disposição da sílica gel na bandeja, ocasionada pela variação na sua acomodação e compactação

Estes problemas exigiram uma constante evolução da metodologia de preparação da sílica gel e de ensaio. Do procedimento inicial de peneiramento da sílica gel na faixa granulométrica desejada até sua acomodação na bandeja de secagem, foram introduzidas algumas etapas que permitiram a minimização dos problemas. A metodologia ficou assim definida:

- coleta da sílica gel no fim do processo de lavagem / envelhecimento;
- peneiramento úmido da sílica gel na faixa da granulometria do ensaio utilizando-se jogo de peneiras apropriado;
- lavagem da sílica gel peneirada por cinco minutos na peneira de menor granulometria para remoção dos grãos menores. Este tempo mostrou-se adequado, sendo a remoção de finos praticamente desprezível acima deste tempo;
- drenagem da água livre por um período de cinco a sete minutos. A melhor drenagem foi conseguida com a peneira inclinada, sendo a parte inferior desprezada;

- transferência da sílica gel para outra peneira de diâmetro de 1 metro sendo arranjada em camada de 30 a 40 mm, onde permaneceu descansando para eliminar a água livre remanescente por um período de cinquenta minutos a duas horas. A sílica gel era revolvida lentamente a cada 20 min para que a umidade permanecesse uniforme;
- colocação do sistema experimental em funcionamento e ajuste das condições de ensaio (vazão e temperatura). O sistema entrava em regime durante o período de descanso da sílica;
- ajuste prévio da almofada no fundo da estufa;
- coleta de amostra para análise de umidade remanescente após a eliminação da água livre no período de descanso. A sílica gel foi revolvida uma última vez antes da coleta;
- colocação do sistema de coleta de dados em funcionamento para armazenar dados dos dois minutos antecedentes ao início da secagem;
- acondicionamento cuidadoso da sílica na bandeja de ensaio, procurando-se garantir sua homogeneidade. Uma régua de ajuste permitiu manter a altura do leito dentro da faixa pré-estabelecida de 100 mm;
- pesagem da bandeja com a sílica úmida;
- abertura da estufa e posicionamento da bandeja sobre a guarnição em borracha de silicone;
- posicionamento das almofadas laterais e frontais;
- fechamento da estufa;
- medição da pressão estática a montante da placa de orifício;
- medição da pressão atmosférica;
- após o término da secagem, desabilitação do sistema de aquisição de dados;
- abertura da estufa e remoção da bandeja;
- pesagem da bandeja com a sílica gel seca;
- coleta de amostras da sílica das camadas superior e inferior da bandeja, armazenando-as em embalagem lacrada para posterior análise de umidade, granulometria, área superficial e volume dos poros;
- desligamento dos sistemas de secagem e aquisição de dados.

Alguns comentários merecem ser feitos a cerca da metodologia de ensaio:

- o tempo de cinco minutos de lavagem após o peneiramento tornou os grãos da sílica, principalmente os na faixa de 1,6 - 2,6 mm, soltos, sem os finos que a deixavam com aparência pastosa;

- os dois tempos de descanso - cinco a sete minutos na própria peneira de separação e o intervalo de cinquenta minutos a duas horas na peneira de descanso - permitiram a remoção da umidade livre. A variação do tempo de descanso foi fruto da faixa granulométrica e das condições climáticas.

- a acomodação da sílica gel em uma fina camada durante o período de descanso e o periódico de revolvimento propiciaram que a sua umidade permanecesse uniforme. Testes realizados com três amostras de diferentes locais da peneira de um metro levaram a uma variação na umidade relativa medidas de 1 a 1,5 pontos percentuais;

-a razoável uniformidade da sílica gel na bandeja foi conseguida acomodando-a em camadas levemente compactadas e ajustadas com espátula retangular plana. Pequenas oscilações na uniformidade do leito permaneceram, sendo uma das fontes da variação da curva de secagem indicadas pelos termopares sob os diferentes setores da estufa, conforme apresentado no capítulo 4.

Identificação dos termopares na região inferior da estufa

Os nove termopares da região inferior da estufa foram posicionados conforme figura 3.4.1 abaixo, estando ao lado a identificação dos termopares utilizados no experimento.

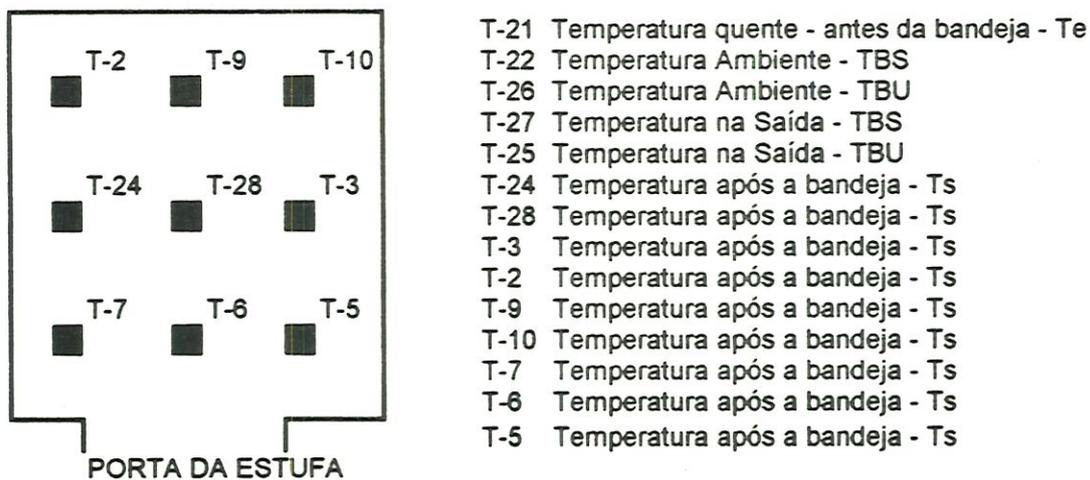


Figura 3.4.1- Identificação dos termopares do aparato experimental

3.5- Sistema de Medição de Vazão

Fundamentação teórica

Existem diversos instrumentos adequados para medir vazão de um escoamento. Eles estão divididos em duas classificações básicas: elementos intrusivos e não intrusivos. Dos dispositivos intrusivos fazem parte: os de área variável (rotâmetro), os de atuadores mecânicos acionados pelo escoamento (turbinas/vortex); os medidores de deslocamento positivo e os que alteram a pressão do escoamento (placa de orifício). Dos não intrusivos, os mais conhecidos são os indicadores magnéticos e ultra-sônicos

Delmée (1983) apresenta um resumo dos medidores de vazão mais comuns para finalidade industrial, laboratorial e para aplicações específicas. Comparou a eficiência do instrumento com as propriedades do fluido a ser medido, limite mínimo de N° Reynolds, tamanho máximo e mínimo do instrumento, fator de utilização, precisão, escala, tipo de sinal, aspectos de instalação, considerações econômicas e vantagens e desvantagens.

Os medidores de vazão via variação da pressão podem ser: placas de orifício, bocais, venturi, tubos de Pitot e aerofólios. O princípio de funcionamento deles baseia-se na equação de Bernoulli da conservação de energia. Pressupondo-se escoamento incompressível, fluido ideal com propriedades constantes e, sendo V_i a velocidade média do escoamento, A_i a altura do ponto i em relação a referência e p_i a pressão do escoamento, tem-se:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + A_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + A_2 \quad (3.1)$$

onde:

γ = peso específico do fluido [N/m³]

Do teorema de Bernoulli, podemos escrever para escoamento incompressível ideal:

$$V_2^2 - V_1^2 = 2gh \quad (3.2)$$

onde:

h = coluna de pressão diferencial dada por: $\frac{(p_1 + A_1)}{\gamma} - \frac{(p_2 + A_2)}{\gamma}$, [m]

Considerando que nos medidores de vazão via variação da pressão há uma restrição ao fluxo (i.e. seções transversais de áreas diferentes) e utilizando a lei da continuidade chega-se a equação hidráulica teórica abaixo, segundo ASME, Fluid Meters (1959) :

$$q_t = a \left(\frac{\sqrt{2g(p_1 - p_2)}}{\gamma} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (a/A)^2}} \right) \quad \text{base volumétrica} \quad (3.3)$$

$$G_t = a \left(\sqrt{2g\gamma(p_1 - p_2)} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (a/A)^2}} \right) \quad \text{base mássica} \quad (3.4)$$

onde

A = área da seção anterior a restrição ao fluxo; [m²]

a = área da restrição ao fluxo. [m²]

$(a/A)^2$ pode ser substituído pela razão de diâmetros, β^4

O fluxo de escoamento real porém, não é igual ao calculado pela equação hidráulica teórica. Para obter o fluxo real a partir da equação teórica, um fator adicional, o “coeficiente de descarga”, deve ser introduzido como definido abaixo:

$$C = \frac{\text{descarga real do escoamento}}{\text{descarga teórica do escoamento}} \quad (3.5)$$

Portanto a equação hidráulica geral para sistemas de medição de vazão do tipo placa de orifício, venturi e bocais fica, com os parâmetros em unidades SI:

$$q = \frac{(\pi d^2)}{4} \left(\frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \left(\frac{\sqrt{2(p_1 - p_2)}}{g} \right) \quad (3.6)$$

$$G = \frac{(\pi d^2)}{4} \left(\frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \left(\sqrt{2\gamma(p_1 - p_2)} \right) \quad (3.7)$$

Definindo $K = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ e rearranjando as equações em unidades mais usuais temos as equações de trabalho;

$$q = 0,012531 K d_p^2 \sqrt{h/\rho} \quad (3.8)$$

$$G = 0,012531 K d_p^2 \sqrt{\rho h} \quad (3.9)$$

com

h = variação da pressão na placa de orifício;	[mmCa]
ρ = densidade do fluido;	[kg/m ³]
d_p = diâmetro da placa de orifício;	[mm]
q = vazão de ar;	[m ³ /h]
G = descarga de ar.	[kg/h]

Para fluido compressível, algumas considerações podem ser feitas: o fluido é assumido gás perfeito e, além disso, como as duas seções A e a são muito próximas de modo que os efeitos de fricção e viscosidade podem ser desprezados, o escoamento pode ser assumido não somente adiabático mas também isoentrópico. Assim, as equações acima podem ser modificadas através de formulação matemática para:

$$q = 0,012531 K Y_1 d_p^2 \sqrt{h / \rho} \quad (3.10)$$

$$G = 0,012531 K Y_1 d_p^2 \sqrt{\rho h} \quad (3.11)$$

onde:

Y_1 = coeficiente de expansão (μ e ρ do fluido, razão pressão, β) para placa de orifício

Para o monitoramento da vazão do ensaio de secagem optamos pela utilização de medidor tipo placa de orifício de cantos retos e furo concêntrico devido à simplicidade construtiva, confiabilidade operacional e precisão característica. Dentre as opções de tomadas de pressão existentes utilizamos a de “tomada de canto” por ser a mais simples de ser fabricada, tomando, assim, facilidade a reprodução do coeficiente de vazão experimental determinado pela ASME, Fluid Meters (1959).

O coeficiente de expansão Y_1 é dado pela equação:

$$Y_1 = 1 - (0,41 + 0,35 \beta^4) * (x/k) \quad (3.12)$$

onde

x = razão entre a variação de pressão na placa e a pressão a montante dela, h / p_1

$k = 1,4$ para o ar

O valor do coeficiente de fluxo K depende de diversos fatores como:

- tipo e bitola da tubulação, D ;
- velocidade do escoamento, V ;
- viscosidade, μ , e densidade, ρ , do fluido a ser medido;
- razão de diâmetros, β ;
- fatores de forma da placa de orifício.

Uma vez estabelecida a configuração da placa de orifício, e conseqüentemente os fatores de forma, o coeficiente K pode ser escrito:

$$K = K(Re, \beta, D) \quad \text{onde:} \quad (3.13)$$

$$Re = \rho V D / \mu \quad [\text{adimensional}]$$

A determinação de K é empírica, havendo em bibliografias valores tabelados para as mais variadas configurações de geometria.

Dimensionamento da placa de orifício

No dimensionamento da placa de orifício para as vazões de ensaio utilizadas: 60, 110 e 210 kg/h, alguns parâmetros foram admitidos:

- placa de orifício de cantos retos e furo concêntrico
- tomada de pressão tipo "tomada de canto"
- diâmetro da tubulação de ar = 83 mm
- ar a 25 °C
- variação de pressão admissível na placa de orifício para a máxima vazão de ar = 140 mmca

Assim, das equações (3.11) e (3.12), e utilizando os valores tabelados de K conforme ASME Research Report on Fluid Meters, temos $\beta = 0,5518$ ou $d_p = 45,8$ mm. A figura 3.5.1 mostra detalhes do conjunto placa de orifício. A tabela 3.5.1 mostra parâmetros básicos para os três valores de vazão do experimento.

As diferentes temperaturas iniciais dos ensaios foram causadas pela variação diária da temperatura ambiente associada ao aquecimento do ar produzido pelo soprador. A tabela 3.5.1 mostra este aquecimento para as faixas de vazão do ensaio. Esta diferença de temperatura não afeta as dimensões da placa de orifício. As alterações introduzidas na medição de vazão em razão das variações de densidade e de viscosidade do ar com a temperatura foram consideradas no cálculo.

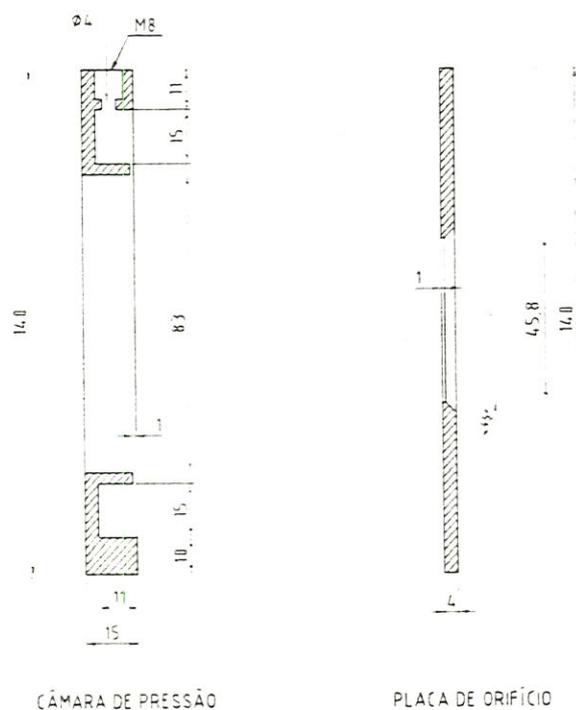


Figura 3.5.1- Placa de orifício e câmara de alta e baixa pressão.

Tabela 3.5.1- Parâmetros básicos para as vazões do experimento

Parâmetros básicos	60 kg/h	110 kg/h	210 kg/h
Número Reynolds a 25 o.C	1,46E4	2,73E4	5,15E4
T _{aq} no conjunto ventilador	8,3 °C	6,5 °C	5,2 °C
Coefficiente de Expansão Y ₁	1,0	0,999	0,995

A instalação da placa de orifício obedeceu recomendações de Delmeé (1983) com trechos retos à montante e à jusante da placa iguais ou superiores a 22 D e 6 D, respectivamente, de modo a minimizar interferências devido a singularidades. Sua localização entre o ventilador e o aquecedor visou evitar que grandes alterações de temperatura do ar pudessem gerar erros de leitura.

Calibração da placa de orifício

A placa de orifício foi calibrada no Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. O conjunto tubulação/placa de orifício foi transportado para o laboratório e adaptado às instalações existentes, conforme a configuração mostrada na figura 3.5.2.

As características básicas da instalação para calibração da placa de orifício foram:

- bomba centrífuga Mark, modelo SDM-4, pot. 1 cv, 3500 rpm;
- tanque amortecedor de vibração/oscilação de pressão - dimensões $\phi 310$ h510 mm;
- balança marca Toledo modelo 2086, calibrada conforme descrito no anexo 1;
- tambor com válvula de drenagem localizado sobre a balança para coleta da água.

Foram utilizados nos testes de calibração o medidor de pressão diferencial da SMAR e o sistema computadorizado de aquisição de dados que compõem o experimento de secagem, de modo a calibrar a placa de orifício com os equipamentos que a acompanhariam durante o experimento de secagem.

A calibração foi realizada com água para a faixa de número de Reynolds entre os valores da tabela 3.5.1. Não foram atingidos, porém, os máximos valores de Reynolds em vista de a bomba apresentar baixa vazão devido ao diâmetro da tubulação do experimento.

Para a realização do ensaio de calibração foi tomado o cuidado de escorvar toda a linha de modo a eliminar toda e qualquer bolsa de ar que pudesse mascarar os resultados, principalmente na região do sensor de pressão. A metodologia de ensaio foi como segue:

- o direcionador de fluxo foi posicionado para retorno da água ao reservatório;
- foi ajustada a vazão da água;
- o tambor foi drenado e a válvula de dreno fechada;
- o peso do conjunto foi tomado ;
- através do direcionador de fluxo, a água foi desviada para o tambor simultaneamente com o acionamento do cronômetro;
- após aproximadamente 60 s, ou 90 kg de água para alguns ensaios, o direcionador de fluxo foi retornado à posição inicial, simultaneamente ao travamento do cronômetro;
- o peso do conjunto foi tomado.

A tabela 3.5.2 mostra os dados do ensaio de Calibração da placa de orifício e a figura 3.5.3 o comparativo entre G_{real} e G_{tabela} .

O resultado da calibração justifica plenamente o uso das equações da ASME Research Report on Fluid Meters apresentadas.

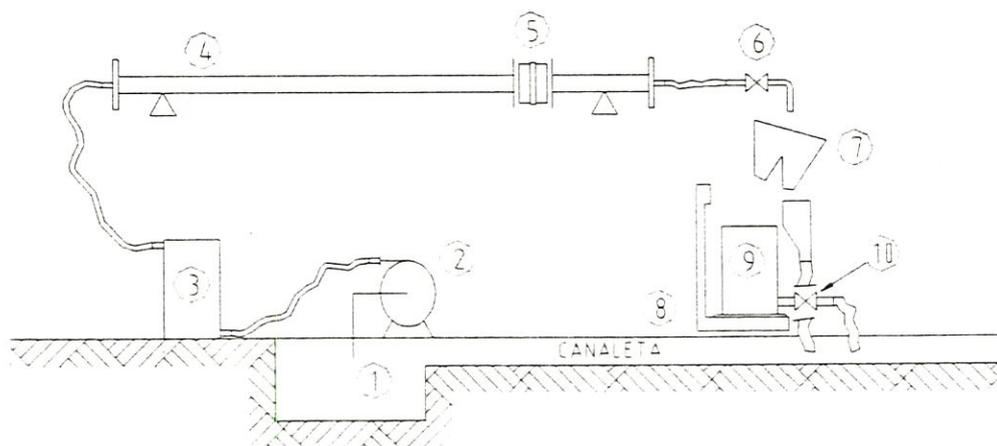


Figura 3.5.2- Esquema de ensaio da placa de orifício. 1). Reservatório de água; 2). Bomba centrífuga; 3). Amortecedor de pressão; 4). Dutos do aparato experimental de secagem; 5). Placa de orifício; 6). Válvula de controle de vazão; 7). Direcionador de fluxo; 8). Balança; 9). Tambor de coleta de água; 10). Válvula de dreno do tambor.

3.6- Calibração dos termopares

Foram utilizados no experimento quatorze termopares tipo K (cromel/alumel) com fios de bitola 0,15 mm, que foram acoplados às placas terminais T-21 do sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados possuem calibração própria, com as placas terminais T21 possuindo junta fria interna. Porém, como temos no experimento dois computadores coletando os dados, procuramos calibrar os quatorze termopares juntos para que eventuais diferenças de ajuste entre as placas terminais e as placas AD pudessem ser corrigidas via equação de calibração.

TABELA 3.5.2- Calibração placa de orifício - equacionamento teórico e ensaio

LOCAL DO ENSAIO = LAMET - USP - SÃO CARLOS
 FLUIDO DE ENSAIO = g = 9781 N/m²
 ÁGUA @ 24 o.C pw = 3001.9 Pa
 m = 9.16E-04 N.s/m²
 r = 997.2 kg/m³

TUBULAÇÃO F_D = 0.083 m 83.0 mm
 PLACA F_a = 0.0458 m 45.8 mm
 RAZÃO b = 0.5518
 SENSOR PRESSÃO SPAN = 300 mmCa

BALANÇA TOLEDO - FATOR DE CORREÇÃO = 1,0075

G_{real} = 3600*(PESO2 - PESO1) * FATOR CORREÇÃO/DELTA T kg/h

VARIAÇÃO PRESSÃO NA PLACA DE ORIFÍCIO = ((DELTA P - 4.00) / 16) * SPAN mmca

REYNOLDS $Re = (\rho * V * D) / \mu = 4 * G_{real} / (\pi * D * \mu) / 3600$

K_{teórico} = $0,63718 + 0,0096 * e^{-(Re - 6213)/11780} + 0,00779 * e^{-(Re - 6213)/74870} + 0,00299 * e^{-(Re - 6213)/1518}$

G_{teórico} = $0,012531 * d^2 * K^*(\rho * h)^{1/2}$ com d(mm), ρ(kg/m³), h(mmCa)

DADOS LEVANTADOS							Re	K calculado	G _{teórico} kg/h	ERRO %
HORA	DELTA T seg	PESO 1 kg	PESO 2 kg	G _{real} kg/h	DELTA P m A	DELTA P(2) mmCa				
12.04	240.00	0.00	0.00	0.0	4.00					
12.11	209.93	28.95	136.30	1854.7	4.62	11.625	8.63E+03	0.6532	1848.5	-0.34
12.23	150.25	24.50	115.00	2184.6	4.87	16.313	1.02E+04	0.6517	2184.7	0.00
12.30	150.44	24.80	130.10	2538.7	5.17	21.938	1.18E+04	0.6505	2528.8	-0.39
12.36	119.92	25.85	121.55	2894.5	5.53	28.688	1.35E+04	0.6495	2887.4	-0.24
12.49	112.30	24.95	137.20	3625.4	6.42	45.375	1.69E+04	0.6478	3622.2	-0.09
12.55	104.11	25.60	138.50	3933.2	6.90	54.375	1.83E+04	0.6473	3961.7	0.72
13.08	83.86	25.50	137.15	4828.9	8.31	80.719	2.25E+04	0.6459	4816.6	-0.26
13.20	73.50	25.80	128.60	5072.9	8.82	90.431	2.36E+04	0.6456	5095.6	0.45
13.28	70.09	28.70	131.75	5332.6	9.30	99.338	2.48E+04	0.6452	5338.1	0.10
13.35	68.24	29.55	133.55	5527.7	9.69	106.763	2.57E+04	0.6450	5532.1	0.08
13.43	65.73	28.25	133.20	5791.2	10.29	117.938	2.69E+04	0.6447	5811.9	0.36
13.50	63.23	29.00	133.90	6017.3	10.74	126.300	2.80E+04	0.6445	6012.3	-0.08
13.58	60.12	25.60	127.45	6144.5	11.04	132.075	2.86E+04	0.6444	6147.1	0.04
14.01	59.98	26.20	130.50	6307.0	11.50	140.625	2.93E+04	0.6442	6341.5	0.54
14.06	59.91	25.40	128.60	6247.8	11.25	135.994	2.91E+04	0.6443	6236.7	-0.18
14.16	74.45	24.35	139.15	5592.7	9.85	109.669	2.60E+04	0.6449	5606.3	0.24
14.29	73.89	29.70	138.25	5328.3	9.33	99.956	2.48E+04	0.6452	5354.7	0.49
14.38	87.07	27.65	136.90	4550.9	7.84	72.075	2.12E+04	0.6463	4554.1	0.07
14.45	93.76	29.75	141.75	4332.6	7.47	65.006	2.02E+04	0.6466	4327.3	-0.12
14.53	122.80	26.50	138.20	3299.2	6.01	37.744	1.53E+04	0.6485	3307.1	0.24
14.59	120.75	25.80	121.20	2865.6	5.52	28.500	1.33E+04	0.6495	2878.3	0.44

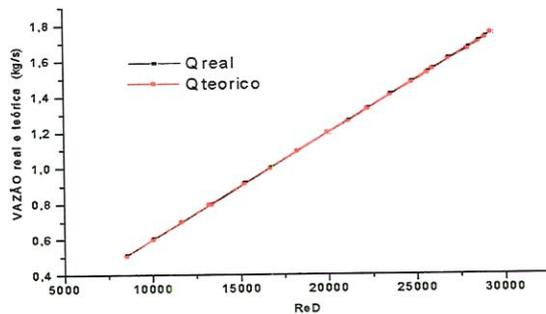


Figura 3.5.3 - Comparação vazão real x vazão teórica

placaen3.xls

Na calibração utilizamos um banho térmico existente nas dependências da Crosfield Brasil Ltda. O termômetro de referência foi emprestado da UNESP- Rio Claro, sendo de fabricação Incoterm , No. 53488 e faixa de leitura variando de -10 a 52 °C com indicação de 0,1 °C. Os quatorze termopares foram fixados em volta deste termômetro e introduzidos em uma proveta com querosene. Esta proveta, por sua vez, permaneceu dentro do banho térmico. Para cada ponto de calibração, o banho térmico foi mantido constante por um tempo superior a 5 min, de modo a permitir que o conjunto querosene/termômetro/termopares entrasse em equilíbrio. A proveta era agitada manualmente para agilizar o processo.

Foram utilizados na calibração 7 pontos. O ponto 0 °C foi obtido com gelo fundente no banho térmico. Embora tenhamos temperaturas altas em alguns ensaios, até 180 °C, durante a secagem, os termopares que realmente geram dados para a determinação da taxa de secagem, estão medindo temperaturas inferiores a 50 °C. Assim, a calibração realizada na faixa de 0 a 50 °C está adequada ao experimento, muito embora a extrapolação para valores de temperatura além da faixa de calibração possa ser feita sem maiores problemas.

As equações de calibração dos termopares, na forma $T = a + b(T_{\text{lido}})$, com T = temperatura corrigida, estão apresentadas abaixo:

$$T_{21} = -0,00798 + 1,00272 * T_{21\text{lido}}$$

$$T_{26} = 0,00284 + 0,99778 * T_{26\text{lido}}$$

$$T_{25} = 0,01731 + 0,99625 * T_{25\text{lido}}$$

$$T_{28} = -0,09844 + 0,99866 * T_{28\text{lido}}$$

$$T_2 = -1,09788 + 1,01777 * T_{2\text{lido}}$$

$$T_{10} = -1,06522 + 1,01661 * T_{10\text{lido}}$$

$$T_6 = -1,10638 + 1,01832 * T_{6\text{lido}}$$

$$T_{22} = 0,11381 + 1,00028 * T_{22\text{lido}}$$

$$T_{27} = 0,03653 + 0,9983 * T_{27\text{lido}}$$

$$T_{24} = 0,0145 + 0,99984 * T_{24\text{lido}}$$

$$T_3 = -1,09804 + 1,01885 * T_{3\text{lido}}$$

$$T_9 = -2,1625 + 1,06906 * T_{9\text{lido}}$$

$$T_7 = -1,04094 + 1,01641 * T_{7\text{lido}}$$

$$T_5 = 0,09648 + 0,9966 * T_{5\text{lido}}$$

4 - CÁLCULOS E DEFINIÇÕES

O processo de secagem pode ser estudado através de análise microscópica e/ou macroscópica. No âmbito microscópico, pode-se analisar o processo de secagem em um grão de material, ou em uma porção infinitesimal deste, e extrapolar os cálculos para todo o material, enquanto que, no âmbito macroscópico, efetua-se os cálculos considerando parâmetros gerais da secagem.

Neste trabalho, utilizamos a análise microscópica para desenvolver a descrição fenomenológica do processo de secagem. No equacionamento matemático do processo de secagem, prevaleceu a análise global, através do balanço de massa do sistema, que foi dividido em duas partes para a análise dos resultados, a saber:

- balanço de massa da sílica durante a secagem;
- balanço de massa da água, entre o material do leito e o ar de secagem.

Para se chegar ao balanço de massa, valores da umidade absoluta do ar, da descarga de ar e da variação de pressão no leito foram calculados através do tratamento matemático das variáveis medidas nos ensaios. Estes parâmetros do processo, associados às temperaturas medidas ao longo do aparato experimental, permitiram efetuar o balanço de massa do sistema e obter equações governantes para a taxa de secagem durante o período de taxa de secagem constante. Valores do número de transferência do gás no leito, N_{tg} , também foram calculados.

Por fim, um tratamento matemático relacionando as equações da taxa de secagem de cada uma das combinações de ensaio, permitiu a obtenção de uma equação geral, válida dentro dos intervalos dos parâmetros do trabalho, isto é, dentro das faixas de granulometria do material, de temperatura e de vazão do ar.

4.1- Balanço de massa de sílica durante a secagem

Para cada ensaio realizado foram determinados, antes do início da secagem, os parâmetros massa inicial do leito, m_{Lu} , e massa inicial da sílica, $m_{Se,u}$, como seguem:

$$m_{Lu} = Pi - Pband \quad (4.1)$$

$$m_{Se,u} = m_{Lu} * URi/100 \quad (4.2)$$

onde:

Pi = peso do conjunto bandeja/sílica no início da secagem; [kg]

$Pband$ = peso da bandeja; [kg]

URi = umidade relativa inicial do leito, medida em laboratório. [%]

Da mesma forma, no fim da secagem, foram determinados os parâmetros massa final do leito, m_{Ls} , e massa final da sílica, $m_{Se,s}$ como seguem:

$$m_{Ls} = Pf - Pband \quad (4.3)$$

$$m_{Se,s} = m_{Ls} * URf_{med} / 100 \quad (4.4)$$

onde:

Pf = peso do conjunto bandeja/sílica no fim da secagem; [kg]

URf_{med} = média da umidade relativa final do leito, medida em laboratório, [%]

onde;

$$URf_{med} = (URf_{sup} + URf_{inf}) / 2 \quad (4.5)$$

com:

URf_{sup} = umidade relativa final da camada superior do leito, medida em laboratório; [%]

URf_{inf} = umidade relativa final da camada inferior do leito, medida em laboratório; [%]

Assim, o balanço de massa do leito de sílica gel pode ser escrito pela equação abaixo:

$$m_{Se,u} - m_{Se,s} = perda\ de\ sílica \quad (4.6)$$

A tabela 5.1 do capítulo 5 apresenta este balanço para todos os ensaios realizados.



4.2- Balanço de massa de água entre o material do leito e o ar de secagem

Para se chegar ao balanço de massa da água, entre o material do leito e o ar de secagem, foram medidos, durante os testes, as variáveis: temperatura do ar em diferentes regiões do experimento e corrente dos sensores de pressão, que permitiram obter os valores da umidade absoluta do ar, da descarga de ar e da perda de carga no leito.

- **Descarga de ar** - A descarga de ar, G , foi determinada utilizando o tratamento matemático apresentado na seção 3.5, tomando-se como variável a leitura, em mA, do sensor de pressão diferencial da placa. Assim, a descarga de ar na base seca, G' [kg/h], é dada pela equação:

$$G' = G \frac{(P - pw)}{P} \frac{M_i}{M_m} \quad (4.7)$$

onde:

G = descarga de ar, dada pela eq. (3.11) [kg/h]

P = pressão atmosférica absoluta [pascal]

pw = pressão parcial do vapor d'água do ar [pascal]

ref. ASHRAE - Handbook of Fundamentals (1982)

M_i = massa molecular do gás inerte (ar) [kg/kgmol]

M_m = massa molecular da mistura ar e vapor d'água, [kg/kgmol]

- **Perda de carga no leito** - O valor de leitura, em mA, do sensor de pressão diferencial ligado aos plenuns de tomada de pressão à montante e à jusante da bandeja é convertido na perda de carga no leito, DPI [mmca], pela equação:

$$DPI = 150 * (mA - 4) / 16 \quad (4.8)$$

- **Umidade absoluta do ar ambiente e do ar de saída** - A determinação da umidade absoluta do ar ambiente, w_{amb} [kg_{água}/kg_{ar seco}], e do ar de saída, w_s [kg_{água}/kg_{ar seco}], baseia-se nas equações apresentadas pela ASHRAE - Handbook of Fundamentals (1982). As variáveis que permitem a obtenção das umidades absolutas são as leituras dos respectivos termopares de TBS e de TBU que medem o ar ambiente e o ar de saída do aparato experimental, ou seja, termopares T-22 e T-26; T-27 e T-25, com os valores convertidos para graus Kelvin.

O equacionamento básico é apresentado pelas equações abaixo:

$$w_s^* = 0,62198 pws / (P - pws) \quad (4.9)$$

onde:

P = pressão absoluta do ambiente [pascal]

pws = pressão parcial de vapor à temperatura de saturação adiabática [pascal]

ref. ASHRAE - Handbook of Fundamentals (1982),

w_s^* = umidade absoluta do ar à temperatura de saturação adiabática [kg_{água}/kg_{ar seco}]

Por fim, a umidade absoluta do ar, w [kg_{água}/kg_{ar seco}], é calculada conforme apresentado pela ASHRAE - Handbook of Fundamentals (1982).

- **Balço de massa da água evaporada no fluxo gasoso e remanescente na sílica** - Para determinada fase da secagem, a seguinte equação de balanço de massa pode ser escrita:

$$N = - \frac{d(m_L)}{dt} \quad (4.10)$$

onde:

N = taxa de secagem, conforme eq. (2.1) [g/min]

m_L = massa do leito (água + sílica) [g]

Se considerarmos a evolução do processo de secagem até um dado instante de tempo t [min], o balanço de massa do sistema pode ser calculado integrando a eq. (4.10), como segue:

$$\int_0^t N(t) dt = - m_L \Big|_0^t = -(m_{L(t)} - m_{L(0)}) \quad (4.11)$$

A massa do leito é formada pela soma da massa de sílica (base seca), m_{se} , com a massa de água, W_a . Como a massa de sílica no leito é constante - desprezando-se as perdas por elutriação - podemos escrever:

$$\int_0^t N(t) dt = W_{a0} - W_{a(t)} \quad (4.12)$$

ou

$$W_{a(t)} = W_{a0} - \int_0^t N(t) dt \quad (4.13)$$

A umidade relativa do leito calculada num dado instante pelo balanço de massa, $UR_{L,calc}$ [%], pode então ser determinada pela equação:

$$UR_{L,calc(t)} = W_{a(t)} / (m_{se} + W_{a(t)}) \quad (4.14)$$

A umidade relativa foi utilizada no gráfico da planilha apresentada na seção 4.5. Sua comparação com o valor medido em laboratório permite checar o balanço de massa e verificar a consistência dos dados experimentais.

4.3- Equação para a taxa de secagem no período de taxa de secagem constante

Uma equação característica para a taxa de secagem no período de taxa de secagem constante pode ser obtida através da regressão linear sobre valores da taxa de secagem e do teor de umidade do leito, X , calculados a cada instante. O teor de umidade do leito é dado pela equação:

$$X = W_a / m_{se} \quad (4.15)$$

A equação característica da taxa de secagem, $N = N(X)$ foi determinada para cada combinação de parâmetros de secagem, estando apresentada na seção 5.5.

4.4- Equação geral para a taxa de secagem

Existe uma relação direta entre as equações da taxa de secagem, determinadas conforme seção 4.3 e as variáveis das configurações dos ensaios: granulometria do material, temperatura e descarga do ar, de modo que parece razoável obtenção de uma equação geral que represente a taxa de secagem em toda a faixa de trabalho coberta por estes parâmetros, na forma da equação (4.16):

$$N_2/N_1 = C (T_2/T_1)^{\alpha_1} (G_2/G_1)^{\alpha_2} (D_2/D_1)^{\alpha_3} \quad (4.16)$$

onde:

N = taxa de secagem	[g/min]
T = temperatura do ar de secagem	[°C]
G = descarga do ar de secagem	[kg/min]
D = média granulométrica do material a ser seco	[mm]
C = constante	

α_T = coeficiente da variação de temperatura;
 α_G = coeficiente da variação de descarga;
 α_D = coeficiente da variação de granulometria.

Os índices 1 e 2 representam as condições de secagem que estão sendo comparadas.

Devemos determinar cada coeficiente individualmente, ou seja, devemos comparar uma das variáveis enquanto mantemos as outras duas fixas. Com isto, para o coeficiente α_T da variação de temperatura, por exemplo, teremos a equação (4.16) reduzida a:

$$N_2/N_1 = (T_2/T_1)^{\alpha_T} \quad (4.17)$$

onde rearranjando-a obtemos:

$$\alpha_T = \ln(N_1/N_2) / \ln(T_1/T_2) \quad (4.18)$$

Assim, para cada combinação das outras duas variáveis, descarga do ar e faixa granulométrica, teremos três valores do coeficiente da variação de temperatura, α_T , pois comparamos as taxas de secagem e as temperaturas do ar duas a duas, para os três valores de temperatura do trabalho, com abaixo apresentado:

configuração	coeficiente		
D2,1-V60	$\alpha_T(120/80)$	$\alpha_T(180/120)$	$\alpha_T(180/80)$
D2,1-V110	$\alpha_T(120/80)$	$\alpha_T(180/120)$	$\alpha_T(180/80)$
D2,1-V210	$\alpha_T(120/80)$	$\alpha_T(180/120)$	$\alpha_T(180/80)$
D4,4-V60	$\alpha_T(120/80)$	$\alpha_T(180/120)$	$\alpha_T(180/80)$
D4,4-V110	$\alpha_T(120/80)$	$\alpha_T(180/120)$	$\alpha_T(180/80)$
D4,4-V210	$\alpha_T(120/80)$	$\alpha_T(180/120)$	$\alpha_T(180/80)$

Se efetuarmos esta comparação para toda a faixa de teor de umidade, podemos obter uma equação $\alpha_T = \alpha_T(X)$.

Devemos agora combinar as dezoito equações determinadas acima para obtermos uma equação geral de α_T , válida em toda a faixa de variáveis do trabalho. Isto pode ser feito, plotando-se essas

dezoito equações juntas em um mesmo gráfico e obtendo-se uma equação média via regressão linear.

O mesmo procedimento deve ser realizado para a determinação dos coeficientes α_G e α_D , lembrando que para o coeficiente α_D estaremos comparando, dois a dois, apenas dois valores, ou seja, teremos uma equação para cada configuração das outras variáveis.

A seção 5.6 apresenta as tabelas e os gráficos com as equações obtidas para cada um destes coeficientes.

4.5- Apresentação dos dados dos ensaios

Cada ensaio foi representado por:

- Planilha contendo os principais dados do processo, a saber -

- massa inicial do leito, m_L [kg]
- umidade relativa inicial do leito, $UR_{L,0}$ [%]
- massa inicial de água no leito, $W_{a,0}$ [kg]
- massa de sílica seca no leito, m_{se} [kg]
- descarga de ar com fluxo livre, sem a bandeja, $G_{(s,band)}$ [kg/h]
- descarga de ar no início da secagem, G [kg/h]
- variação de pressão no leito no início da secagem, DPI [mmca]
- temperatura ambiente média durante o processo de secagem, $T_{amb,m}$ [°C]
- umidade absoluta média do ambiente, $w_{amb,m}$ [kg_{água}/kg_{ar seco}]
- temperatura média do ar quente de entrada na estufa, T_e [°C]
- umidade relativa do leito medida no fim da secagem (tabela 5.1), $UR_{L,f,med}$ [%]
- tempo do término da secagem, t_F [min]
- tempo do ponto de taxa de secagem decrescente, t_f [min]
- tempo adimensional do ponto de taxa de secagem decrescente, τ_f [min]
- taxa de secagem média para o período de taxa de secagem constante, N_{med} [g/min]
- taxa de secagem máxima para o período de taxa de secagem constante, $N_{máx}$ [g/min]
- umidade relativa do leito calculada no fim da secagem, eq. (4.16), $UR_{L,f,calc}$ [%]

onde:

$$W_{a,0} = m_L * UR_{L,0} \quad (4.20)$$

$$m_{se} = m_L * (1 - UR_{L,0}) \quad (4.21)$$

$$\tau_f = t_f / t_F \quad (4.22)$$

t_F = tempo no qual a temperatura média indicada pelos nove termopares localizados abaixo da câmara de secagem atinge o patamar superior;

t_f = tempo no qual a temperatura média indicada pelos nove termopares localizados abaixo da estufa sai do patamar de saturação e começa a subir;

- **Gráfico da Análise Quantitativa** - Este gráfico mostra a variação, no tempo, das temperaturas de entrada e de saída do ar, da descarga de ar de secagem, da variação de pressão verificada no leito e da taxa de secagem.

- **Gráfico Adimensional** - Este gráfico mostra, de modo adimensional, a variação dos parâmetros do gráfico acima. O grau da variação destes parâmetros pode ser melhor evidenciado através desta adimensionalização. Os adimensionais utilizados são:

- $TETAs.m$ - relação entre temperatura média do ar de saída, $Ts.m$, e a temperatura do ar de entrada,

$$TETAs.m = Ts.m / Te$$

- $[DPI]$ - relação entre a variação de pressão no leito no instante t e a variação de pressão inicial no leito, logo após a bandeja ser introduzida na câmara de secagem e a pressão se estabilizar,

$$[DPI] = DPI / Dpl_0$$

- $[URs]$ - relação entre a umidade relativa do leito no instante t e a umidade relativa inicial do leito;

$$[URs] = UR_L / UR_{L,0}$$

- $[G]$ - relação entre a descarga de ar durante a secagem e a descarga de ar antes da introdução da bandeja, $G_{(s,band)}$

$$[G] = G / G_{(s,band)}$$

Esses parâmetros foram plotados em função de um tempo de secagem também adimensionalizado dado por :

$$[TEMPO] = t / t_F$$

Na seção 5.4 e no Anexo 2 estão apresentadas as planilhas para cada ensaio realizado, cinquenta e três planilhas ao todo, correspondendo às dezoito combinações de secagem estudadas.

5 - RESULTADOS

Foram realizados cinquenta e três ensaios para as dezoito combinações de vazão, temperatura e granulometria do material definidas no capítulo 3. Existem três ensaios para cada configuração, o que possibilita averiguar a repetibilidade dos dados coletados e utilizar seus valores médios nos gráficos e cálculos. Uma das combinações teve somente dois ensaios, com boa repetibilidade. Na realização dos ensaios, cada batelada foi identificada de modo a facilmente caracterizar o experimento, conforme exemplo:

D2.1-V60-T80, representa o ensaio de sílica gel com diâmetro médio dos grãos de 2,1 mm, descarga de 60 kg/h e temperatura de entrada do ar de 80°C.

As letras A, B e C foram acrescentadas no fim da codificação de cada experimento para identificar os três ensaios de cada configuração.

Com o objetivo de verificar se havia alguma discrepância de resultados face ao sobreaquecimento e ao maior tempo de exposição sofridos pela camada de cima do leito durante o processo de secagem, foram medidas, para as camadas superior e inferior do leito, a umidade residual e a distribuição granulométrica da sílica seca. Esta pesquisa foi realizada a despeito da caracterização do processo de secagem apresentada na Fundamentação Teórica, ou seja:

- a secagem só ocorre na zona de secagem;
- a camada superior de sílica gel da bandeja seca em primeiro lugar, permanecendo então sob a ação do fluxo de ar quente enquanto a onda de desumidificação percorre o leito;
- as zonas de secagem nas diversas seções do leito têm características muito semelhantes, se não idênticas.

Os dados obtidos destas duas camadas e discutidos nas seções 5.1, 5.2 e 5.3 a frente, apresentaram pequena diferença, de modo que utilizamos valores médios destes dois parâmetros nos cálculos efetuados nas demais seções.

5.1- Perda de material do leito por fragmentação e elutriação

A tabela 5.1 apresenta dados gerais dos ensaios. A umidade relativa da sílica foi determinada em balança analítica marca Metler com aquecimento elétrico, configurada para calcular automaticamente a umidade da amostra. A temperatura da balança foi ajustada a 140 °C e o tempo para obtenção da umidade relativa variou de 30 min, para a sílica seca, para 1 hora, para a sílica úmida. As demais colunas da tabela apresentam os dados coletados conforme os passos descritos na seção 3.4- Procedimento Experimental.

Verifica-se que a metodologia de preparação da sílica gel úmida descrita na seção 3.4 é satisfatória. A variação da umidade relativa inicial das três amostras correspondentes à cada combinação de ensaio é muito pequena, em média, da ordem de 1 ponto percentual.

Como apresentado no capítulo 2 - Fundamentação Teórica, os grãos da sílica gel têm seu tamanho reduzido durante a secagem. Esta redução, conforme combinação dos modelos apresentados por Caincross *et al* (1997), Simpkins *et al* (1989), Scherer *et al* (1996), entre outros, deve-se a dois fatores:

- encolhimento, devido ao rearranjo da estrutura do grão da sílica gel com a remoção da água;
- rompimento do grão, patrocinado pelo atrito entre os grãos e pela alta tensão de capilaridade interna criada pelo gradiente de umidade entre a superfície e o interior.

Para sílica gel de granulometria da ordem de micra, o efeito do rompimento do grão tem pequena importância face ao efeito de encolhimento, levando-se à seguinte relação: secagem lenta resulta num maior encolhimento da sílica gel por haver tempo para rearranjo da estrutura do grão. Inversamente, secagem rápida resulta em menor encolhimento do grão. Quando os grãos da sílica são maiores, da ordem de milímetros, a intensidade destes dois efeitos está ligada ao método e intensidade de secagem. Sistema de secagem de baixa intensidade como secagem em forno de bandejas sem fluxo de ar ou com baixo fluxo de ar sobre sua camada superior e onde o atrito entre os grãos é praticamente nulo, leva à redução do tamanho da sílica gel devido principalmente ao fenômeno de encolhimento.

No presente trabalho, apesar do efeito do atrito entre os grãos praticamente não existir, a ação da vazão do ar e da temperatura fazem com que o fenômeno de rompimento do grão seja muito mais atuante que o de encolhimento. Isto foi constatado nos ensaios, através da

Tabela 5.1 - Resumo dos dados coletados durante os ensaios.

	GRAN. (mm)	Te (C.)	G (kg/h)	Patm (kPa)	Pest (mmCa)	URi (%)	URf _{sup} (%)	URf _{inf} (%)	Pi (kg)	Pf (kg)	Pband. (kg)	m _{Lu} (kg)	m _{Se,u} (kg)	m _{Ls} (kg)	m _{Se,s} (kg)	PERDA (kg)
D4.4-V60-T80 - A	3.7 - 5.1	80	60	95.13	22	67.2	2.2	2.2	12.86	8.43	6.27	6.59	2.16	2.16	2.11	0.05
D4.4-V60-T80 - B	3.7 - 5.1	80	60	95.19	22	67.2	1.8	1.9	12.86	8.43	6.26	6.60	2.16	2.17	2.13	0.03
D4.4-V60-T80 - C	3.7 - 5.1	80	60	95.33	22	67.6	1.9	2.2	12.86	8.44	6.26	6.60	2.14	2.18	2.14	0.00
D2.1-V60-T80 - A	1.6 - 2.6	80	60	95.19	25	67.8	2.5	2.8	12.53	8.32	6.27	6.26	2.02	2.05	2.00	0.02
D2.1-V60-T80 - B	1.6 - 2.6	80	60	95.31	25	67.8	2.0	2.3	12.43	8.26	6.27	6.16	1.98	1.99	1.95	0.04
D2.1-V60-T80 - C	1.6 - 2.6	80	60	95.19	26	67.4	2.0	2.0	12.69	8.36	6.27	6.42	2.09	2.09	2.05	0.04
D4.4-V60-T120 - A	3.7 - 5.1	120	60	95.14	23	67.5	0.8	0.9	12.87	8.38	6.26	6.61	2.15	2.12	2.10	0.05
D4.4-V60-T120 - B	3.7 - 5.1	120	60	95.32	23	68.9	0.9	0.9	12.86	8.27	6.26	6.60	2.05	2.01	1.99	0.06
D4.4-V60-T120 - C	3.7 - 5.1	120	60	95.46	24	67.6	0.9	1.1	12.88	8.37	6.26	6.62	2.14	2.11	2.09	0.06
D2.1-V60-T120 - A	1.6 - 2.6	120	60	95.79	29	67.7	0.8	0.8	12.85	8.37	6.26	6.59	2.13	2.11	2.09	0.04
D2.1-V60-T120 - B	1.6 - 2.6	120	60	95.59	27	67.8	0.8	0.9	12.86	8.38	6.26	6.60	2.13	2.12	2.10	0.02
D2.1-V60-T120 - C	1.6 - 2.6	120	60	95.81	28	67.6	1.0	1.0	12.87	8.40	6.26	6.61	2.14	2.14	2.12	0.02
D4.4-V60-T180 - A	3.7 - 5.1	180	60	95.55	24	67.7	0.2	0.4	12.88	8.33	6.27	6.61	2.14	2.06	2.05	0.08
D4.4-V60-T180 - B	3.7 - 5.1	180	60	95.73	24	68.7	0.4	0.5	12.86	8.29	6.27	6.59	2.06	2.02	2.01	0.05
D4.4-V60-T180 - C	3.7 - 5.1	180	60	95.80	25	69.5	0.4	0.6	12.86	8.22	6.27	6.59	2.01	1.95	1.94	0.07
D2.1-V60-T180 - A	1.6 - 2.6	180	60	95.60	32	68.1	0.5	0.5	12.87	8.32	6.27	6.60	2.11	2.05	2.04	0.07
D2.1-V60-T180 - B	1.6 - 2.6	180	60	95.66	32	67.1	0.2	0.4	12.86	8.37	6.26	6.60	2.17	2.11	2.10	0.07
D2.1-V60-T180 - C	1.6 - 2.6	180	60	95.77	32	66.8	0.4	0.4	12.86	8.38	6.27	6.59	2.19	2.11	2.10	0.09
D4.4-V110-T80 - A	3.7 - 5.1	80	110	95.34	72	67.2	1.8	2.0	12.89	8.43	6.26	6.63	2.17	2.17	2.13	0.05
D4.4-V110-T80 - B	3.7 - 5.1	80	110	95.69	71	67.2	1.9	1.9	12.87	8.41	6.26	6.61	2.17	2.15	2.11	0.06
D4.4-V110-T80 - C	3.7 - 5.1	80	110	95.76	71	66.8	1.9	1.9	12.87	8.45	6.26	6.61	2.19	2.19	2.15	0.05
D2.1-V110-T80 - A	1.6 - 2.6	80	110	95.63	85	67.4	1.7	2.0	12.86	8.41	6.26	6.60	2.15	2.15	2.11	0.04
D2.1-V110-T80 - B	1.6 - 2.6	80	110	95.80	88	66.9	2.1	2.3	12.87	8.45	6.26	6.61	2.19	2.19	2.14	0.05
D2.1-V110-T80 - C	1.6 - 2.6	80	110	95.62	86	67.3	1.8	2.1	12.87	8.45	6.26	6.61	2.16	2.19	2.15	0.01
D4.4-V110-T120 - A	3.7 - 5.1	120	110	95.06	73	67.9	0.5	0.8	12.86	8.36	6.27	6.59	2.12	2.09	2.08	0.04
D4.4-V110-T120 - B	3.7 - 5.1	120	110	95.09	75	68.0	0.7	0.7	12.87	8.32	6.27	6.60	2.11	2.05	2.04	0.08
D4.4-V110-T120 - C	3.7 - 5.1	120	110	95.18	77	67.6	0.8	0.9	12.86	8.38	6.27	6.59	2.14	2.11	2.09	0.04
D2.1-V110-T120 - A	1.6 - 2.6	120	110	95.99	88	67.8	0.6	0.9	12.86	8.35	6.27	6.59	2.12	2.08	2.06	0.06
D2.1-V110-T120 - B	1.6 - 2.6	120	110	95.09	88	68.7	0.9	1.2	12.85	8.33	6.26	6.59	2.06	2.07	2.05	0.01
D2.1-V110-T120 - C	1.6 - 2.6	120	110	95.15	88	71.8	0.9	1.1	12.9	8.12	6.26	6.64	1.87	1.86	1.84	0.03
D4.4-V110-T180 - A	3.7 - 5.1	180	110	95.53	83	68.9	0.1	0.2	12.87	8.24	6.27	6.60	2.05	1.97	1.97	0.09
D4.4-V110-T180 - B	3.7 - 5.1	180	110	95.46	82	69.3	0.3	0.4	12.86	8.22	6.27	6.59	2.02	1.95	1.94	0.08
D2.1-V110-T180 - A	1.6 - 2.6	180	110	95.19	92	68.1	0.3	0.3	12.89	8.27	6.26	6.63	2.11	2.01	2.00	0.11
D2.1-V110-T180 - B	1.6 - 2.6	180	110	95.29	87	69.0	0.1	0.4	12.45	8.14	6.26	6.19	1.92	1.88	1.88	0.04
D2.1-V110-T180 - C	1.6 - 2.6	180	110	95.33	92	69.0	0.2	0.4	12.87	8.27	6.26	6.61	2.05	2.01	2.00	0.05
D4.4-V210-T80 - A	3.7 - 5.1	80	210	95.63	252	68.6	1.8	2.0	12.87	8.33	6.26	6.61	2.08	2.07	2.03	0.04
D4.4-V210-T80 - B	3.7 - 5.1	80	210	95.72	247	67.8	1.5	2.1	12.87	8.33	6.27	6.60	2.13	2.06	2.02	0.10
D4.4-V210-T80 - C	3.7 - 5.1	80	210	95.82	250	67.7	2.1	2.6	12.87	8.40	6.27	6.60	2.13	2.13	2.08	0.05
D2.1-V210-T80 - A	1.6 - 2.6	80	210	95.61	268	69.1	1.4	1.6	12.87	8.30	6.27	6.60	2.04	2.03	2.00	0.04
D2.1-V210-T80 - B	1.6 - 2.6	80	210	95.73	271	67.8	2.0	2.5	12.87	8.36	6.26	6.61	2.13	2.10	2.05	0.08
D2.1-V210-T80 - C	1.6 - 2.6	80	210	95.59	271	68.2	1.7	1.9	12.89	8.34	6.27	6.62	2.11	2.07	2.03	0.07
D4.4-V210-T120 - A	3.7 - 5.1	120	210	95.69	248	68.0	0.7	1.0	12.89	8.33	6.27	6.62	2.12	2.06	2.04	0.06
D4.4-V210-T120 - B	3.7 - 5.1	120	210	95.74	265	67.8	0.7	0.8	12.9	8.35	6.27	6.63	2.13	2.08	2.06	0.07
D4.4-V210-T120 - C	3.7 - 5.1	120	210	95.79	267	68.0	0.5	0.5	12.87	8.35	6.27	6.60	2.11	2.08	2.07	0.04
D2.1-V210-T120 - A	1.6 - 2.6	120	210	95.62	283	68.4	0.7	0.9	12.87	8.30	6.26	6.61	2.09	2.04	2.02	0.07
D2.1-V210-T120 - B	1.6 - 2.6	120	210	95.72	279	67.5	0.5	0.6	12.86	8.36	6.26	6.60	2.15	2.10	2.09	0.06
D2.1-V210-T120 - C	1.6 - 2.6	120	210	95.80	282	66.5	0.4	0.8	12.87	8.39	6.26	6.61	2.21	2.13	2.12	0.10
D4.4-V210-T180 - A	3.7 - 5.1	180	210	95.43	291	67.2	0.1	0.5	12.86	8.34	6.27	6.59	2.16	2.07	2.06	0.10
D4.4-V210-T180 - B	3.7 - 5.1	180	210	95.40	290	68.3	0.1	0.4	12.87	8.30	6.27	6.60	2.09	2.03	2.02	0.07
D4.4-V210-T180 - C	3.7 - 5.1	180	210	95.38	289	67.8	0.2	0.6	12.86	8.34	6.27	6.59	2.12	2.07	2.06	0.06
D2.1-V210-T180 - A	1.6 - 2.6	180	210	95.29	306	68.1	0.3	0.4	12.86	8.31	6.27	6.59	2.10	2.04	2.03	0.07
D2.1-V210-T180 - B	1.6 - 2.6	180	210	95.38	303	67.0	0.4	0.4	12.86	8.34	6.26	6.60	2.18	2.08	2.07	0.11
D2.1-V210-T180 - C	1.6 - 2.6	180	210	95.49	307	67.5	0.2	0.5	12.86	8.34	6.26	6.60	2.15	2.08	2.07	0.07

GRAN = granulometria do material; Te = temperatura de entrada do ar na estufa; G = vazão mássica inicial de ar; Patm = pressão atmosférica local; Pest = pressão estática do fluxo de ar a montante da placa de orifício; URi = umidade relativa inicial da sílica; URf_{sup} = umidade relativa final da sílica na camada superior, URf_{inf} = umidade relativa final da sílica na camada inferior; Pi = peso do conjunto bandeja/sílica no início; Pf = peso do conjunto bandeja/sílica no fim; Pband = peso da bandeja; m_{Lu} = massa inicial do leito; m_{Se,u} = massa inicial da sílica; m_{Ls} = massa final do leito; m_{Se,s} = massa final da sílica; PERDA = perda de massa de sílica durante o ensaio devido à fragmentação e arraste para fora da bandeja

$$m_{Lu} = Pi - Pband$$

$$m_{Ls} = Pf - Pband$$

$$m_{Se,u} = m_{Lu} \times URi$$

$$m_{Se,s} = m_{Ls} \times URf_{med}$$

$$\text{onde } URf_{med} = (URf_{sup} + URf_{inf})/2$$

elutriação de material particulado de tamanho menor que a abertura da tela do fundo da bandeja que é de 0,50 mm.

Na tabela 5.1, o balanço de massa do sistema, antes e depois da secagem, indica perda de até 110 gramas de material particulado - até 5,2 % em peso da sílica seca. Como era de se esperar, a maior perda ocorreu nas condições de secagem mais intensas: temperatura de entrada do ar de 180 °C e descarga de 110 kg/h e 210 kg/h .

O aumento da perda de sílica do leito com a intensidade de secagem apresenta oscilações entre os ensaios inclusive dentro da mesma configuração devido ao fato de ser praticamente impossível a repetibilidade do arranjo da sílica gel no leito.

5.2- Variação Granulométrica

Como visto no parágrafo anterior, a perda de sílica gel no leito é ocasionada pela redução de seu tamanho a valores inferiores ao da abertura da malha da tela da bandeja. Assim, visando tomar conhecimento da distribuição granulométrica da sílica gel ao final do processo de secagem, bem como verificar como ela varia com a intensidade da secagem, foram realizadas análises de peneira granulométrica, considerando as camadas superior e inferior do leito, conforme descrito anteriormente.

Os dados das análises foram reunidos nas duas faixas de granulometria ensaiadas, estando apresentados na tabela 5.2 e na figura 5.1 para sílica de granulometria inicial no intervalo 1,6 - 2,6 mm, e na tabela 5.3 e na figura 5.2 para sílica de granulometria inicial no intervalo 3,7 - 5,1 mm.

Os dados foram separados em quatro grupos: “estufa lab.”, descargas de 60 kg/h, 110 kg/h e 210 kg/h. Os dados chamados por “estufa lab.” correspondem a um processo lento de secagem realizado em estufa de laboratório, com o intuito de gerar sílica seca com o menor colapso possível do grão. A metodologia deste ensaio é apresentada no Anexo I.

A interpretação dos resultados evidencia que o método e os parâmetros de secagem do experimento afetam significativamente a distribuição granulométrica da sílica gel.

Tabela 5.2.- Distribuição granulométrica após a secagem da sílica com granulometria inicial no intervalo 1,6 - 2,6 mm. Amostra das camadas superior e inferior da sílica da bandeja para cada configuração e média aritmética

CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO	DISTRUBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)											
	M É D I A				SUPERFÍCIE DO LEITO				FUNDO DO LEITO			
	>1,68 (mm)	1,68<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)	>1,68 (mm)	1,68<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)	>1,68 (mm)	1,68<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)
ESTUFA LAB.	22.4	50.9	19.4	7.3								
V60-T80	8.4	46.5	37.5	7.5	9.6	45.7	37.2	7.5	7.2	47.4	37.8	7.6
V60-T120	7.4	49.4	34.3	9.0	6.6	48.6	35.9	8.9	8.1	50.1	32.7	9.0
V60-T180	4.7	45.5	42.1	7.7	4.1	43.3	44.2	8.4	5.4	47.7	39.9	7.0
V110-T80	5.3	43.3	41.1	10.3	5.2	41.7	42.8	10.3	5.4	44.9	39.4	10.3
V110-T120	4.2	46.7	40.6	8.5	3.8	46.6	41.4	8.2	4.6	46.8	39.9	8.8
V110-T180	2.5	34.3	48.5	14.7	2.3	33.6	49.1	15.0	2.8	35.0	47.8	14.3
V210-T80	3.9	41.0	41.7	13.4	3.2	40.3	43.5	13.0	4.5	41.8	40.0	13.8
V210-T120	2.9	36.0	50.5	10.6	2.5	34.9	51.8	10.7	3.2	37.1	49.1	10.5
V210-T180	3.0	39.3	49.7	8.1	3.2	39.3	49.6	7.9	2.7	39.2	49.7	8.3

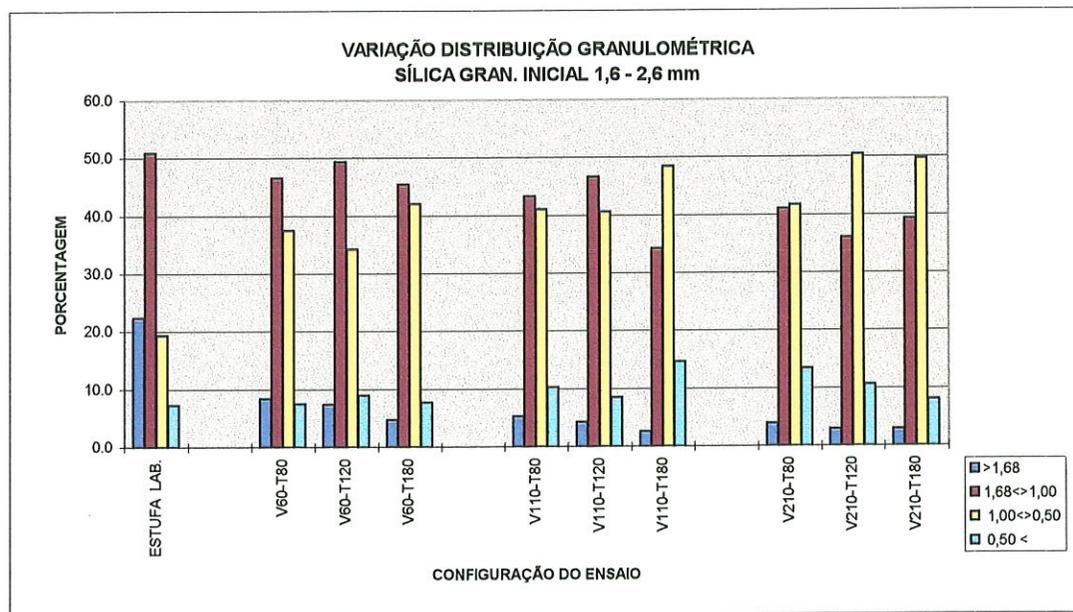


Figura 5.1.- Colapso do grão com a intensidade de secagem para sílica de gran. inicial 1,6 - 2,6 mm. Distribuição granulométrica

Tabela 5.3.- Distribuição granulométrica após a secagem da sílica com granulometria inicial no intervalo 3,7 - 5,1 mm. Amostra das camadas superior e inferior da sílica da bandeja para cada configuração e média aritmética

CONFIG. ENSAIO	DISTRUBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)														
	MÉDIA					SUPERFÍCIE DO LEITO					FUNDO DO LEITO				
	>3.36 (mm)	3.36<>2,00 (mm)	2,00<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)	>3.36 (mm)	3.36<>2,00 (mm)	2,00<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)	>3.36 (mm)	3.36<>2,00 (mm)	2,00<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)
ESTUFA LAB.	3.3	40.2	32.8	14.8	9.0										
V60-T80	0.9	15.4	42.4	26.9	14.4	0.7	14.9	41.6	27.7	15.1	1.1	15.8	43.2	26.2	13.7
V60-T120	0.0	13.6	43.9	30.0	12.5	0.0	15.9	45.1	27.8	11.1	0.0	11.3	42.8	32.1	13.8
V60-T180	0.0	9.7	49.0	28.8	12.4	0.0	9.7	49.4	29.2	11.7	0.1	9.7	48.7	28.5	13.1
V110-T80	0.1	10.4	44.2	31.4	13.9	0.1	11.5	46.1	29.6	12.7	0.0	9.3	42.4	33.3	15.1
V110-T120	0.2	14.5	50.9	25.1	9.3	0.2	14.1	53.1	25.2	7.5	0.2	14.9	48.7	25.0	11.2
V110-T180	0.1	6.1	45.9	34.6	13.2	0.0	10.0	47.6	32.7	9.7	0.1	2.3	44.3	36.5	16.7
V210-T80	0.1	11.3	49.8	28.3	10.5	0.1	11.6	51.4	27.3	9.6	0.1	11.0	48.1	29.3	11.5
V210-T120	0.0	6.5	48.6	32.9	12.1	0.0	5.9	51.7	30.6	11.8	0.0	7.1	45.5	35.1	12.3
V210-T180	0.0	2.1	52.5	38.8	6.6	0.1	1.9	53.2	39.3	5.5	0.0	2.3	51.8	38.3	7.7

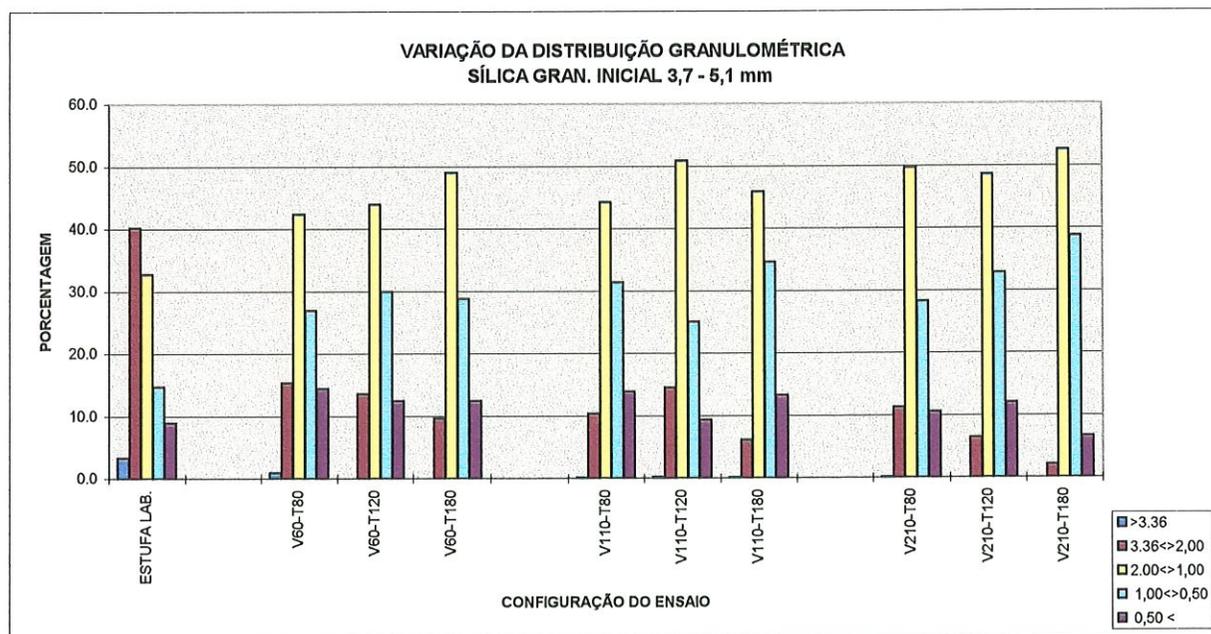


Figura 5.2.- Colapso do grão com a intensidade de secagem para sílica de gran. inicial 3,7 - 5,1 mm. Distribuição granulométrica

Conforme a intensidade de secagem aumenta, ocorre o deslocamento da maior concentração de tamanho de grãos da faixa 3,36 - 2,00mm para a faixa 2,00 - 1,00mm , para sílica de granulometria inicial 3,7 - 5,1 mm. Nesta faixa de granulometria inicial da sílica, praticamente inexistem grãos no fim da secagem.

Para sílica de granulometria inicial 1,6 - 2,6mm, a intensidade da secagem reflete menos na granulometria final. Há o deslocamento da maior concentração de tamanho de grãos da faixa 1,68 - 1,00mm para a faixa 1,00 - 0,50mm na configuração V110-T180 e nas três configurações de maior descarga.

Este comportamento pode ser explicado pelo fato de existir, na sílica de maior granulometria, maior diferença de concentração de teor de umidade entre a superfície e o centro do grão e, conseqüentemente, maior tensão de capilaridade e maior colapso, conforme descrito por Simpkins *et al* (1989).

Portanto, tanto o aumento da descarga como o aumento da temperatura tendem a aumentar o colapso do grão, tendência que pode ser verificada através da comparação da quantidade de sílica presente em cada faixa granulométrica, quando se altera um dos parâmetros da configuração, mantendo o outro constante.

A presença de quantidade razoável de finos nas análises (chegando a até 14,4 % para sílica de granulometria inicial de 1,6 - 2,6 mm) quando comparada com a quantidade elutriada apresentada na tabela 5.1, leva-nos a seguinte consideração: embora as configurações de temperatura e vazão utilizadas na secagem sejam suficientes para causar o colapso da sílica e a geração de finos, a faixa de vazão utilizada não é grande bastante para causar a elutriação dos finos “encaixados” e aderidos aos grãos maiores.

No Anexo 1 apresentamos:

- metodologia para execução do teste de peneiramento da sílica;
- procedimento de secagem para o ensaio denominado “estufa lab” com os patamares de temperatura;
- resultados analíticos para as sílicas de granulometria 1,6 - 2,6 mm e 3,7 - 5,1 mm em cada combinação;
- análise de confiabilidade da metodologia do teste de peneiramento;
- tabelas englobando todos os ensaios realizados e separados nas duas faixas granulométricas.

5.3- Variação microscópica da sílica.

Como descrito no capítulo 1, a área superficial e o volume dos poros dos grãos de sílica são importantes para a caracterização do seu uso. Deste modo, realizamos ensaios em aparelho BET para o material resultante de cada configuração do experimento e verificamos o comportamento destes parâmetros. Devido ao custo da análise, escolhemos um ensaio de cada configuração. Os valores coletados estão reunidos na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Análise microscópica da sílica gel. Valores determinados da Área Superficial, AS, e do Volume dos Poros, PV.

	AS camada superior (m ² /g)	AS camada inferior (m ² /g)	PV camada superior (cc/g)	PV camada inferior (cc/g)
D2.1-V60-T80-A	434	415	1,08	1,07
D2.1-V60-T120-A	481	294	1,03	1,00
D2.1-V60-T180-C	601	589	1,02	1,00
D2.1-V110-T80-B	296	304	1,24	1,26
D2.1-V110-T120-A	543	535	1,12	1,10
D2.1-V110-T180-A	415	431	1,33	1,29
D2.1-V210-T80-B	361	380	1,48	1,42
D2.1-V210-T120-A	429	378	1,30	1,38
D2.1-V210-T180-A	448	516	1,32	1,38
D4.4-V60-T80-A	470	468	1,05	1,08
D4.4-V60-T120-C	384	395	1,08	1,04
D4.4-V60-T180-B	425	418	1,12	1,15
D4.4-V110-T80-B	527	511	0,97	1,02
D4.4-V110-T120-B	534	523	1,00	1,05
D4.4-V110-T180-A	328	314	1,23	1,21
D4.4-V210-T80-B	355	379	1,27	1,24
D4.4-V210-T120-B	374	395	1,42	1,34
D4.4-V210-T180-A	435	427	1,22	1,21

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam os gráficos de variação da área superficial da sílica, respectivamente para a granulometria inicial de 1,6 - 2,6 mm e 3,7 - 5,1 mm. Uma análise por regressão linear indica, em ambos os casos, uma leve tendência de queda da área superficial com o aumento da intensidade de secagem, o que está em linha com os registros da Crosfield Brasil Ltda. Dois comentários merecem destaque:

- em condições de produção, com a temperatura de secagem do forno variando de 250 a 450 °C, uma maior variação na área superficial é obtida, o que leva nos a admitir que: quanto maior o choque térmico da sílica, maior é a tendência de queda da área superficial, devido ao rompimento da rede microestrutural do grão.

- a variação dos valores coletados nos ensaios, pode ser explicada pelo fato da sílica gel de cada ensaio ter sido produzida em lotes diferentes, de dias diferentes (a produção é manual, e depende do controle do operador). Estes valores coletados sugerem que trabalhos de melhoria nas unidades produtivas de gelificação, lavagem e envelhecimento da sílica gel podem ser realizados para que uma melhor consistência de produção possa ser alcançada, com reflexos na qualidade do produto.

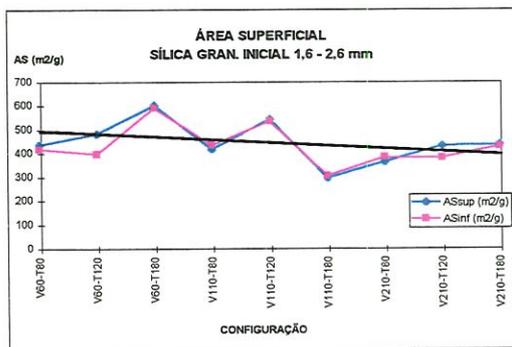


Figura 5.3- Variação da área superficial em função da configuração do ensaio. Sílica granulometria inicial 1,6 - 2,6 mm

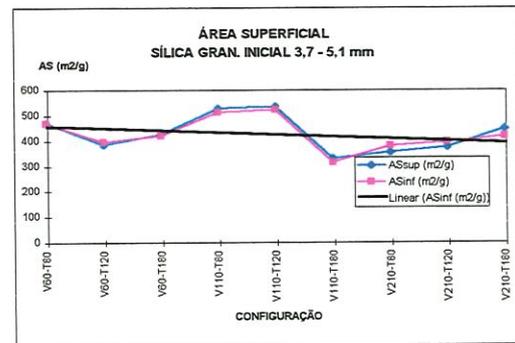


Figura 5.4- Variação da área superficial em função da configuração do ensaio. Sílica granulometria inicial 3,7 - 5,1 mm

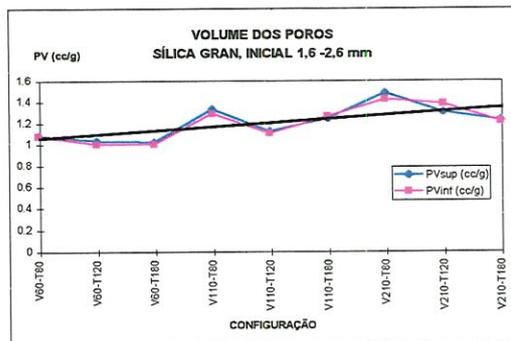


Figura 5.5- Variação do volume do poro em função da configuração do ensaio. Sílica granulometria inicial 1,6 - 2,6 mm

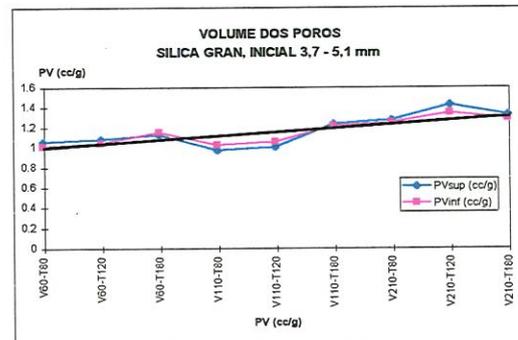


Figura 5.6- Variação do volume do poro em função da configuração do ensaio. Sílica granulometria inicial 3,7 - 5,1 mm

As figuras 5.5 e 5.6 referem-se à variação do volume dos poros da sílica gel para as duas faixas de granulometria inicial. Verifica-se, também, que os resultados experimentais seguem os registros da empresa, mostrando uma relação direta com a intensidade de secagem. Os dois comentários acima para a variação da área superficial são pertinentes também para a variação do volume dos poros. Em linha de produção, valores do volume dos poros de 1,2 - 1,4 cc/g são obtidos.

Das quatro figuras vê-se que não há diferenças de valores entre as camadas superior e inferior da bandeja, o que ratifica o fato da curva de secagem ser praticamente idêntica em todas as camadas do leito.

5.4- Análise do processo de secagem

Foram realizados cinquenta e três ensaios cobrindo as dezoito combinações de secagem estudadas. Conforme descrito na seção 4.5, cada ensaio foi apresentado por uma planilha reunindo, além de dados de processo, dois gráficos, que foram representados por curva de tendência para facilitar a análise do processo de secagem.

Na análise de cada ensaio, cuidado foi tomado na utilização dos dados iniciais, particularmente os que se referem à variação de pressão no leito, devido ao tempo de ajuste da bandeja no berço e fechamento da porta da estufa. Os primeiros dois a três pontos coletados deste parâmetro, após a introdução da bandeja, não foram considerados nos cálculos.

Uma planilha típica do processo de secagem é apresentada pela figura 5.7, para a granulometria na faixa de 1,6 - 2,6 mm. Nos gráficos, vê-se claramente os dois períodos de secagem: período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente, como previamente apresentado por Marshall & Hougen (1942), Allerton *et al* (1949) e Rajan & Ibrahim (1984).

No período de taxa de secagem constante, a temperatura do ar de saída é constante, e praticamente igual a temperatura de saturação adiabática nas condições do ar de entrada. Quando se inicia o período de taxa de secagem decrescente, a temperatura do ar de saída começa a subir, devido a diminuição da quantidade de sílica úmida remanescente no leito.

ENSAIO D2.1-V60-T180 - C

dados da secagem

RU1103C

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 66.8$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.402$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{sp} = 2.188$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 29.4$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.023$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 180.2$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.4$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -1.5$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 147$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 104$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.71$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 35.7$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 38.9$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 59.2$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 55.6$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 22.0$ mmca

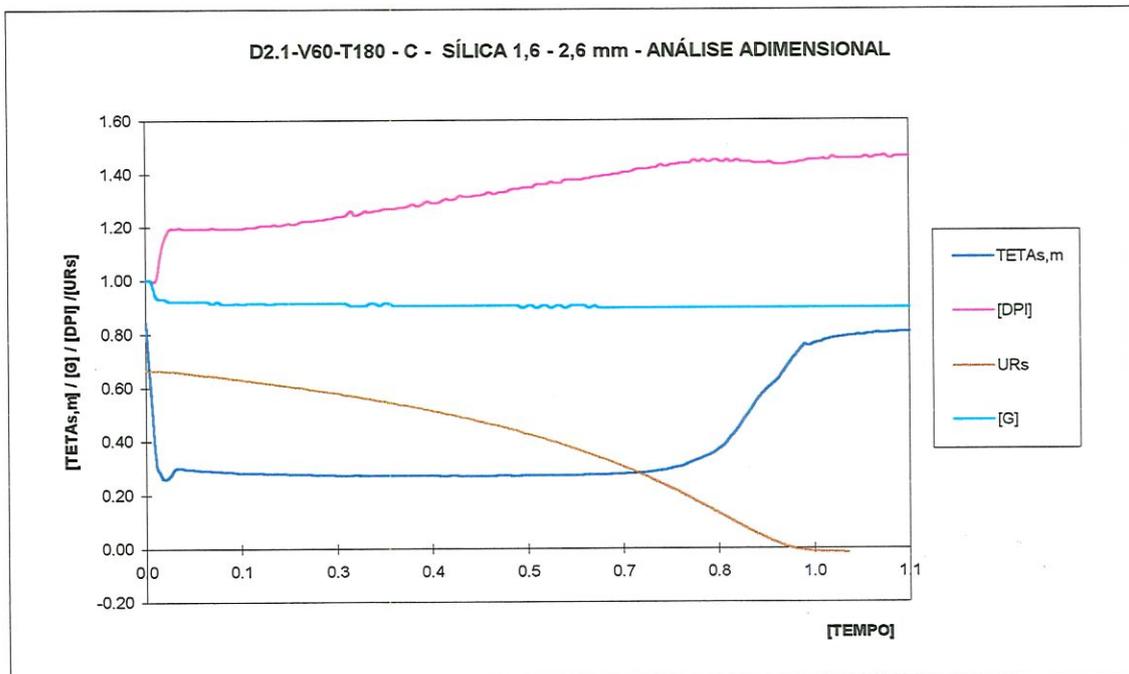
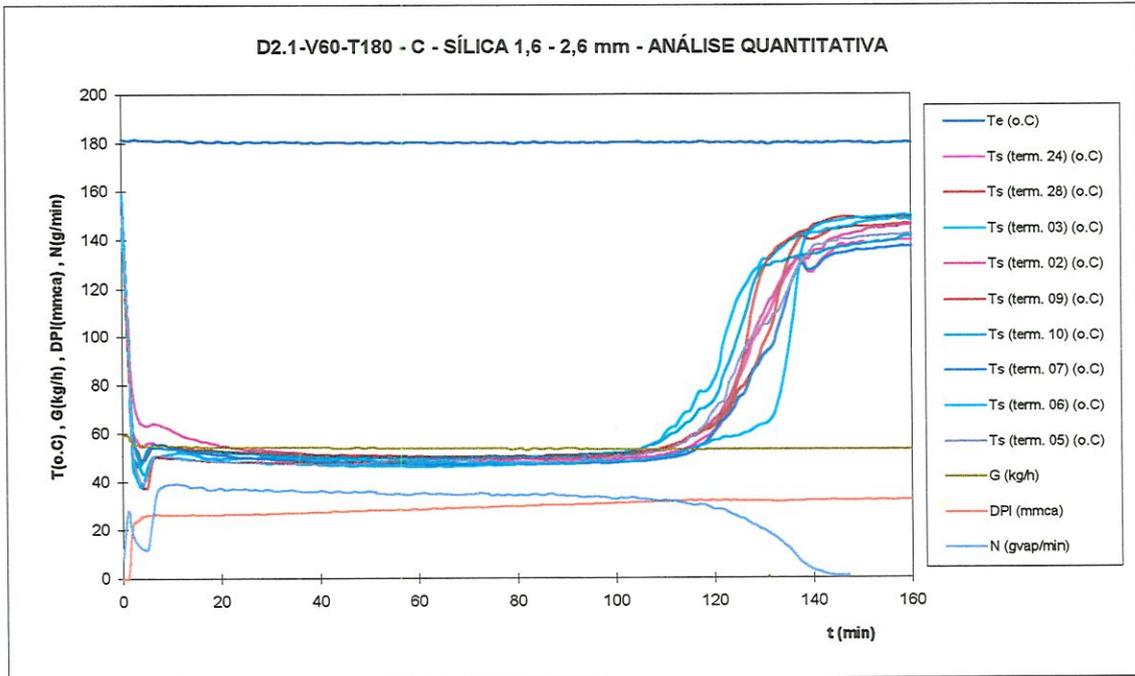


Figura 5.7- Resultado do ensaio D2.1-V60-T180 - C

No fim da secagem, o ar de saída atinge um patamar próximo ao do ar de entrada, sendo esta diferença de temperatura ocasionada pelas trocas de calor no leito e na câmara de secagem.

O início do processo de secagem chama a atenção, por haver uma rápida queda da temperatura do ar de saída até um valor mínimo e a subsequente elevação da temperatura até a temperatura de saturação adiabática do ar. A presença desta “gota” térmica é representada na figura 2.2 da Fundamentação Teórica pelo trecho A-B, e refere-se a um processo de ajuste na taxa de secagem, explicado como segue:

- no início da secagem, a sílica gel encontra-se a temperatura ambiente, que é inferior a temperatura de saturação adiabática do ar de secagem;
- o ar que atravessa o leito troca calor e massa com a sílica, tendo sua temperatura reduzida até próximo da temperatura de saturação adiabática;
- a saturação do ar ocorre dentro do leito, havendo, a partir deste ponto, somente troca de calor entre o ar saturado e a camada remanescente de sílica úmida;
- com a troca de calor, ocorre a queda da temperatura do ar saturado e, conseqüentemente, diminuição na sua capacidade de absorção de umidade. Deste modo, pequena parte da umidade do ar volta a condensar no leito de sílica. Há, portanto, uma menor taxa de secagem no início do processo, determinada indiretamente através da leitura da TBS eTBU do ar de saída ou diretamente pela pesagem do próprio leito, como nos trabalhos de Marshall & Hougen (1942), Allerton *et al* (1949) e Rajan & Ibrahim (1984).
- em poucos minutos a sílica úmida tem sua temperatura elevada até a temperatura de saturação adiabática do ar de secagem, com a taxa de secagem atingindo seu ponto máximo.

Para o período de taxa de secagem constante, os valores lidos pelos nove termopares localizados na saída da câmara de secagem foram bem homogêneos, apresentando mínima variação para todos os ensaios realizados. Por outro lado, a leitura destes termopares durante o período de taxa de secagem decrescente apresentou-se não homogênea, muito embora, para a maioria dos ensaios realizados, esta não homogeneidade refletiu em uma pequena variação no tempo de secagem entre os nove pontos, como pode ser visto nas figuras 5.7 e 5.8.

Em um significativo número de ensaios, porém, percebeu-se razoáveis diferenças no tempo de secagem entre as regiões do leito. Em valores absolutos, chegaram a até 60 minutos, como observado no ensaio da figura 5.9. Em termos relativos, chegam a até 32 % do tempo total de secagem em outras configurações. Estes números, porém, são bem menores que os medidos

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.620$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.6$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{0,0} = 4.475$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.145$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 27.0$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.021$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 119.1$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 1.1$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 1.0$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 215$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 151$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.70$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 23.6$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 24.6$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(p,band)} = 60.5$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 59.5$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 6.9$ mmca

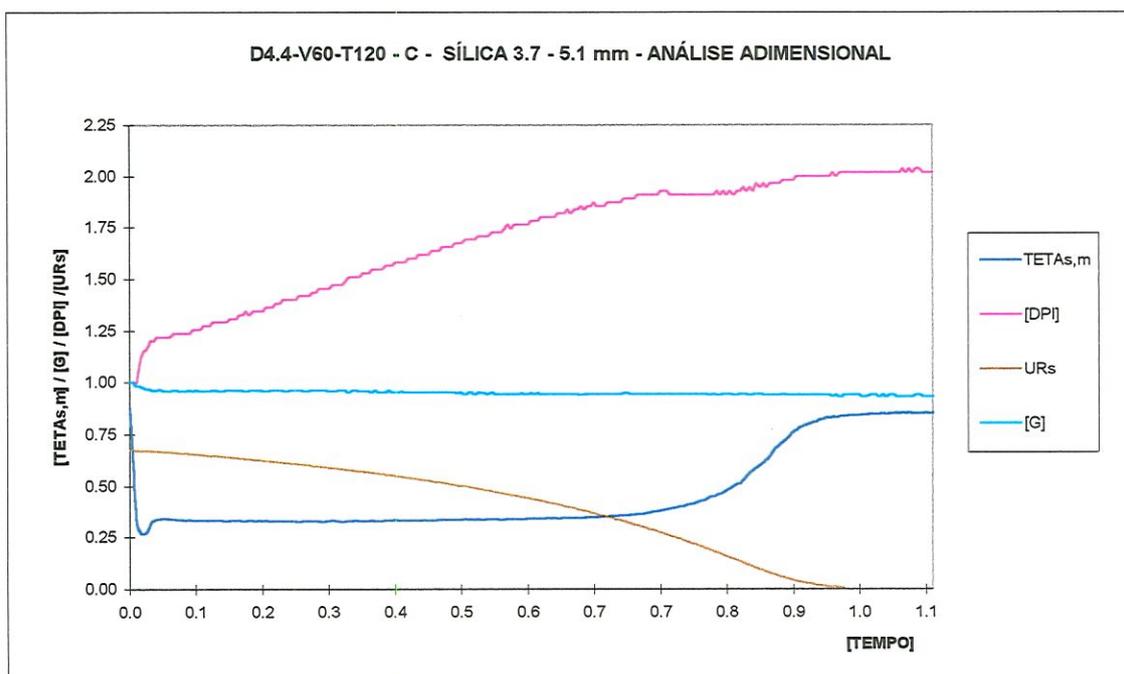
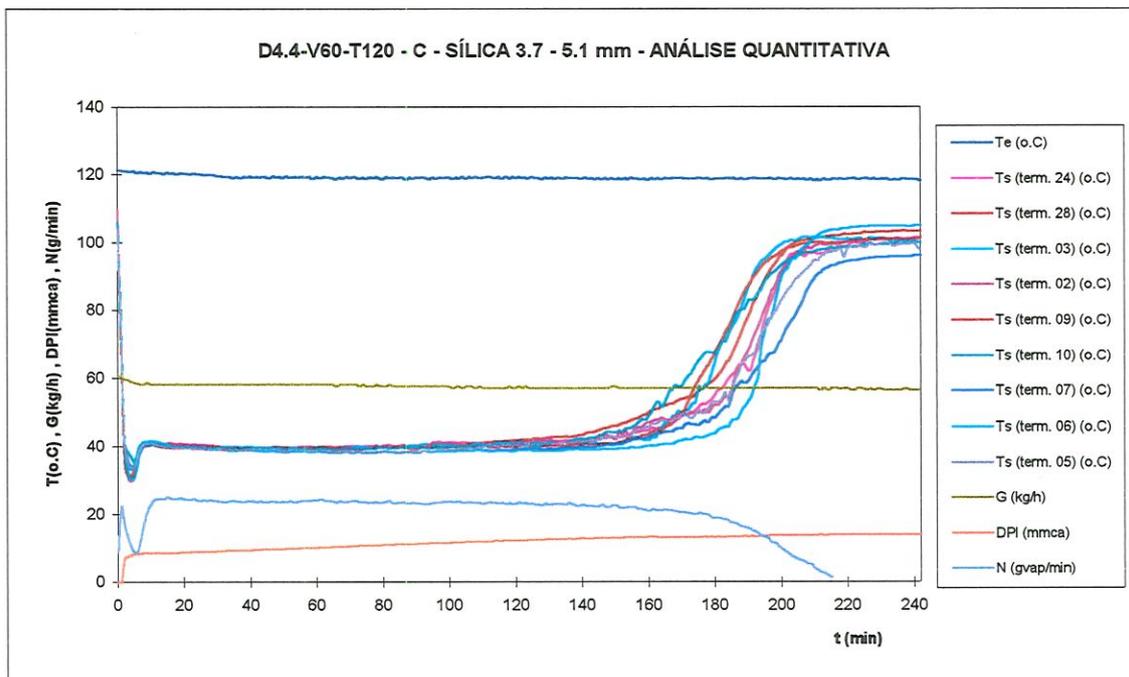


Figura 5.8- Resultado do ensaio D4.4-V60-T120 - C

ENSAIO D4.4-V60-T80 -A

dados da secagem

RU1028B

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.2$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.428$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.162$ kg sílica

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 2.2$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 6.1$ %

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 14.5$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 15.6$ g/min

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 30.1$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.021$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 79.7$ o.C

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 333$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 226$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $t_r = 0.68$

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 60.1$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 58.1$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 8.9$ mmca

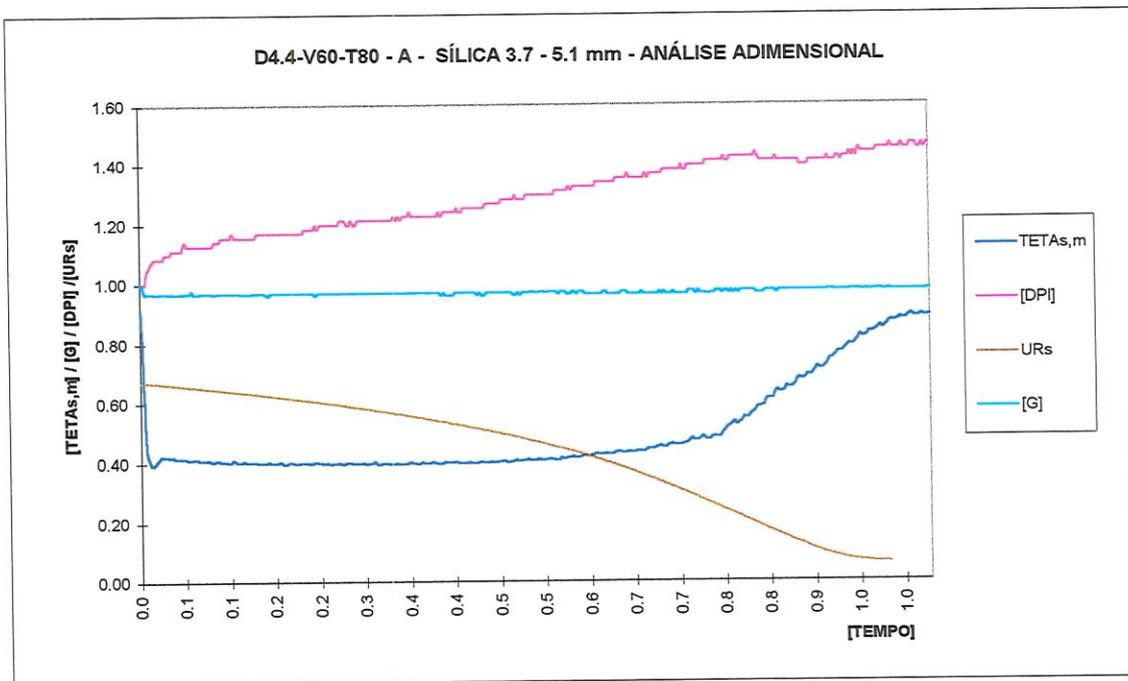
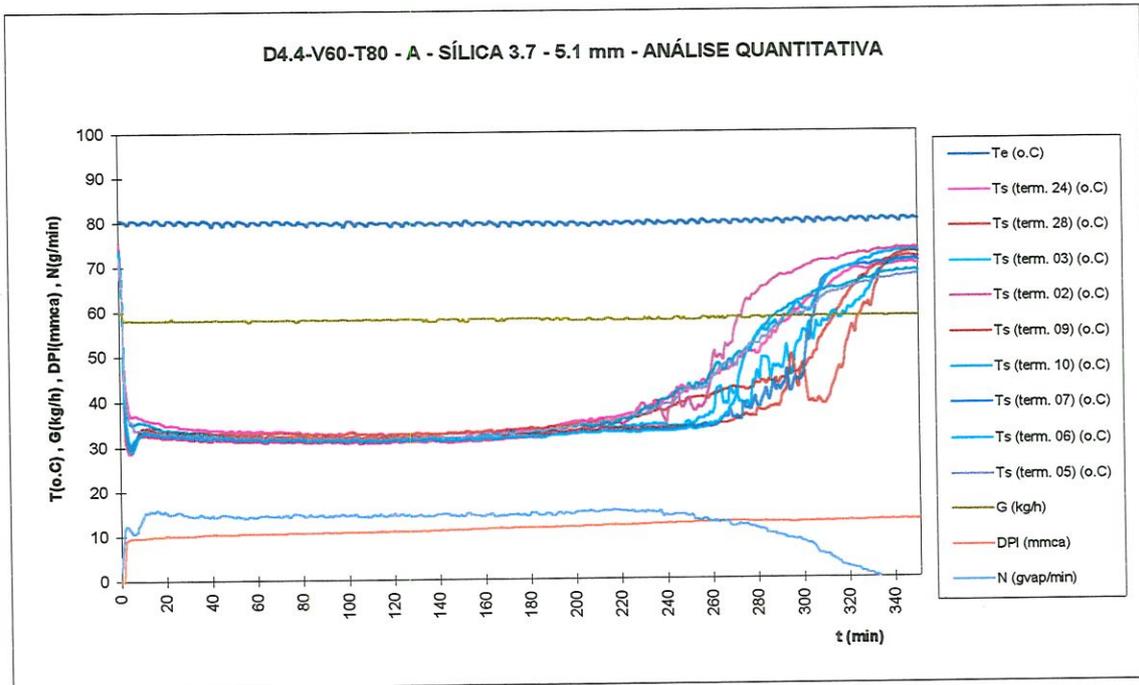


Figura 5.9- Resultado do ensaio D4.4-V60-T80 -A

durante a fase de ajuste do sistema experimental. Como as variações na umidade inicial da sílica dentro do leito são da ordem de 1 %, as diferenças verificadas no tempo de secagem entre as regiões do leito devem-se basicamente a dois fatores: dificuldade na formação de um leito homogêneo de material e, aparecimento de caminhos preferenciais no fluxo de ar durante a secagem, o que causa o desequilíbrio da taxa da secagem ao longo da seção transversal do leito.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram para a sílica de granulometria de 3,7 a 5,1 mm, o problema da oscilação da temperatura de saída durante o período de taxa de secagem decrescente. A explicação para este comportamento deveu-se a combinação dos dois fatores apresentados no parágrafo anterior com o fenômeno de colapso do grão de sílica, ou seja: com a heterogeneidade do leito e a formação de caminhos preferenciais, a temperatura do ar de saída em algumas regiões do leito subiu rapidamente; com o colapso do grão o caminho preferencial foi “fechado” por grãos menores de sílica com maior teor de umidade em sua superfície, de modo que ocorreu uma queda momentânea na temperatura do ar de saída. Este comportamento também ocorreu em alguns ensaios com sílica de granulometria de 1,6 a 2,6 mm, como mostra a figura 5.11.

Os principais dados do processo de secagem de cada ensaio foram agrupados na tabela 5.5 abaixo, e foram reunidos para cada configuração de ensaio formando a tabela 5.6. As tabelas apresentam o valor da umidade relativa final do leito obtido por dois meios distintos: medição em laboratório e cálculo via balanço de massa da água, apresentado na seção 4.2. Na maioria dos ensaios, a aproximação dos valores foi razoável, como pode ser visto na figura 5.12.

Desta figura, vemos que, para os ensaios com temperatura do ar de 80 °C, com exceção aos ensaios com a maior taxa de descarga de ar, o valor calculado da umidade relativa foi sempre maior que o medido em laboratório, indicando uma sub-avaliação da taxa de secagem. Inversamente, para temperatura do ar de 180 °C, o valor calculado da umidade relativa tendeu a ser menor que o medido em laboratório, chegando a apresentar valores negativos, o que fisicamente não é possível. Este fato foi acentuado para a maior descarga de ar, 210 kg/h.

ENSAIO D4.4-V110-T120 - B dados da secagem

RU1111B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 33.1$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.021$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.488$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 119.3$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.112$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.7$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_T = 121$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 4.0$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 73$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.60$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 45.5$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 109.9$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 51.1$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 105.0$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 20.8$ mmca

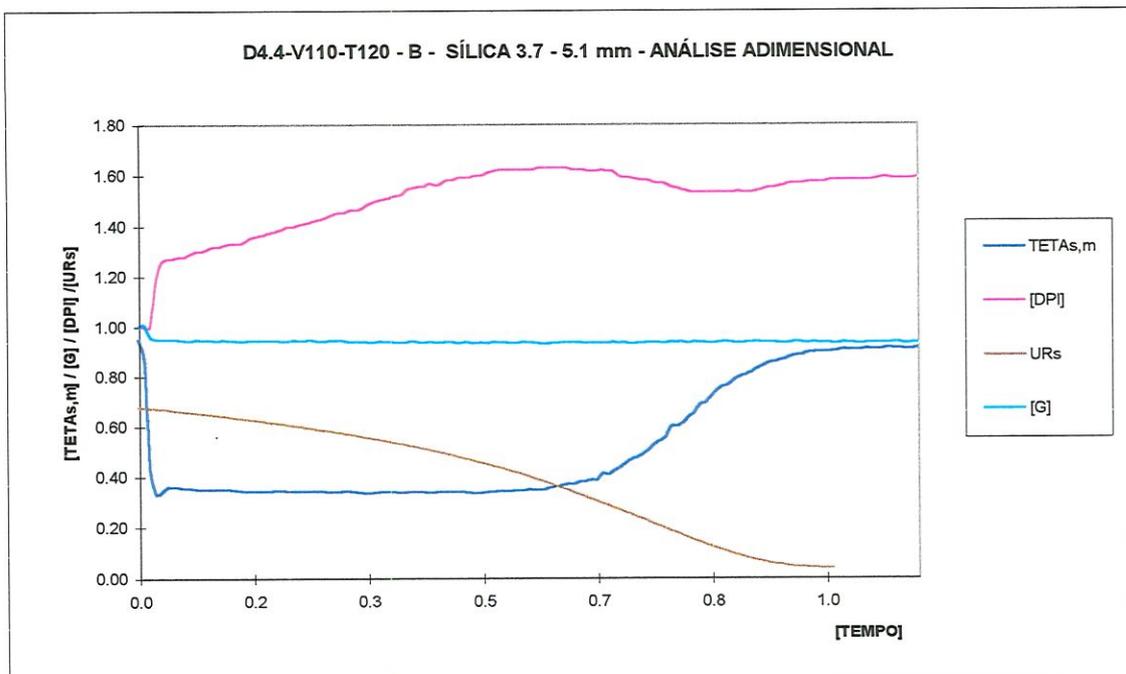
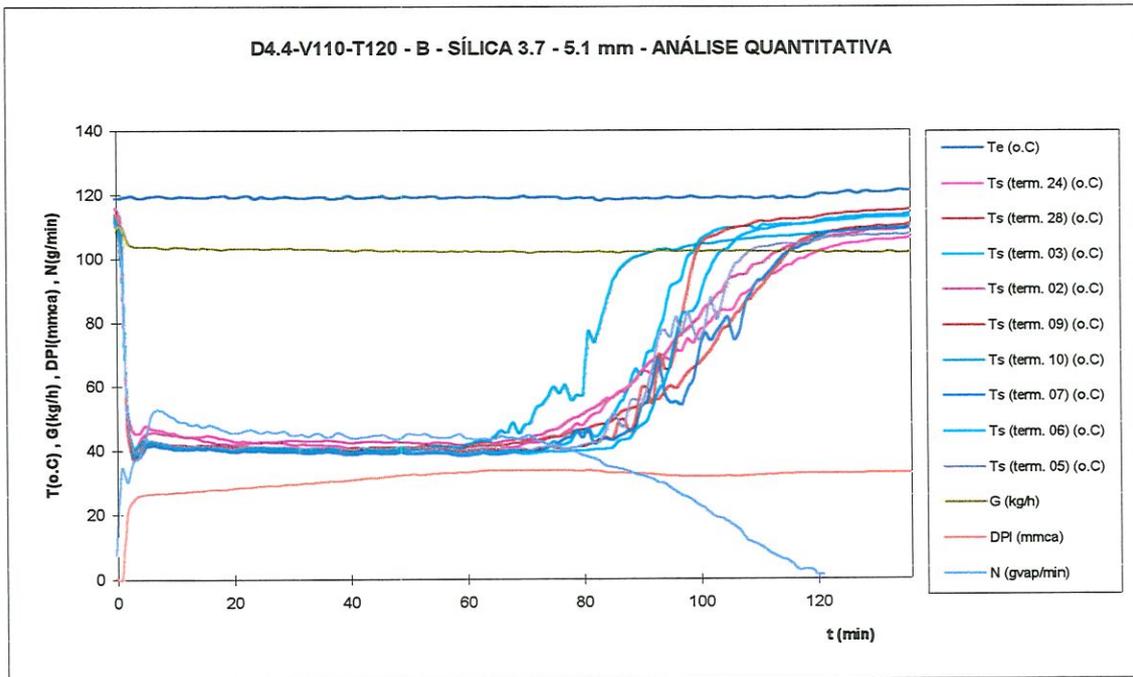


Figura 5.10- Resultado do ensaio D4.4-V110-T120 - B

ENSAIO D2.1-V110-T120 - C dados da secagem

RU1113A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 68.7$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.527$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.063$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 29.4$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.020$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 122.5$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 1.1$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 6.3$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_T = 137$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_f = 84$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_f = 0.61$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 37.8$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 46.6$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 110.8$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 97.8$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 58.1$ mmca

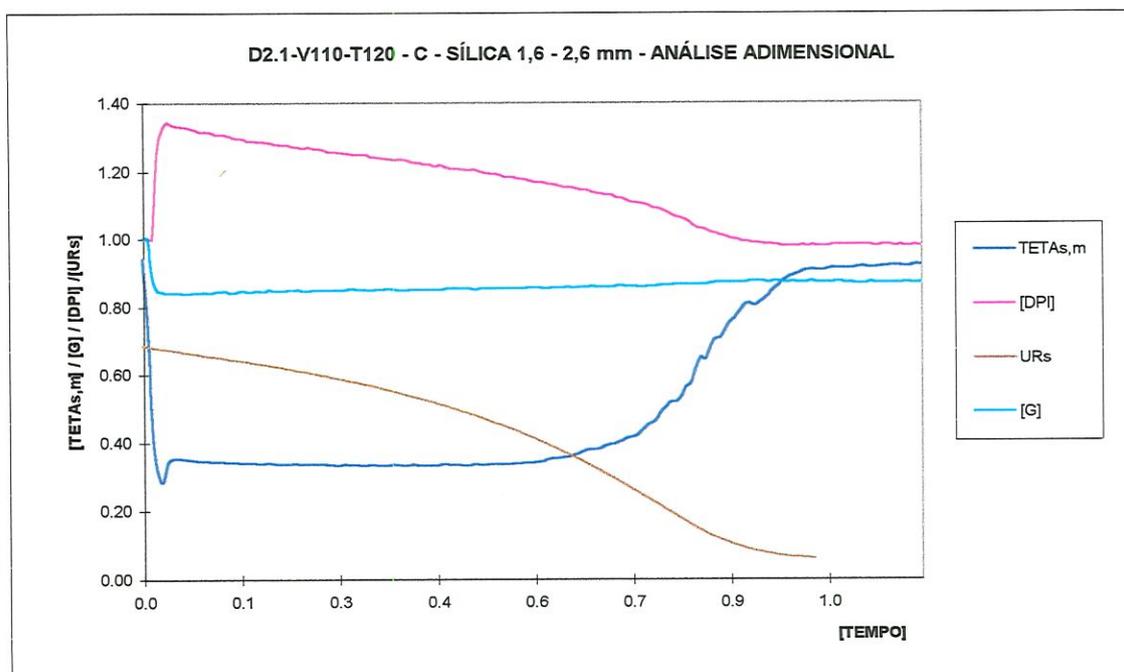
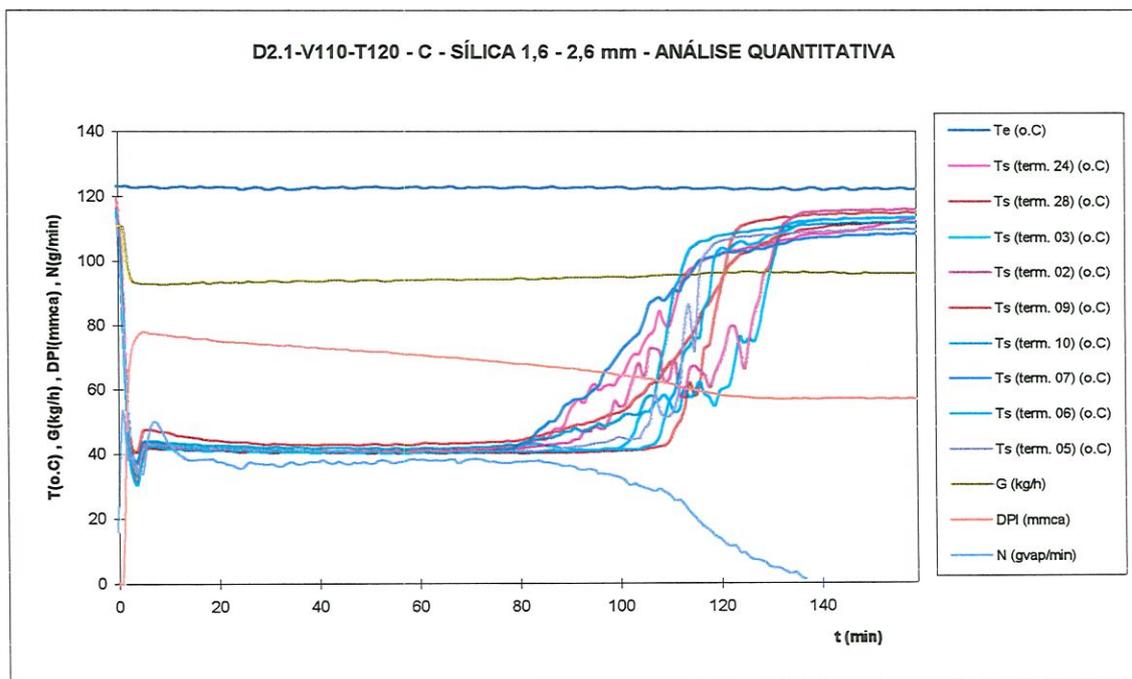


Figura 5.11- Resultado do ensaio D2.1-V110-T120 - C

TABELA 5.5 - Resumo dos principais parâmetros do processo de secagem para cada ensaio realizado.

	N* médio (g/min)	Ts** média (°C)	UR _{L,f,med} (%)	UR _{L,f,cal} (%)	t (min)	τ	[G] início	[G] fim secagem	DPI (mmca)	[DP] pto crítico	[DP] fim secagem
D4.4-V60-T80 - A	14.5	32.4	2.2	6.1	333	0.68	0.97	0.97	8.9	1.35	1.45
D4.4-V60-T80 - B	13.9	33.5	1.9	12.6	347	0.77	0.98	0.93	8.6	1.31	1.28
D4.4-V60-T80 - C	14.3	33	2.1	3.8	341	0.72	0.97	0.96	8.3	1.78	1.85
D2.1-V60-T80 - A	13.2	32.9	2.7	7.3	340	0.84	0.95	0.93	18.3	1.24	1.25
D2.1-V60-T80 - B	13.7	33.2	2.2	4.9	325	0.82	0.96	0.94	16.3	1.44	1.48
D2.1-V60-T80 - C	14.1	33.4	2.0	5.7	338	0.84	0.95	0.91	17.4	1.17	1.17
D4.4-V60-T120 - A	24.4	39.1	0.9	1.6	213	0.67	0.97	0.93	7.9	1.62	1.73
D4.4-V60-T120 - B	21.9	40.1	0.9	11.0	222	0.65	0.97	0.95	9.4	1.87	2.04
D4.4-V60-T120 - C	23.6	39.9	1.1	1.0	215	0.70	0.98	0.94	6.9	1.89	2.02
D2.1-V60-T120 - A	23.3	39.9	0.8	1.7	210	0.78	0.96	0.93	19.4	1.30	1.36
D2.1-V60-T120 - B	21.5	41.4	0.9	4.9	243	0.63	0.93	0.91	18.6	1.24	1.22
D2.1-V60-T120 - C	22.8	40.5	1.0	-1.8	227	0.67	0.95	0.93	15.3	1.50	1.47
D4.4-V60-T180 - A	38.5	47.9	0.3	-2.4	141	0.60	0.98	0.93	6.5	2.56	3.10
D4.4-V60-T180 - B	40.7	47.8	0.5	4.9	139	0.61	0.98	0.94	7.3	2.17	2.71
D4.4-V60-T180 - C	38.7	46.1	0.5	0.2	143	0.60	0.97	0.96	7.1	1.74	1.93
D2.1-V60-T180 - A	38.8	48.3	0.5	-2.1	145	0.68	0.94	0.90	22.9	1.49	1.50
D2.1-V60-T180 - B	38.4	48.4	0.3	-2.6	137	0.74	0.93	0.90	23.9	1.36	1.41
D2.1-V60-T180 - C	35.7	49.3	0.4	-1.5	147	0.71	0.93	0.89	22.0	1.41	1.45
D4.4-V110-T80 - A	29.0	35.3	1.9	4.2	178	0.69	0.95	0.93	22.6	1.43	1.25
D4.4-V110-T80 - B	27.0	34.8	1.9	5.4	179	0.73	0.96	0.95	18.6	1.42	1.50
D4.4-V110-T80 - C	28.1	34.2	1.9	5.2	179	0.64	0.96	0.96	18.4	1.15	1.12
D2.1-V110-T80 - A	24.1	34.7	1.9	6.9	197	0.75	0.88	0.88	49.4	1.35	1.27
D2.1-V110-T80 - B	25.5	33.7	2.2	5.5	192	0.73	0.86	0.91	66.5	0.85	0.75
D2.1-V110-T80 - C	24.6	34.1	2.0	9.0	191	0.75	0.88	0.86	60.8	1.10	1.06
D4.4-V110-T120 - A	40.0	40.6	0.7	22.0	116	0.59	0.96	0.92	17.1	1.85	2.10
D4.4-V110-T120 - B	45.5	40.8	0.7	4.0	121	0.60	0.95	0.93	20.8	1.63	1.58
D4.4-V110-T120 - C	47.5	40.3	0.9	2.8	113	0.65	0.95	0.90	25.1	2.06	2.07
D2.1-V110-T120 - A	43.5	41.4	0.8	1.3	120	0.72	0.88	0.87	53.3	1.21	1.18
D2.1-V110-T120 - B	43.6	40.8	1.1	0.6	123	0.67	0.89	0.90	57.9	1.03	0.97
D2.1-V110-T120 - C	37.8	41.4	1.1	6.3	137	0.61	0.89	0.87	58.1	1.16	0.98
D4.4-V110-T180 - A	75.1	48.7	0.2	-3.1	75	0.64	0.95	0.90	25.4	1.83	2.00
D4.4-V110-T180 - B	72.7	47.9	0.4	-4.3	78	0.59	0.95	0.91	21.4	1.38	1.36
D2.1-V110-T180 - A	67.2	48.5	0.3	1.8	75	0.68	0.90	0.83	53.8	1.52	1.53
D2.1-V110-T180 - B	63.4	49.7	0.3	-3.8	75	0.64	0.90	0.86	35.1	1.99	2.04
D2.1-V110-T180 - C	61.7	48.2	0.3	6.2	79	0.67	0.89	0.84	38.6	2.12	2.09
D4.4-V210-T80 - A	54.0	34.1	1.9	-4.2	106	0.62	0.95	0.89	59.0	2.04	2.09
D4.4-V210-T80 - B	55.4	34.7	1.8	4.7	91	0.68	0.96	0.94	50.1	1.27	1.36
D4.4-V210-T80 - C	56.2	34.4	2.4	-1.4	94	0.68	0.96	0.93	56.3	1.44	1.52
D2.1-V210-T80 - A	53.6	34.2	1.5	0.3	104	0.69	0.87	0.88	108.6	1.02	0.92
D2.1-V210-T80 - B	50.8	34.1	2.3	1.1	104	0.72	0.86	0.87	115.0	1.05	0.98
D2.1-V210-T80 - C	50.2	34.1	1.8	-1.6	105	0.73	0.86	0.87	120.0	0.96	0.91
D4.4-V210-T120 - A	96.3	40.8	0.9	0.0	63	0.59	0.94	0.91	69.8	1.52	1.53
D4.4-V210-T120 - B	96.7	40.8	0.8	6.2	59	0.64	0.95	0.89	60.8	1.74	2.16
D4.4-V210-T120 - C	98.5	40.2	0.5	-2.8	60	0.63	0.95	0.91	70.0	1.67	1.77
D2.1-V210-T120 - A	85.9	39.8	0.8	-0.7	64	0.69	0.87	0.85	113.1	1.15	1.05
D2.1-V210-T120 - B	87.5	40.1	0.6	-5.3	61	0.67	0.90	0.86	91.3	1.38	1.35
D2.1-V210-T120 - C	90.7	39.3	0.6	-7.5	60	0.73	0.89	0.86	105.0	1.24	1.21
D4.4-V210-T180 - A	160.5	48.1	0.3	-12.5	40	0.73	0.93	0.89	86.1	1.68	1.61
D4.4-V210-T180 - B	133.9	48.7	0.3	-29.8	40	0.68	0.94	0.89	77.6	1.79	1.79
D4.4-V210-T180 - C	145.1	48.8	0.4	-14.7	41	0.63	0.95	0.89	70.1	1.93	2.05
D2.1-V210-T180 - A	136.7	48.2	0.4	-37.4	38	0.66	0.86	0.83	126.7	1.24	1.20
D2.1-V210-T180 - B	135.0	48.5	0.4	-12.3	41	0.51	0.86	0.82	116.1	1.37	1.36
D2.1-V210-T180 - C	126.9	47.9	0.4	-10.1	37	0.68	0.86	0.81	127.5	1.25	1.25

* - N médio = taxa de secagem média no período de taxa de secagem constante.

** - Ts média = temperatura média do ar de saída no período de taxa de secagem constante.

TABELA 5.6- Resumo dos principais parâmetros do processo de secagem para as dezoito configurações de ensaio.

	N* médio (g/min)	Ts** média (°C)	UR _{L,f,med} (%)	UR _{L,f,cal} (%)	t (min)	[TEMPO] pto crítico	[G] início	[G] fim secagem	DPI (mmca)	[DP] pto crítico	[DP] fim secagem
D4.4-V60-T80	14.2	33.0	2.07	7.50	340	0.72	0.97	0.95	8.6	1.48	1.53
D2.1-V60-T80	13.7	33.2	2.30	5.97	334	0.83	0.95	0.93	17.3	1.28	1.30
D4.4-V60-T120	23.3	39.7	0.97	4.53	217	0.67	0.97	0.94	8.1	1.79	1.93
D2.1-V60-T120	22.5	40.6	0.90	1.60	227	0.69	0.95	0.92	17.8	1.35	1.35
D4.4-V60-T180	39.3	47.3	0.43	0.90	141	0.60	0.98	0.94	7.0	2.16	2.58
D2.1-V60-T180	37.6	48.7	0.40	-2.07	143	0.71	0.93	0.90	22.9	1.42	1.45
D4.4-V110-T80	28.0	34.8	1.90	4.93	179	0.69	0.96	0.95	19.9	1.33	1.29
D2.1-V110-T80	24.7	34.2	2.03	7.13	193	0.74	0.87	0.88	58.9	1.10	1.03
D4.4-V110-T120	44.3	40.6	0.77	9.60	117	0.61	0.95	0.92	21.0	1.85	1.92
D2.1-V110-T120	41.6	41.2	1.00	2.73	127	0.67	0.89	0.88	56.4	1.13	1.04
D4.4-V110-T180	63.1	48.3	0.30	-3.70	77	0.62	0.95	0.91	23.4	1.61	1.68
D2.1-V110-T180	64.1	48.8	0.30	1.40	76	0.66	0.90	0.84	42.5	1.88	1.89
D4.4-V210-T80	55.2	34.4	2.03	-0.30	97	0.66	0.96	0.92	55.1	1.58	1.66
D2.1-V210-T80	51.5	34.1	1.87	-0.07	104	0.71	0.86	0.87	114.5	1.01	0.94
D4.4-V210-T120	97.2	40.6	0.73	1.10	61	0.62	0.95	0.90	66.9	1.64	1.82
D2.1-V210-T120	88.0	39.7	0.67	-4.50	62	0.70	0.89	0.86	103.1	1.26	1.20
D4.4-V210-T180	146.5	48.5	0.33	-19.00	40	0.62	0.94	0.89	77.9	1.80	1.82
D2.1-V210-T180	132.9	48.2	0.40	-19.93	39	0.68	0.86	0.82	123.4	1.29	1.27

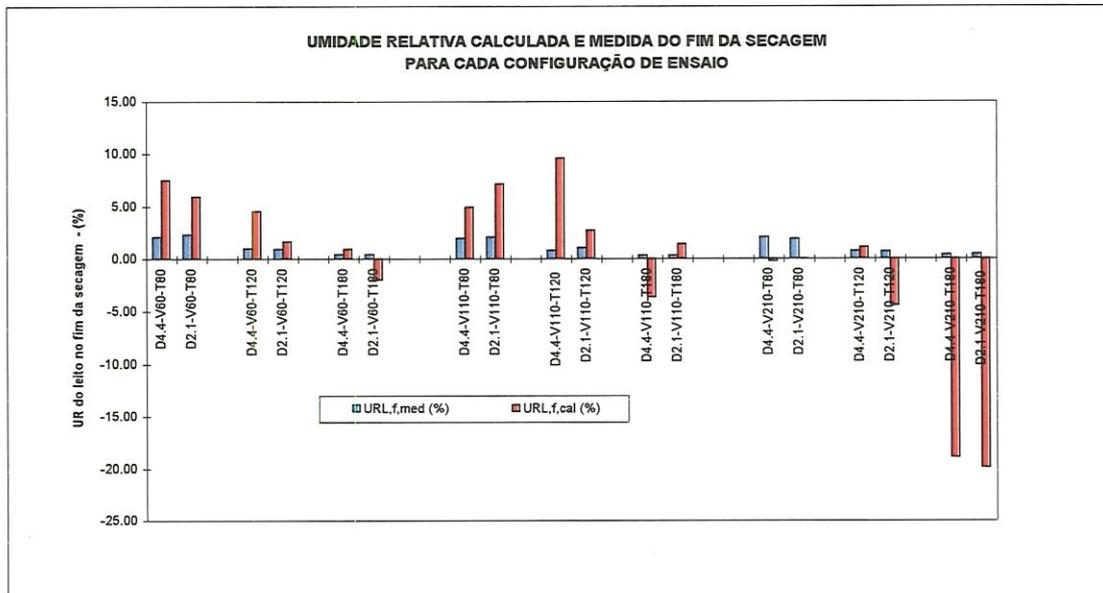


Figura 5.12- Gráfico do comparativo da umidade relativa final do processo de secagem - umidade medida e calculada

Essas variações da umidade relativa calculada podem ser atribuídas a dois fatores:

- pequeno erro de leitura dos termopares da TBU do sistema causa grande erro na determinação da umidade absoluta do ar e, conseqüentemente, na taxa de secagem, que é ponto de partida para a obtenção da umidade relativa do material do leito;
- integração da taxa de secagem no tempo ocasiona o acúmulo de pequenos erros existentes.

Investigando o experimento, o possível erro de leitura do termopare da TBU do ar de saída pode ter sido ocasionado pelos fatores:

- suprimento de água na cuba;
- característica da mecha;
- posição relativa da ponta do termopar dentro da mecha em relação ao nível da água na cuba.

Para secagem de baixa intensidade, pode ter ocorrido excesso de suprimento de água, elevando o nível de água na cuba e o seu transbordamento pelo tubo ladrão. Com isto, a água da cuba pode não mais ter permanecido próxima da TBU, o que foi percebido pelo termopar da TBU de modo mais significativo devido a menor distância entre o nível da água e sua ponta.

Para secagem de alta intensidade, pode ter ocorrido o oposto: mesmo não faltando em sua totalidade, a água da cuba ficou a um nível abaixo do normal. Com isto, e devido às características da mecha, ocorreu a secagem parcial desta, com a conseqüente elevação da temperatura da ponta do termopar. Esta hipótese é bem plausível, principalmente antes do início da secagem, quando a mecha e a água da cuba recebem diretamente o calor do ar, por não haver o leito trocando calor. Quando a bandeja é introduzida na câmara, a mecha e a água passam a não mais receber o calor direto, de modo que, após um determinado tempo, o equilíbrio entre a evaporação e o suprimento de água na mecha fica reestabelecido, assim como o suprimento de água à cuba. Isto explica os picos iniciais na taxa de secagem verificados nos ensaios da configuração V210-T180, conforme mostra a figura 5.13 de um destes ensaios.

A figura 5.14 mostra o comportamento do tempo adimensional do ponto de taxa de secagem decrescente, τ_f , com as configurações de secagem e a granulometria do material, considerando a média dos três ensaios por configuração dada pela tabela 5.6. Verifica-se que, para a sílica de maior granulometria, τ_f foi sempre menor que o determinado para a sílica de menor granulometria. Assim, para leito de maior granulometria, a altura da zona de secagem é maior, devido a sílica possuir menor área de superfície para um elemento de altura do leito dh . A altura da zona de secagem também aumenta com a intensidade de secagem, por ser necessária maior superfície de material para trocar calor com o fluxo de ar e baixar sua temperatura para próximo da temperatura de saturação adiabática.

Em termos absolutos, a espessura média da zona de secagem variou de 17 a 40 mm, para a taxa de secagem variando de 14,2 a 146,5 g/min. Esta espessura é bem maior que a verificada por Allerton *et al* (1949), que obtiveram espessuras da zona de secagem da ordem de 3 a 6,5 mm, porém, com uma taxa de secagem sempre inferior a 0,3 g/min e granulometria máxima de 2,2 mm para material não higroscópico.

A variação da pressão no início da secagem é apresentada pela figura 5.15, tendo sido proporcional ao aumento da descarga de ar. Ela é maior para a sílica de menor granulometria, devido a formação de um leito mais denso. Com algumas exceções, houve uma tendência de aumento da variação de pressão com o aumento da temperatura, porém em pequenas proporções.

ENSAIO D4.4-V210-T180 -A

dados da secagem

RU1120A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.2$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.428$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.162$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 27.4$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.018$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 180.0$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.3$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -37.4$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_T = 38$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 25$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.66$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 160.5$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 192.1$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 210.1$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 200.8$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 86.1$ mmca

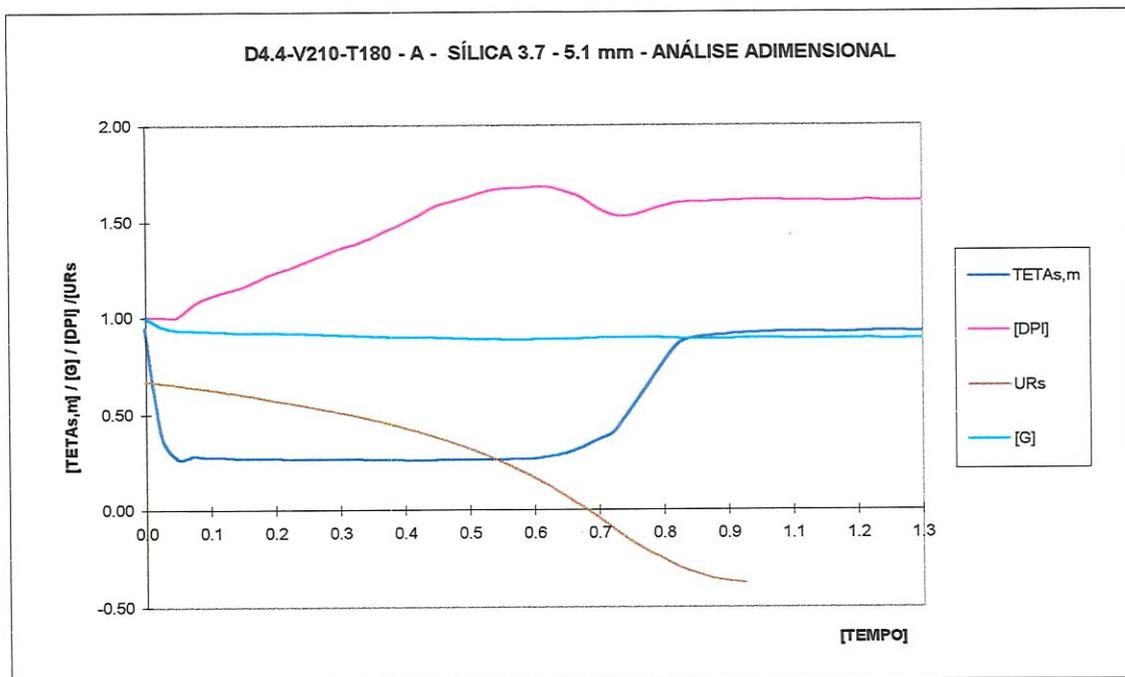
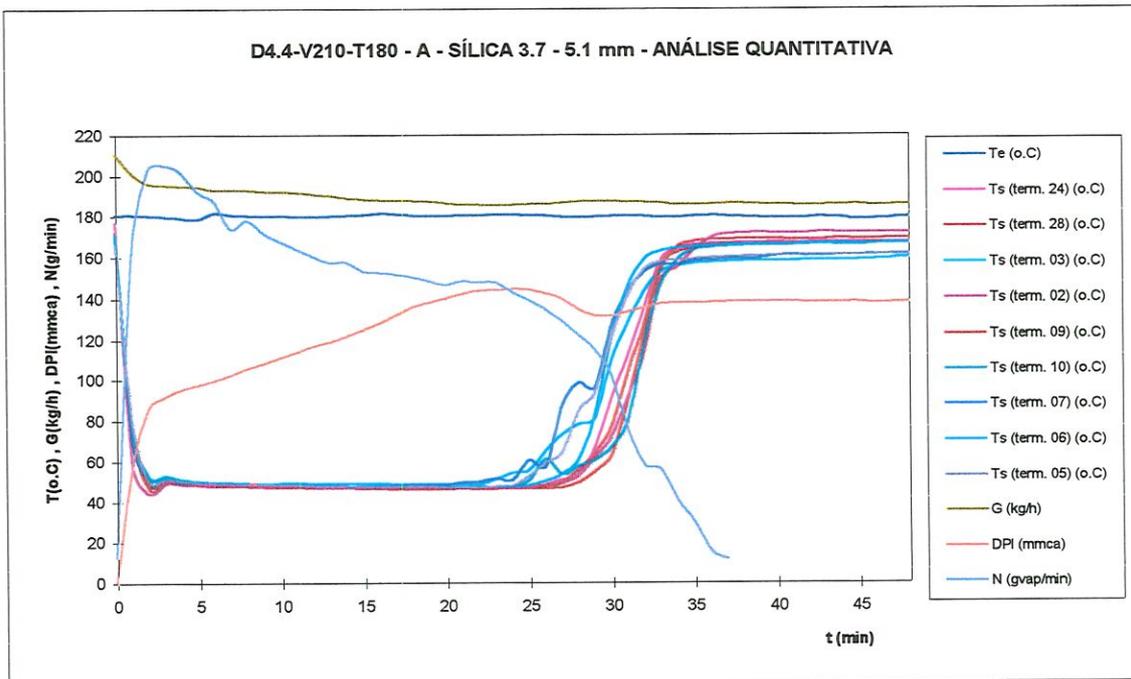


Figura 5.13- Resultado do ensaio D4.4-V210-T180 - A

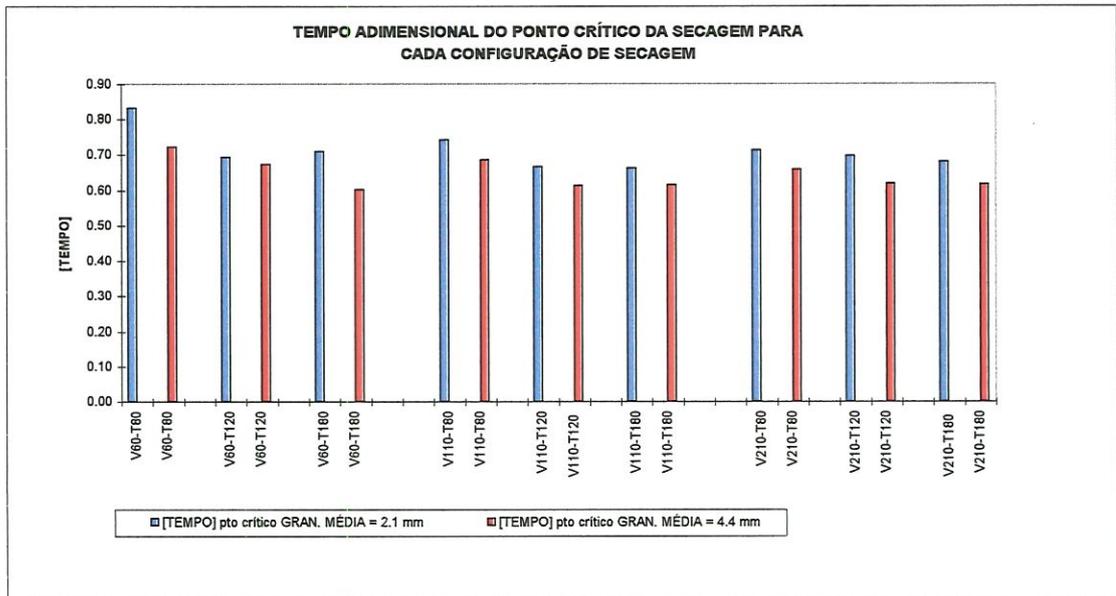


Figura 5.14- Comparação do tempo adimensional do ponto crítico da secagem para cada configuração de secagem

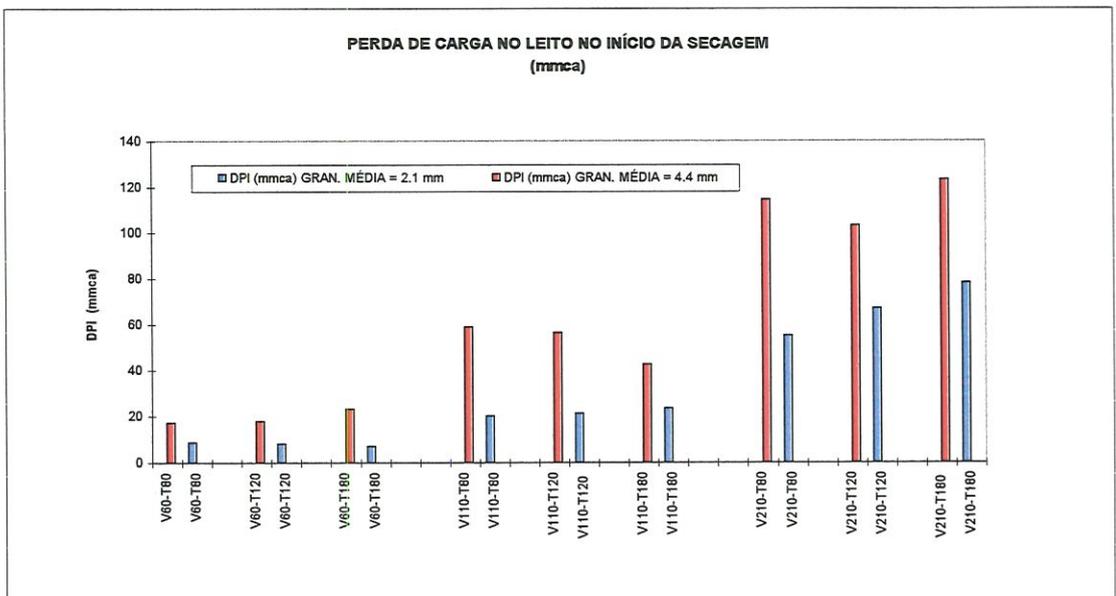


Figura 5.15- Comparação da perda de carga no leito no início da secagem

A figura 5.16 apresenta a variação relativa da pressão no leito quando do atingimento do ponto de taxa de secagem decrescente e do fim da secagem. As maiores variações relativas de pressão foram observadas para a sílica de maior granulometria, com exceção da configuração V110-T180. Este comportamento ocorre porque no início da secagem os vazios entre os grãos estão abertos (pois a presença de água livre no leito é residual). Com a secagem, os grãos da parte superior do leito vão se fragmentando em partes menores que penetram nos vazios das camadas inferiores, diminuindo os interstícios e, por conseguinte, aumentando a perda de carga.

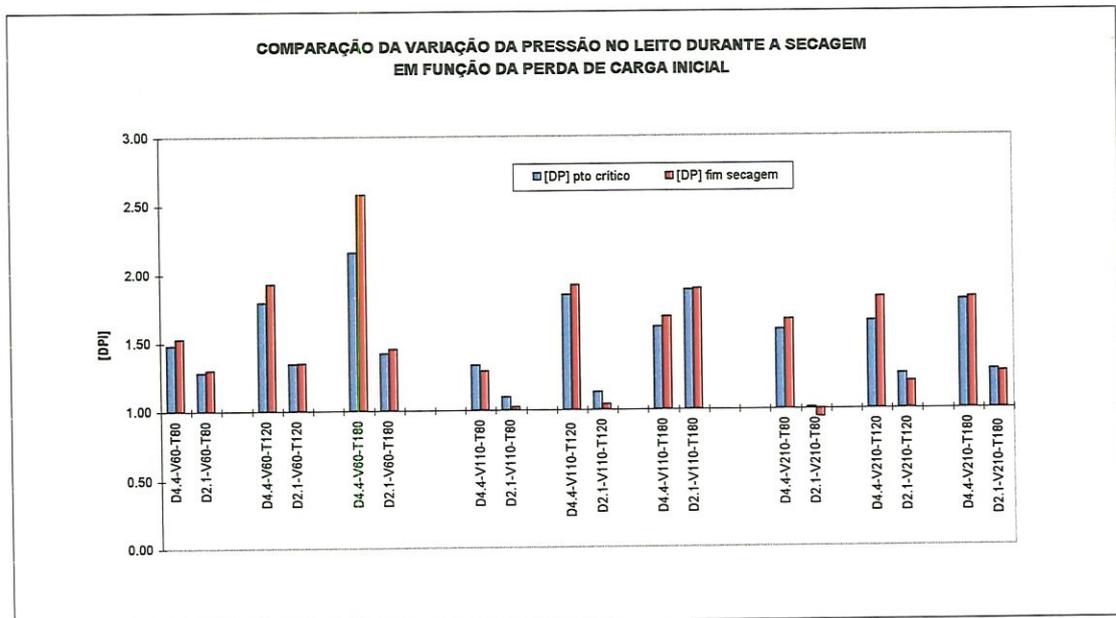


Figura 5.16- Comparação da variação relativa da pressão no leito durante a secagem em função da perda de carga inicial

Em quase todos os ensaios, houve pequena variação da pressão entre o ponto de taxa de secagem decrescente e o fim da secagem. Em muitos dos ensaios, principalmente para os com sílica de granulometria de 3,7 - 5,1 mm, ocorreu uma pequena inflexão na curva de variação de pressão neste intervalo da secagem, como mostram, de modo mais acentuado, as figuras 5.10 e 5.13. Duas explicações para este comportamento são plausíveis: com a secagem desta última camada, a película de água dos grãos de sílica desaparece e, com isto, os vazios têm seu volume médio ligeiramente aumentado; a fragmentação dos grãos desta camada gera finos que são elutriados do leito permanecendo somente os grãos maiores, que possuem espaços intersticiais maiores. Como os poros ficam maiores, ocorre menor restrição ao fluxo de ar e, por conseguinte, diminuição da perda de carga no leito.

Com relação a descarga de ar, vemos da tabela 5.6 que houve pouca variação com a intensidade de secagem, sendo a descarga ligeiramente menor para a sílica de menor granulometria, e estando em razão inversa a variação de pressão no leito.

O Anexo 2 contém as planilhas do resultado da secagem para as demais configurações que não foram apresentadas nesta seção.

5.5- Taxa de secagem

As figuras 5.17 a 5.22 mostram a taxa de secagem no período de taxa de secagem constante para as dezoito combinações de ensaios utilizadas neste trabalho. Os valores iniciais da taxa de secagem foram desprezados, por serem períodos de ajuste das condições de escoamento e de transferência de massa, e pouco representarem no processo como um todo. O ensaio D4.4-V110-T120-A não foi plotado na figura 5.21.B) por apresentar descontinuidade significativa na taxa de secagem, devido provavelmente a alguma perturbação ocorrida na leitura da TBU.

Vê-se que a variação da taxa de secagem com o teor de umidade pode ser aproximada por uma reta, média dos três ensaios de cada configuração. De modo geral, a inclinação da reta aumenta com a intensidade de secagem. Para taxas de secagem menores, entretanto, este comportamento não prevalece, sendo as curvas para a configuração V60-T80 mais inclinadas que as para a configuração V60-T120, respectivamente figuras 5.17.A)eB) e 5.20.A)eB).

Para a configuração de secagem mais intensa, os valores da taxa de secagem apresentaram um pico muito grande no início da secagem, que pode ser visto na figura 5.13. As figuras 4.19.C) e 4.22.C) mostram bem este comportamento, de modo que a aproximação destes pontos por uma reta não é adequada, além da inclinação tornar-se muito acentuada. Porém, para valores de teor de umidade menores que $1,0 - 1,2 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sílica}}$, vemos que a taxa de secagem se estabiliza, sendo provavelmente estes os valores corretos para os ensaios.

A não obtenção de valores adequados para as configurações com maiores taxas de secagem, deveu-se ao método de obtenção da TBU do ar de saída, já comentado na seção anterior. As duas configurações acima não foram consideradas nos cálculos da seções 5.6 e 5.7.

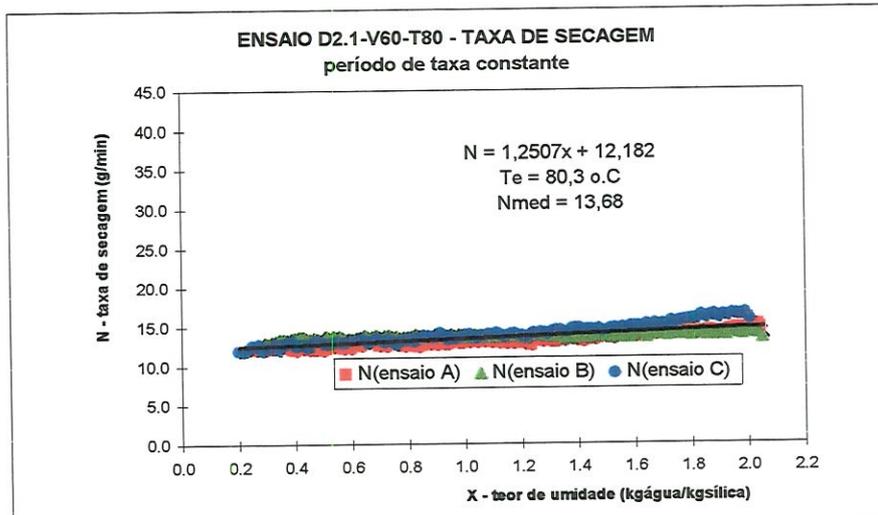


Figura A

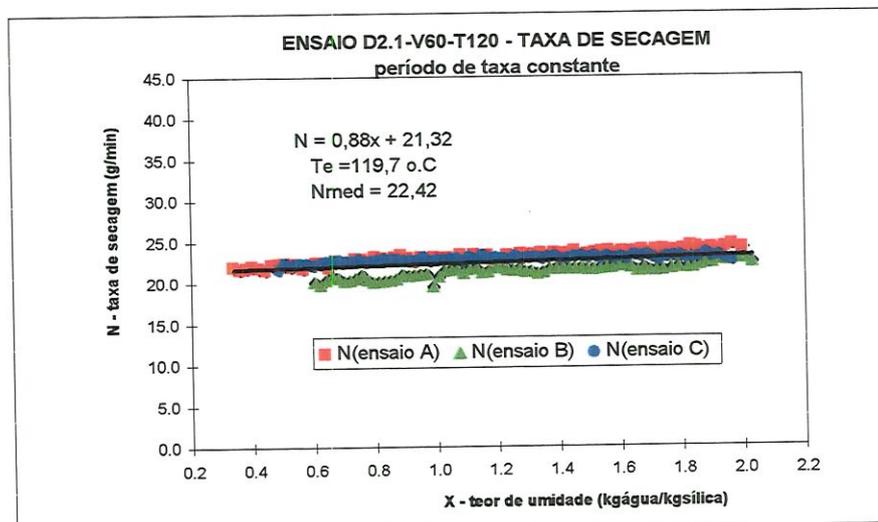


Figura B

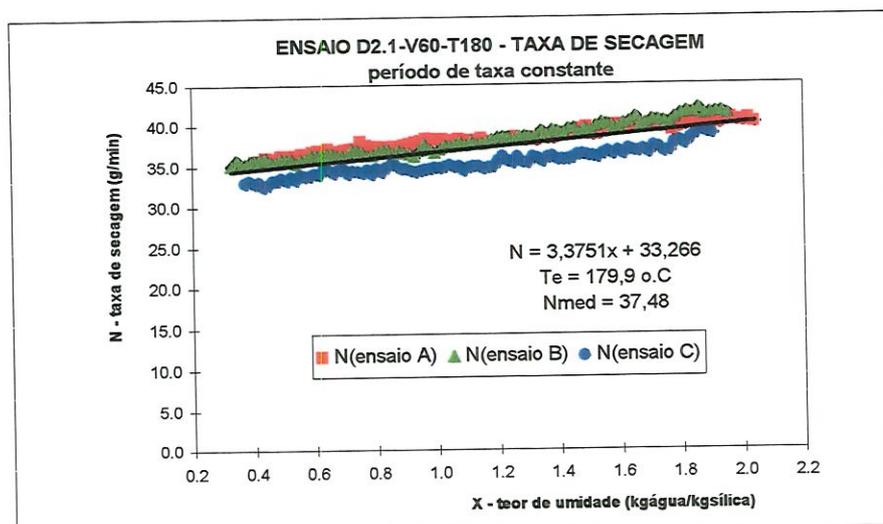


Figura C

Figura 5.17- Taxa de secagem para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial de 60 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

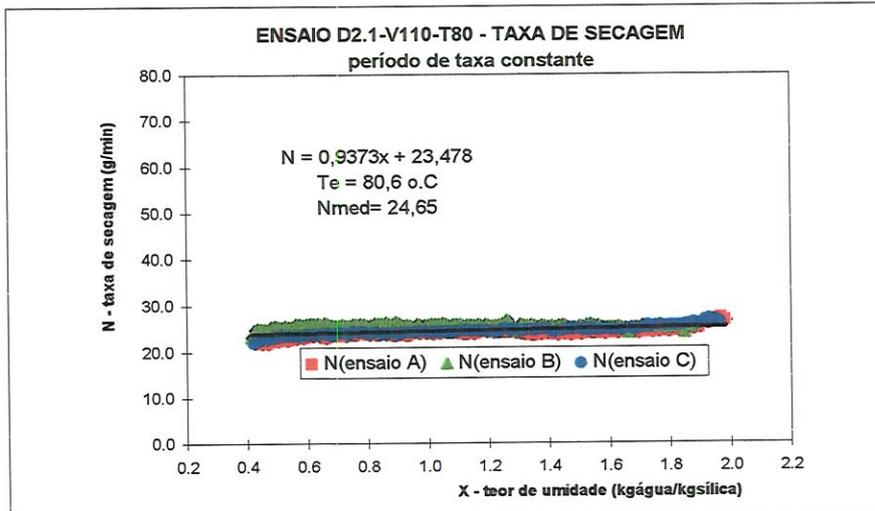


Figura A

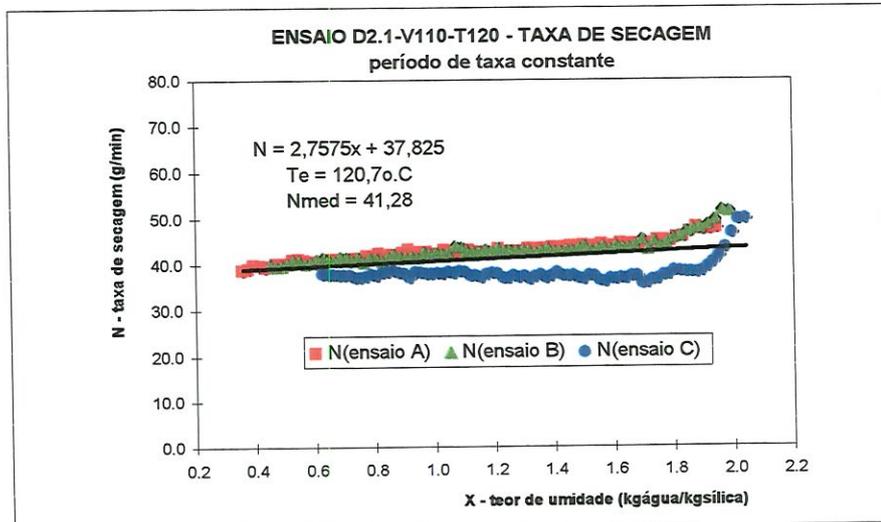


Figura B

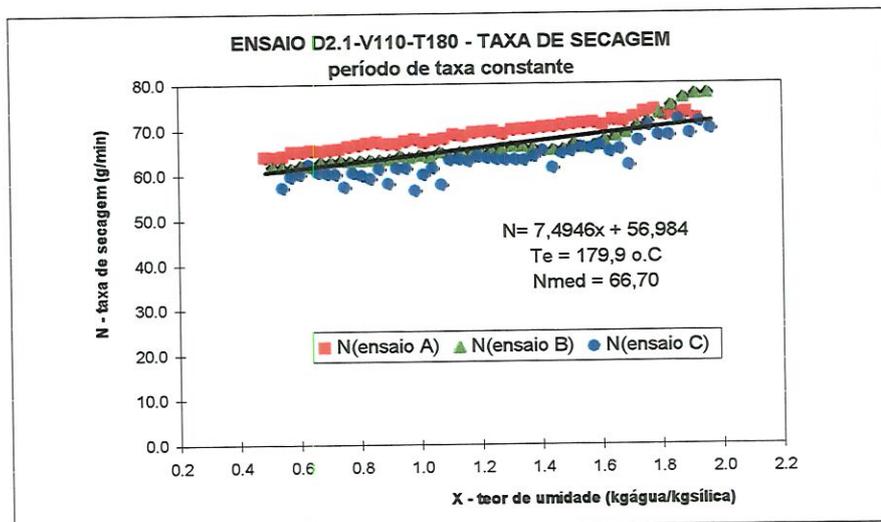


Figura C

Figura 5.18- Taxa de secagem para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial de 110 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

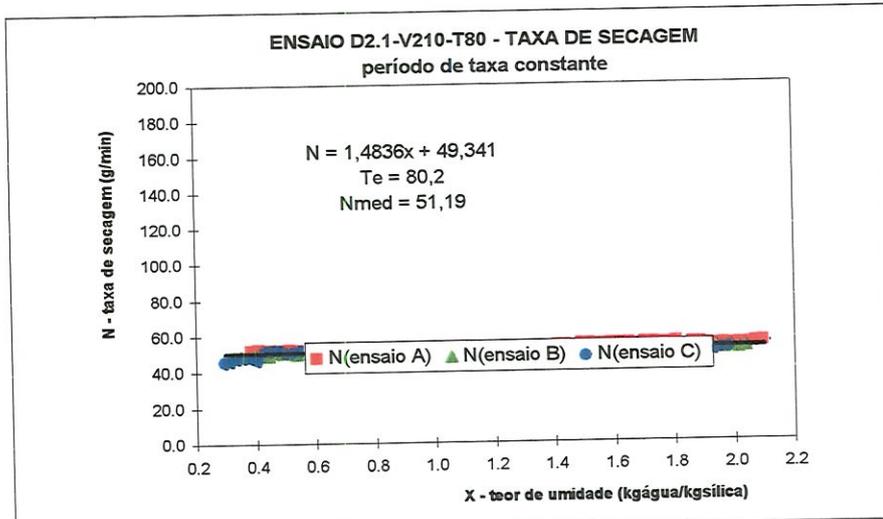


Figura A

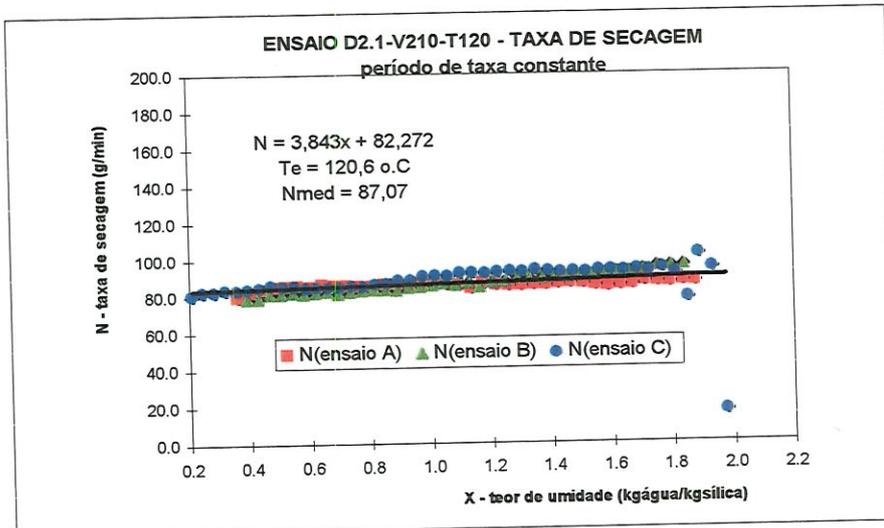


Figura B

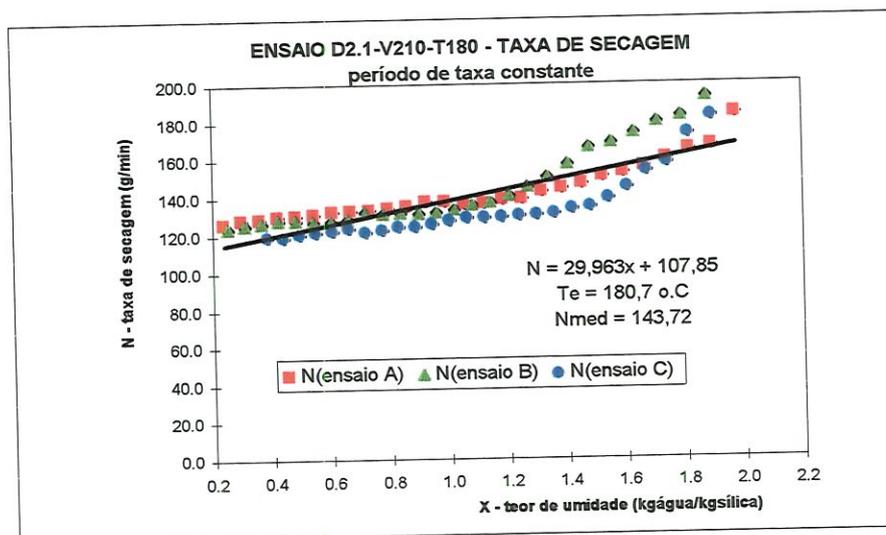


Figura C

Figura 5.19- Taxa de secagem para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial de 210 kg/h
 A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

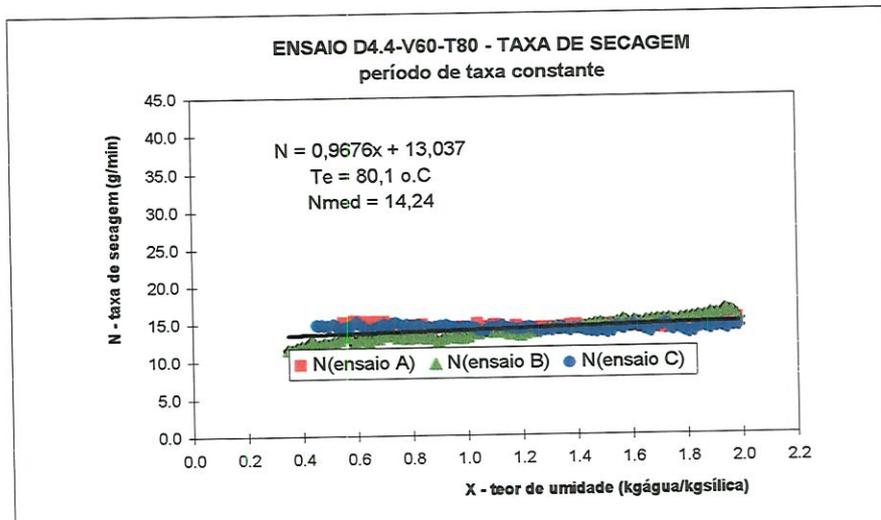


Figura A

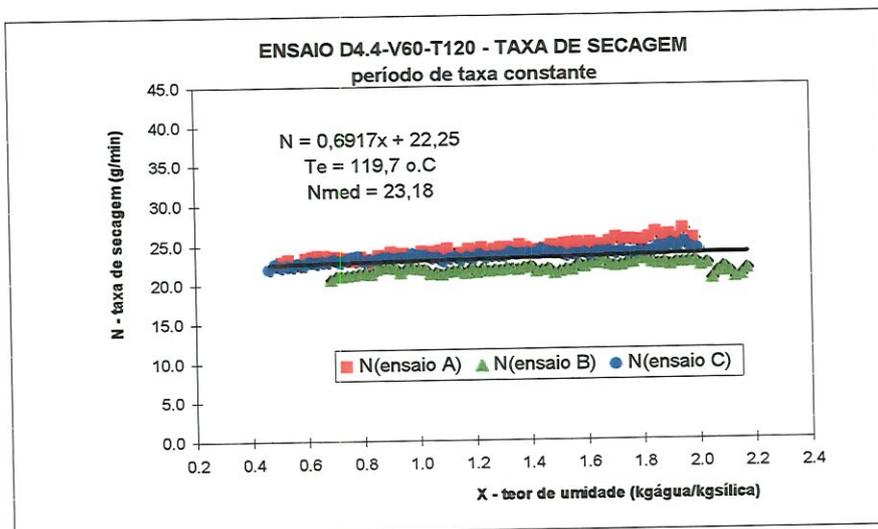


Figura B

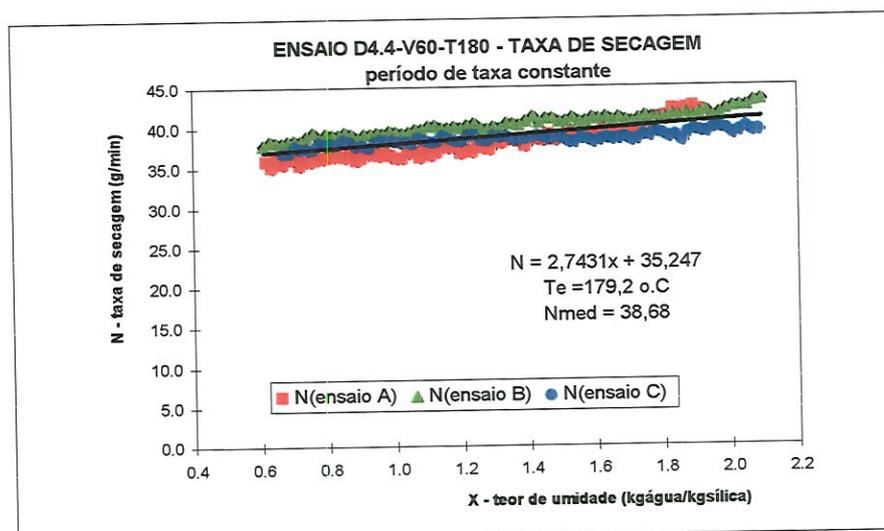


Figura C

Figura 5.20- Taxa de secagem para sílica de granulometria média 4.4 mm e vazão de ar inicial de 60 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

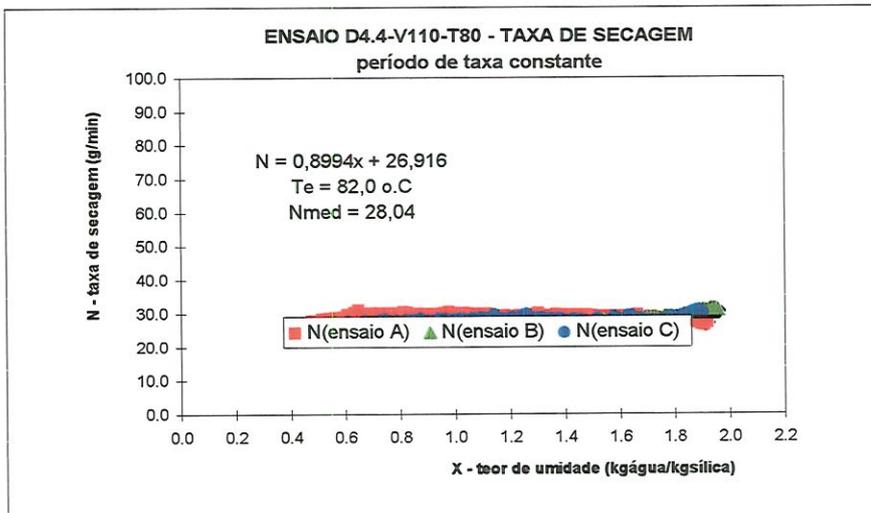


Figura A

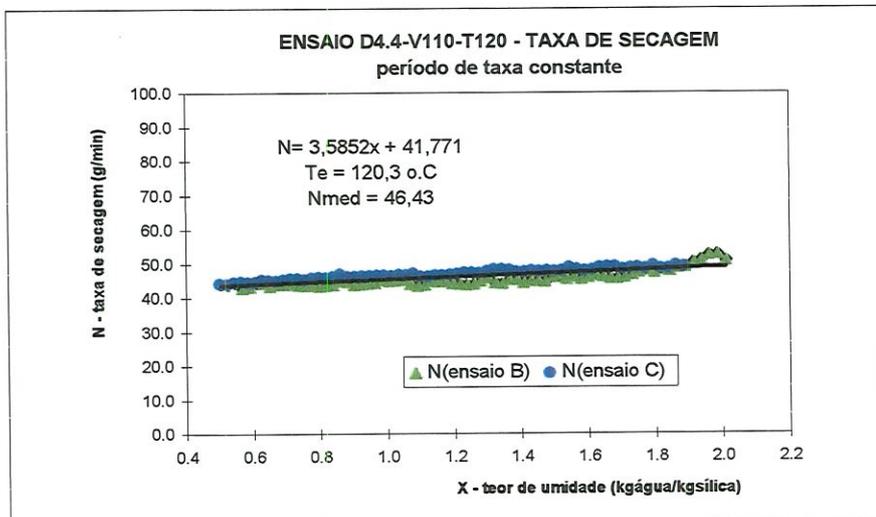


Figura B

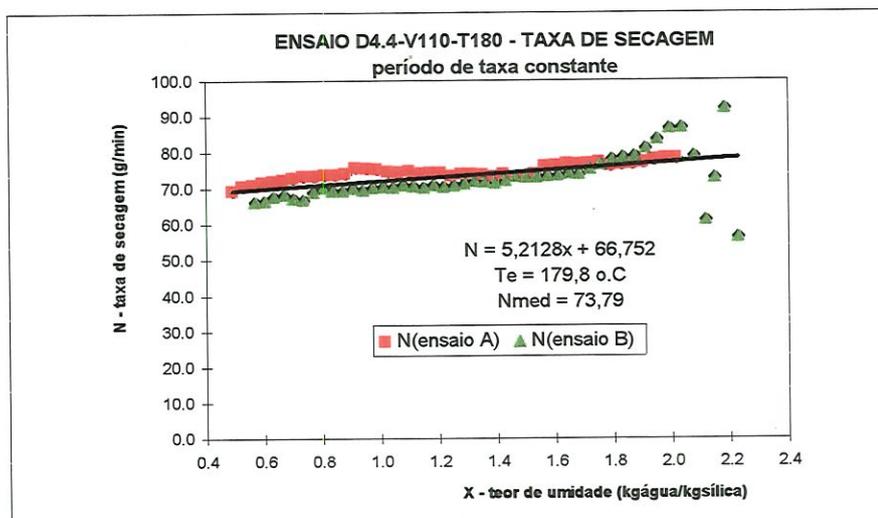


Figura C

Figura 5.21- Taxa de secagem para sílica de granulometria média 4.4 mm e vazão de ar inicial de 110 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

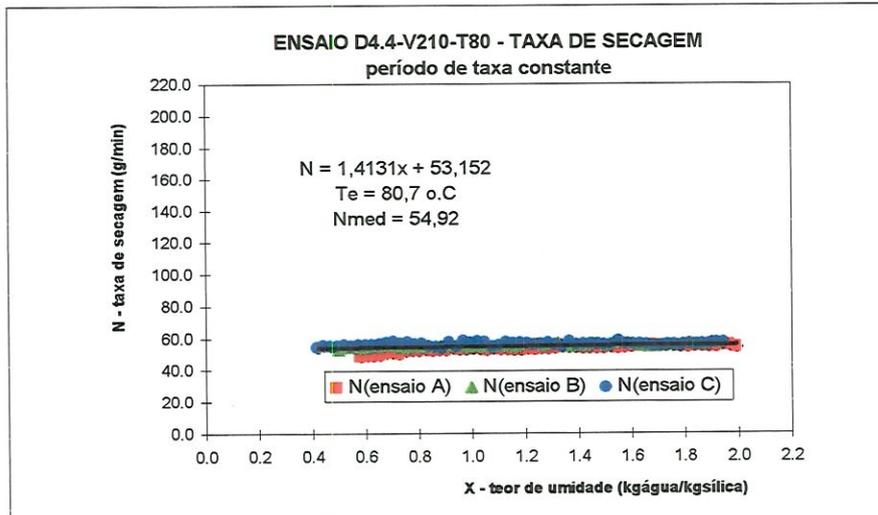


Figura A

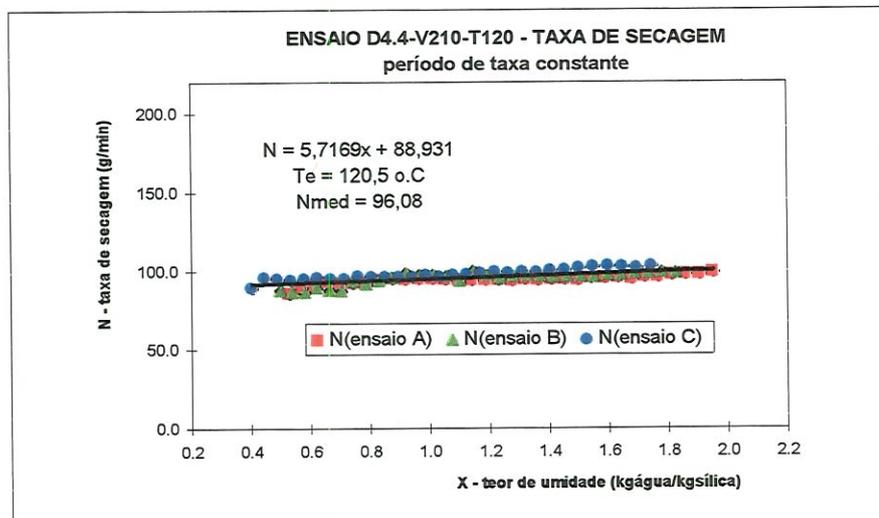


Figura B

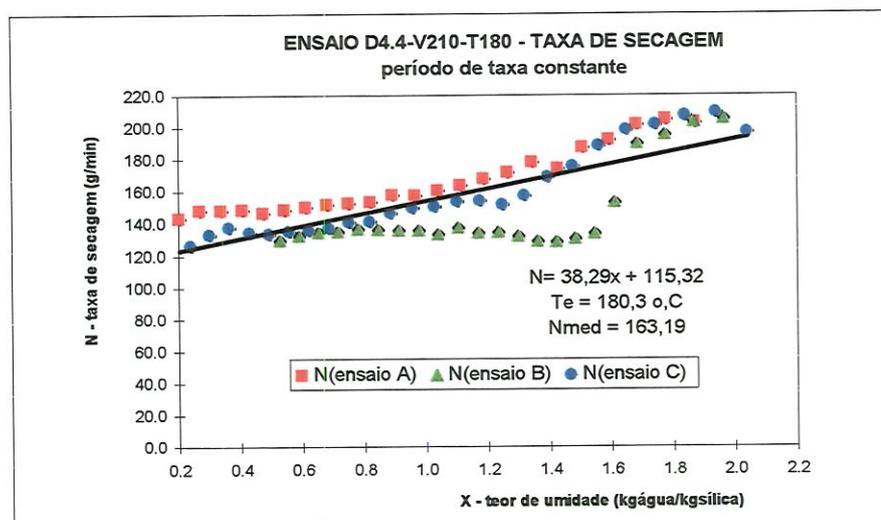


Figura C

Figura 5.22- Taxa de secagem para sílica de granulometria média 4.4 mm e vazão de ar inicial de 210 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

5.6- Equação geral da taxa de secagem

A reunião dos valores da taxa de secagem em função do teor de umidade do leito para cada configuração de ensaio do trabalho gerou a tabela 5.7 abaixo. Esta tabela é a base de dados para a determinação de uma equação geral para a taxa de secagem, apresentada na seção 4.4.

Tabela 5.7- Taxa de secagem média em função do teor de umidade do leito para cada configuração de ensaio

X	TAXA DE SECAGEM (g / min)															
	GRANULOMETRIA 1,6 - 2,6 mm								GRANULOMETRIA 3,7 - 5,1 mm							
	V60 T80	V60 T120	V60 T180	V110 T80	V110 T120	V110 T180	V210 T80	V210 T120	V60 T80	V60 T120	V60 T180	V110 T80	V110 T120	V110 T180	V210 T80	V210 T120
0.3	12.55	21.58	34.28	23.76	38.65	59.23	49.84	83.42	13.33	22.46	36.07	27.19	42.85	68.32	53.58	90.65
0.4	12.67	21.67	34.62	23.85	38.93	59.98	49.98	83.81	13.42	22.53	36.34	27.28	43.21	68.84	53.72	91.22
0.5	12.80	21.76	34.95	23.95	39.20	60.73	50.13	84.19	13.52	22.60	36.62	27.37	43.56	69.36	53.86	91.79
0.6	12.92	21.85	35.29	24.04	39.48	61.48	50.28	84.58	13.62	22.67	36.89	27.46	43.92	69.88	54.00	92.36
0.7	13.04	21.94	35.63	24.13	39.76	62.23	50.43	84.96	13.71	22.73	37.17	27.55	44.28	70.40	54.14	92.93
0.8	13.17	22.02	35.97	24.23	40.03	62.98	50.58	85.35	13.81	22.80	37.44	27.64	44.64	70.92	54.28	93.50
0.9	13.29	22.11	36.30	24.32	40.31	63.73	50.73	85.73	13.91	22.87	37.71	27.73	45.00	71.44	54.42	94.08
1.0	13.41	22.20	36.64	24.42	40.58	64.48	50.87	86.12	14.00	22.94	37.99	27.82	45.36	71.96	54.57	94.65
1.1	13.54	22.29	36.98	24.51	40.86	65.23	51.02	86.50	14.10	23.01	38.26	27.91	45.71	72.49	54.71	95.22
1.2	13.66	22.38	37.32	24.60	41.13	65.98	51.17	86.88	14.20	23.08	38.54	28.00	46.07	73.01	54.85	95.79
1.3	13.78	22.46	37.65	24.70	41.41	66.73	51.32	87.27	14.29	23.15	38.81	28.09	46.43	73.53	54.99	96.36
1.4	13.90	22.55	37.99	24.79	41.69	67.48	51.47	87.65	14.39	23.22	39.08	28.18	46.79	74.05	55.13	96.93
1.5	14.03	22.64	38.33	24.88	41.96	68.23	51.62	88.04	14.49	23.29	39.36	28.27	47.15	74.57	55.27	97.51
1.6	14.15	22.73	38.67	24.98	42.24	68.98	51.76	88.42	14.59	23.36	39.63	28.36	47.51	75.09	55.41	98.08
1.7	14.27	22.82	39.00	25.07	42.51	69.72	51.91	88.81	14.68	23.43	39.91	28.44	47.87	75.61	55.55	98.65
1.8	14.40	22.90	39.34	25.17	42.79	70.47	52.06	89.19	14.78	23.50	40.18	28.53	48.22	76.14	55.70	99.22
1.9	14.52	22.99	39.68	25.26	43.06	71.22	52.21	89.57	14.88	23.56	40.46	28.62	48.58	76.66	55.84	99.79
2.0	14.64	23.08	40.02	25.35	43.34	71.97	52.36	89.96	14.97	23.63	40.73	28.71	48.94	77.18	55.98	100.36
2.1	14.77	23.17	40.35	25.45	43.62	72.72	52.51	90.34	15.07	23.70	41.00	28.80	49.30	77.70	56.12	100.94

- para a determinação do coeficiente α_D , foi utilizada a equação (4.18). Os coeficientes α_D obtidos com os dados da tabela 5.7 para cada combinação das configurações de ensaio do experimento foram reunidos na tabela 5.8 e plotados no gráfico da figura 5.23. A equação média de α_D em função do teor de umidade X é dada por:

$$\alpha_D = -0,1047 - 0,0065 X \quad (5.1)$$

- para a determinação do coeficiente α_T , os mesmos passos acima foram seguidos, com os dados reunidos na tabela 5.9 e plotados no gráfico da figura 2.24. A equação média de α_T em função do teor de umidade X é dada por:

$$\alpha_T = 1,2104 + 0,0157 X \quad (5.2)$$

- seguindo a mesma metodologia, o valores do coeficiente α_G foram reunidos na tabela 5.10 e plotados no gráfico da figura 5.25. A equação média de α_G em função do teor de umidade X é dada por:

$$\alpha_G = 1,0743 + 0,0016 X \quad (5.3)$$

Destas equações vemos que seus coeficientes angulares são muito pequenos, de modo que podemos utilizar valores médios de cada coeficiente na equação geral da taxa de secagem, eq. (4.17). Esta simplificação introduz um erro na equação (4.17) de 1,3 % para o termo da variação da temperatura de, de 0.2 % para o termo da variação da descarga e de 6,2 % para o termo da distribuição granulométrica. Os coeficientes serão:

$$- \alpha_D = -0,116$$

$$- \alpha_T = 1,229$$

$$- \alpha_G = 1,076$$

A equação (4.17), modificada pela introdução de um coeficiente C de correção, pode então ser escrita:

$$N_2/N_1 = C (T_2/T_1)^{1,229} (G_2/G_1)^{1,076} (D_2/D_1)^{-0,116} \quad (5.4)$$

Pode-se utilizar uma configuração de taxa de secagem intermediária como equação base para a determinação da equação geral. Da configuração D2,1-V110-T120, figura 5.61.B), $N = 37,825 + 2,7575 X$, de modo que a equação geral fica:

$$N_2 = C (37,825 + 2,7575 X) (T_2/120)^{1,229} (G_2/110)^{1,076} (D_2/2,1)^{-0,116} \quad (5.5a)$$

ou:

$$N_2 = C (7,3 \cdot 10^{-4} + 5,32 \cdot 10^{-5} X) T_2^{1,229} G_2^{1,076} D_2^{-0,116} \quad (5.5b)$$

Através da comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores calculados pela equação geral da taxa de secagem (5.5b) pode-se determinar o valor do coeficiente C que melhor aproxima essas duas curvas. Obtivemos o valor de $C = 1,08$, de modo que a equação (5.5b) fica:

$$N_2 = (7,88 \cdot 10^{-4} + 5,746 \cdot 10^{-5} X) T_2^{1,229} G_2^{1,076} D_2^{-0,116} \quad (5.6)$$

Na figura 5.26 comparamos entre si a taxa de secagem obtida experimentalmente e a calculada via equação (5.6) para cada configuração de ensaio, onde foram utilizados somente nove valores de teor de umidade. Vê-se que a equação (5.6) possui uma precisão de $\pm 15\%$, conforme representada pelas retas 0.85N e 1.15N da figura.

Tabela 5.8- Valores do coeficiente α_D em função do teor de umidade combinando as duas faixas granulométricas

X	COEFICIENTE α_D								
	V60 T80	V60 T120	V60 T180	V110 T80	V110 T120	V110 T180	V210 T80	V210 T120	V210 T180
0.3	-0.082	-0.054	-0.069	-0.184	-0.140	-0.194	-0.099	-0.113	-0.112
0.4	-0.078	-0.053	-0.066	-0.183	-0.142	-0.188	-0.098	-0.115	-0.118
0.5	-0.075	-0.051	-0.063	-0.182	-0.144	-0.181	-0.098	-0.118	-0.123
0.6	-0.072	-0.050	-0.060	-0.181	-0.145	-0.174	-0.097	-0.120	-0.129
0.7	-0.068	-0.049	-0.058	-0.180	-0.147	-0.168	-0.097	-0.122	-0.134
0.8	-0.065	-0.047	-0.055	-0.179	-0.148	-0.162	-0.096	-0.124	-0.139
0.9	-0.062	-0.046	-0.052	-0.178	-0.150	-0.156	-0.096	-0.127	-0.143
1.0	-0.059	-0.045	-0.049	-0.178	-0.152	-0.150	-0.095	-0.129	-0.148
1.1	-0.056	-0.043	-0.046	-0.177	-0.153	-0.144	-0.095	-0.131	-0.152
1.2	-0.053	-0.042	-0.044	-0.176	-0.154	-0.138	-0.095	-0.133	-0.156
1.3	-0.050	-0.041	-0.041	-0.175	-0.156	-0.132	-0.094	-0.135	-0.160
1.4	-0.047	-0.040	-0.039	-0.174	-0.157	-0.127	-0.094	-0.137	-0.164
1.5	-0.044	-0.038	-0.036	-0.174	-0.159	-0.121	-0.093	-0.139	-0.167
1.6	-0.041	-0.037	-0.034	-0.173	-0.160	-0.116	-0.093	-0.141	-0.171
1.7	-0.038	-0.036	-0.031	-0.172	-0.162	-0.110	-0.092	-0.143	-0.174
1.8	-0.036	-0.035	-0.029	-0.171	-0.163	-0.105	-0.092	-0.145	-0.177
1.9	-0.033	-0.033	-0.026	-0.170	-0.164	-0.100	-0.092	-0.147	-0.180
2.0	-0.030	-0.032	-0.024	-0.170	-0.166	-0.095	-0.091	-0.149	-0.183
2.1	-0.028	-0.031	-0.022	-0.169	-0.167	-0.090	-0.091	-0.151	-0.186

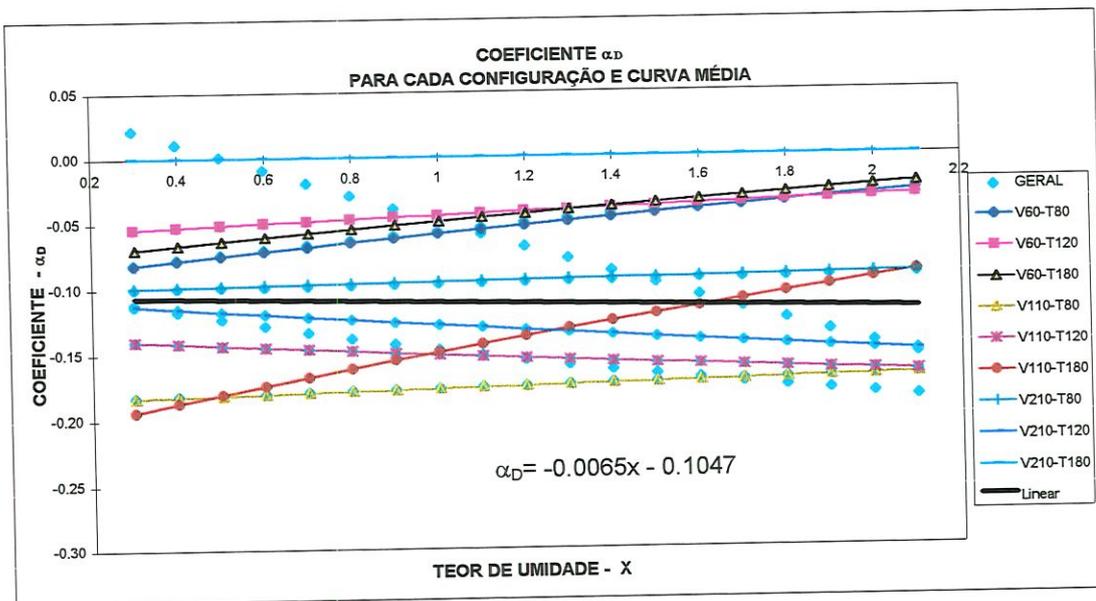


Figura 5.23- Curva do coeficiente α_D para a relação da granulometria com a taxa de secagem

Tabela 5.9- Valores do coeficiente α_T em função do teor de umidade combinando as temperaturas de secagem, duas a duas

X	COEFICIENTE α_T													
	SÍLICA 1,6 - 2,6 mm							SÍLICA 3,7 - 5,1 mm						
	V60 T-120/80	V60 T-180/120	V60 T-180/80	V110 T-120/80	V110 T-180/120	V110 T-180/80	V210 T-120/80	V60 T-120/80	V60 T-180/120	V60 T-180/80	V110 T-120/80	V110 T-180/120	V110 T-180/80	V210 T-120/80
0.3	1.337	1.141	1.239	1.200	1.053	1.126	1.271	1.287	1.169	1.228	1.122	1.151	1.136	1.297
0.4	1.323	1.155	1.239	1.208	1.066	1.137	1.275	1.277	1.180	1.228	1.134	1.149	1.142	1.306
0.5	1.309	1.169	1.239	1.216	1.079	1.148	1.279	1.267	1.191	1.229	1.147	1.147	1.147	1.315
0.6	1.296	1.183	1.239	1.223	1.092	1.158	1.283	1.256	1.201	1.229	1.159	1.145	1.152	1.324
0.7	1.282	1.196	1.239	1.231	1.105	1.168	1.286	1.247	1.212	1.229	1.171	1.144	1.157	1.332
0.8	1.269	1.210	1.239	1.238	1.118	1.178	1.290	1.237	1.223	1.230	1.183	1.142	1.162	1.341
0.9	1.256	1.223	1.239	1.246	1.130	1.188	1.294	1.227	1.233	1.230	1.194	1.140	1.167	1.350
1.0	1.243	1.236	1.239	1.253	1.142	1.198	1.298	1.217	1.244	1.231	1.206	1.139	1.172	1.358
1.1	1.230	1.249	1.239	1.260	1.154	1.207	1.302	1.208	1.254	1.231	1.217	1.137	1.177	1.367
1.2	1.217	1.261	1.239	1.268	1.165	1.216	1.306	1.198	1.264	1.231	1.229	1.135	1.182	1.375
1.3	1.205	1.274	1.239	1.275	1.177	1.226	1.309	1.189	1.274	1.232	1.240	1.134	1.187	1.384
1.4	1.193	1.286	1.239	1.282	1.188	1.235	1.313	1.180	1.284	1.232	1.251	1.132	1.192	1.392
1.5	1.181	1.298	1.239	1.289	1.199	1.244	1.317	1.170	1.294	1.232	1.262	1.131	1.196	1.400
1.6	1.169	1.311	1.240	1.296	1.210	1.253	1.320	1.161	1.304	1.233	1.273	1.129	1.201	1.408
1.7	1.157	1.322	1.240	1.302	1.220	1.261	1.324	1.152	1.314	1.233	1.284	1.128	1.206	1.416
1.8	1.145	1.334	1.240	1.309	1.231	1.270	1.328	1.143	1.323	1.233	1.294	1.126	1.210	1.424
1.9	1.134	1.346	1.240	1.316	1.241	1.278	1.331	1.135	1.333	1.234	1.305	1.125	1.215	1.432
2.0	1.122	1.357	1.240	1.322	1.251	1.287	1.335	1.126	1.342	1.234	1.315	1.123	1.219	1.440
2.1	1.111	1.369	1.240	1.329	1.261	1.295	1.338	1.117	1.352	1.234	1.325	1.122	1.224	1.448

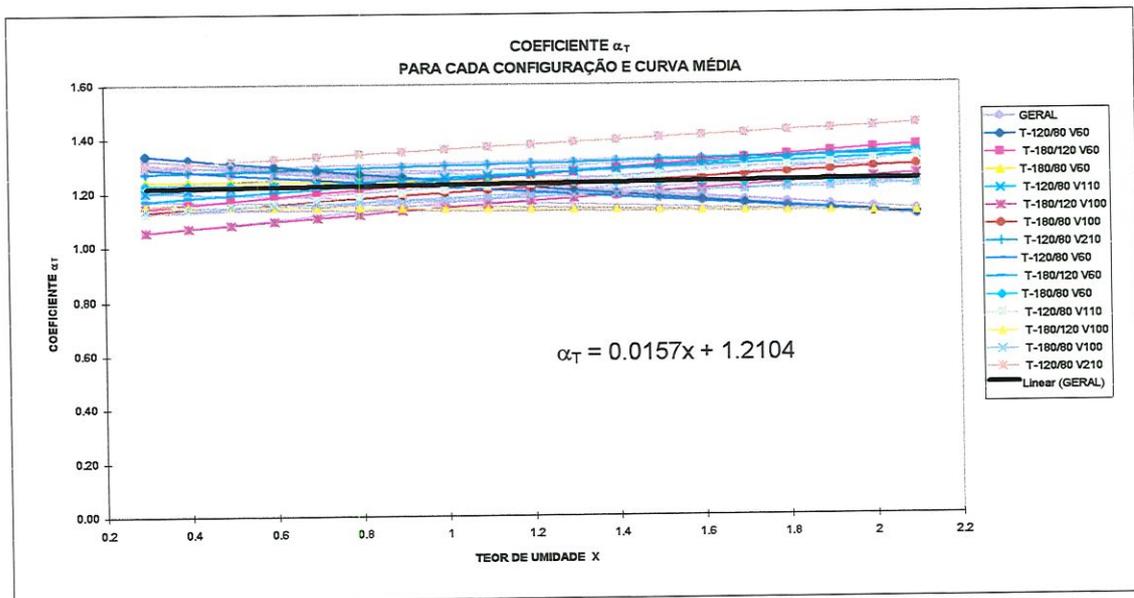


Figura 5.24- Curva do coeficiente α_T para a relação da temperatura com a taxa de secagem
 Na legenda lateral, as sete curvas abaixo da curva geral referem-se a gran. 1,6 - 2,6 mm.
 As outras sete curvas seguintes referem-se a gran. 3,7 - 5,1 mm

Tabela 5.10- Valores do coeficiente α_G em função do teor de umidade combinando as descargas de secagem, duas a duas

X	COEFICIENTE α_G													
	SÍLICA 1,6 - 2,6 mm							SÍLICA 1,6 - 2,6 mm						
	T80 V-110/60	T80 V-210/110	T80 V-210/60	T120 V-110/60	T120 V-210/110	T120 V-210/60	T180 V-110/60	T80 V-110/60	T80 V-210/110	T80 V-210/60	T120 V-110/60	T120 V-210/110	T120 V-210/60	T180 V-110/60
0.3	1.337	1.141	1.239	1.200	1.053	1.126	1.271	1.287	1.169	1.228	1.122	1.151	1.136	1.297
0.4	1.323	1.155	1.239	1.208	1.066	1.137	1.275	1.277	1.180	1.228	1.134	1.149	1.142	1.306
0.5	1.309	1.169	1.239	1.216	1.079	1.148	1.279	1.267	1.191	1.229	1.147	1.147	1.147	1.315
0.6	1.296	1.183	1.239	1.223	1.092	1.158	1.283	1.256	1.201	1.229	1.159	1.145	1.152	1.324
0.7	1.282	1.196	1.239	1.231	1.105	1.168	1.286	1.247	1.212	1.229	1.171	1.144	1.157	1.332
0.8	1.269	1.210	1.239	1.238	1.118	1.178	1.290	1.237	1.223	1.230	1.183	1.142	1.162	1.341
0.9	1.256	1.223	1.239	1.246	1.130	1.188	1.294	1.227	1.233	1.230	1.194	1.140	1.167	1.350
1.0	1.243	1.236	1.239	1.253	1.142	1.198	1.298	1.217	1.244	1.231	1.206	1.139	1.172	1.358
1.1	1.230	1.249	1.239	1.260	1.154	1.207	1.302	1.208	1.254	1.231	1.217	1.137	1.177	1.367
1.2	1.217	1.261	1.239	1.268	1.165	1.216	1.306	1.198	1.264	1.231	1.229	1.135	1.182	1.375
1.3	1.205	1.274	1.239	1.275	1.177	1.226	1.309	1.189	1.274	1.232	1.240	1.134	1.187	1.384
1.4	1.193	1.286	1.239	1.282	1.188	1.235	1.313	1.180	1.284	1.232	1.251	1.132	1.192	1.392
1.5	1.181	1.298	1.239	1.289	1.199	1.244	1.317	1.170	1.294	1.232	1.262	1.131	1.196	1.400
1.6	1.169	1.311	1.240	1.296	1.210	1.253	1.320	1.161	1.304	1.233	1.273	1.129	1.201	1.408
1.7	1.157	1.322	1.240	1.302	1.220	1.261	1.324	1.152	1.314	1.233	1.284	1.128	1.206	1.416
1.8	1.145	1.334	1.240	1.309	1.231	1.270	1.328	1.143	1.323	1.233	1.294	1.126	1.210	1.424
1.9	1.134	1.346	1.240	1.316	1.241	1.278	1.331	1.135	1.333	1.234	1.305	1.125	1.215	1.432
2.0	1.122	1.357	1.240	1.322	1.251	1.287	1.335	1.126	1.342	1.234	1.315	1.123	1.219	1.440
2.1	1.111	1.369	1.240	1.329	1.261	1.295	1.338	1.117	1.352	1.234	1.325	1.122	1.224	1.448

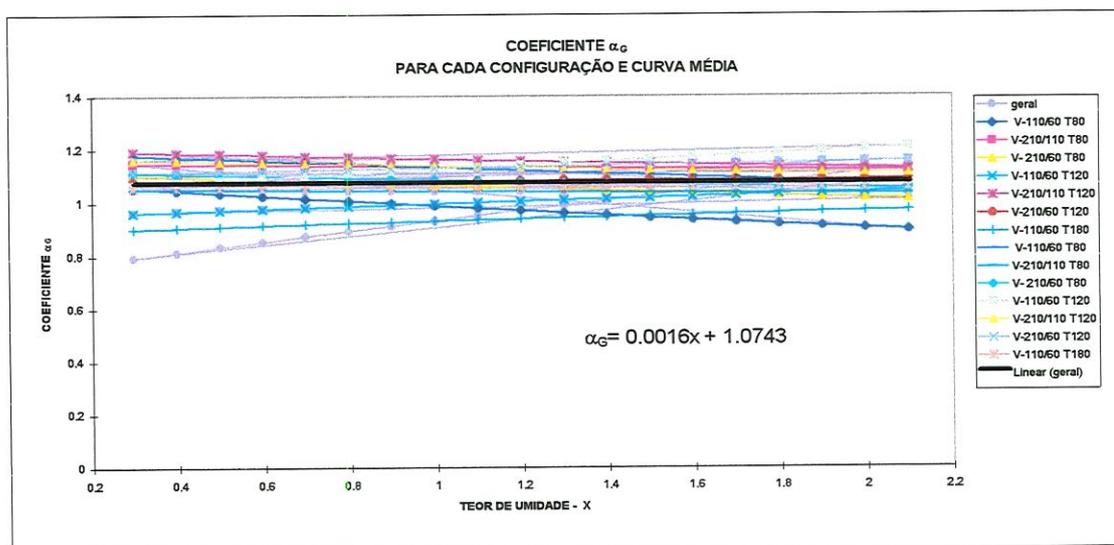


Figura 5.25- Curva do coeficiente α_G para a relação da descarga com a taxa de secagem
 Na legenda lateral, as sete primeiras curvas referem-se a gran. 1,6 - 2,6 mm.
 As outras sete curvas seguintes referem-se a gran. 3,7 - 5,1 mm

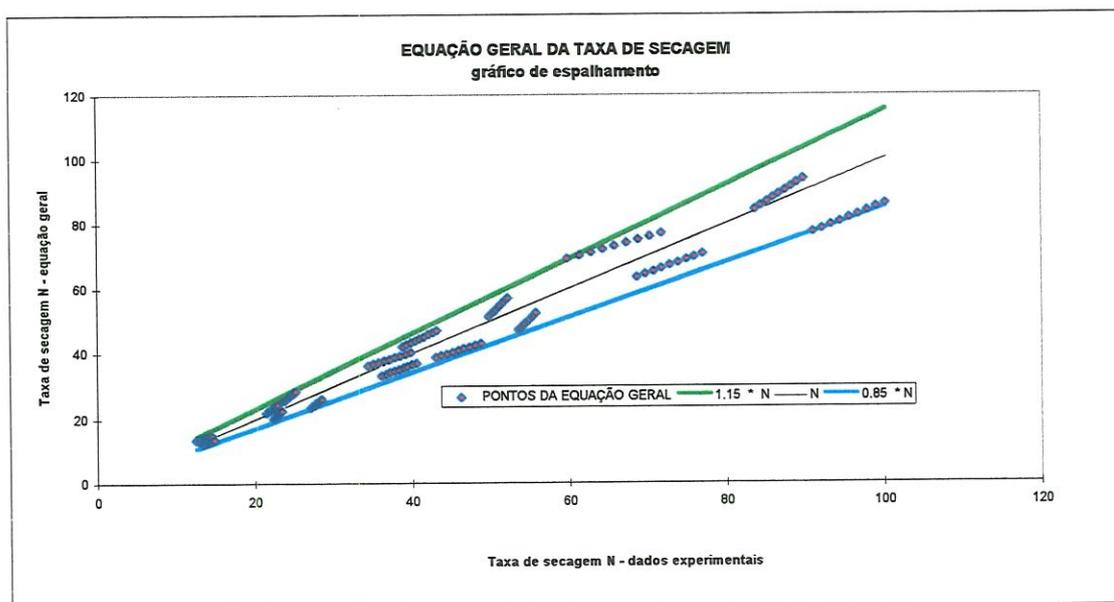


Figura 5.26- Gráfico de espalhamento da equação geral para a taxa de secagem (cada conjunto de nove pontos agrupados representa uma configuração de secagem)

5.7- Equação do Ntg

Utilizando a equação (2.7) e tendo como base as equações obtidas para a taxa de secagem nas figuras 5.17 a 5.22 plotamos nas figuras 5.27 a 4.32 valores do adimensional Ntg para cada uma das configurações, assim como apresentamos uma equação representativa dos pontos gerados.

A tabela 5.11 apresenta dados de Ntg para cada configuração em função do teor de umidade, tendo sido descartadas as curvas das configurações V110-T180 e V210-T180 em ambas as granulometrias. A figura 5.33 apresenta um gráfico plotando todas as curvas da tabela 5.11 além de uma curva média de Ntg para os dados do trabalho. Esta curva média representa o número de transferência de gás no leito dentro do período de taxa de secagem constante para as faixas de configurações ensaiadas.

Uma vez determinada a taxa de secagem para valor específico do teor de umidade do leito, pode-se ter, com a utilização da equação geral do Ntg, o comportamento da secagem durante todo o período de taxa de secagem constante dentro das faixas de configurações ensaiadas.

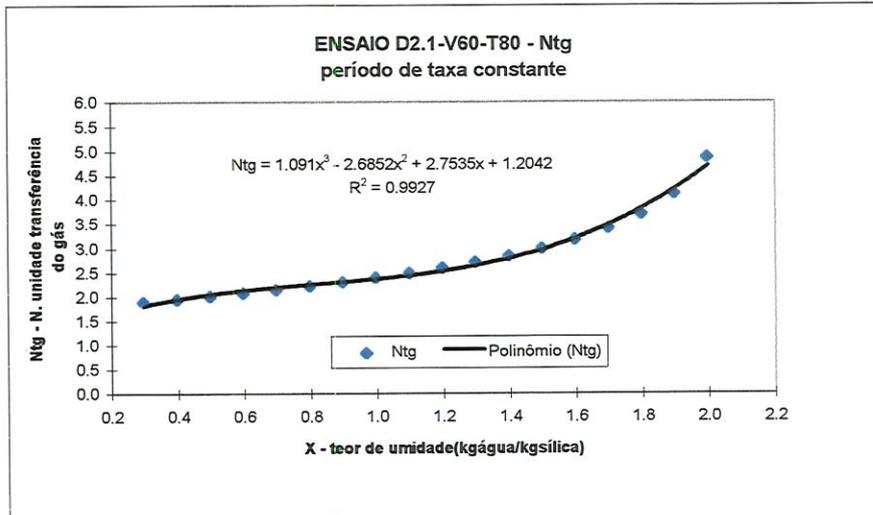


Figura A

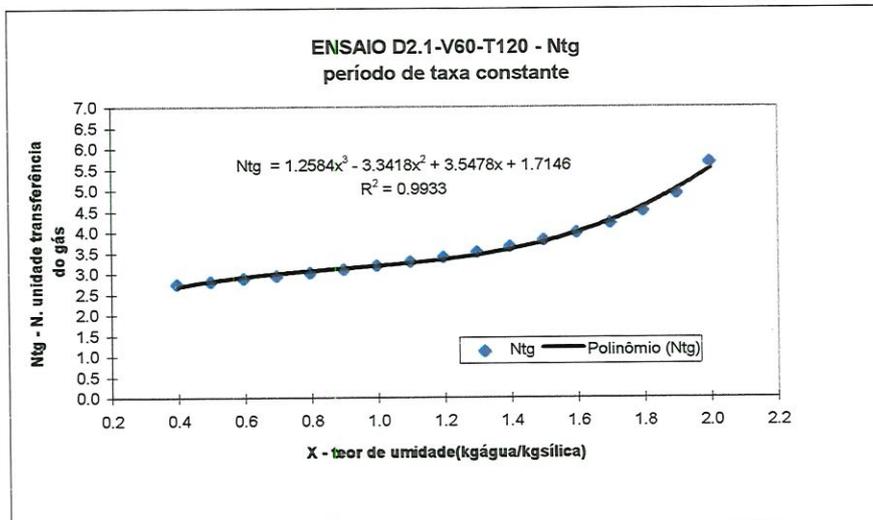


Figura B

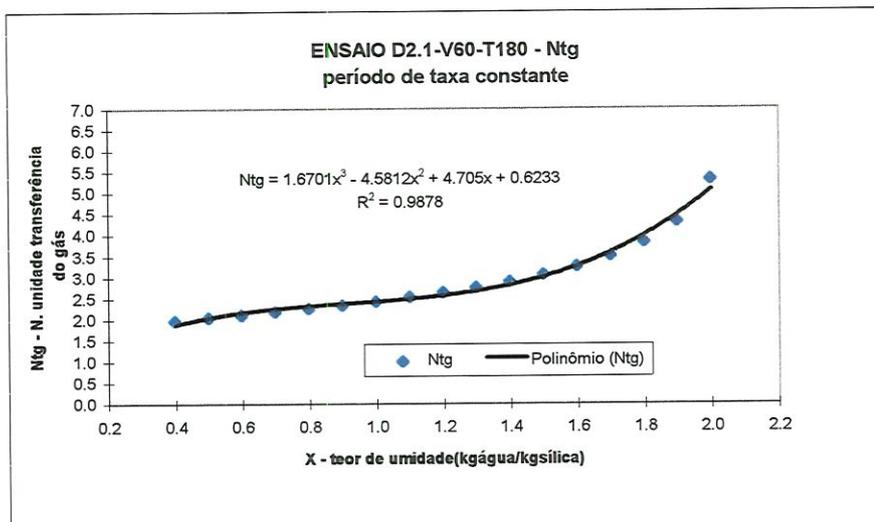


Figura C

Figura 5.27- Ntg para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial de 60 kg/h
A) Te = 80 o.C B) Te = 120 o.C C) Te = 180 o.C

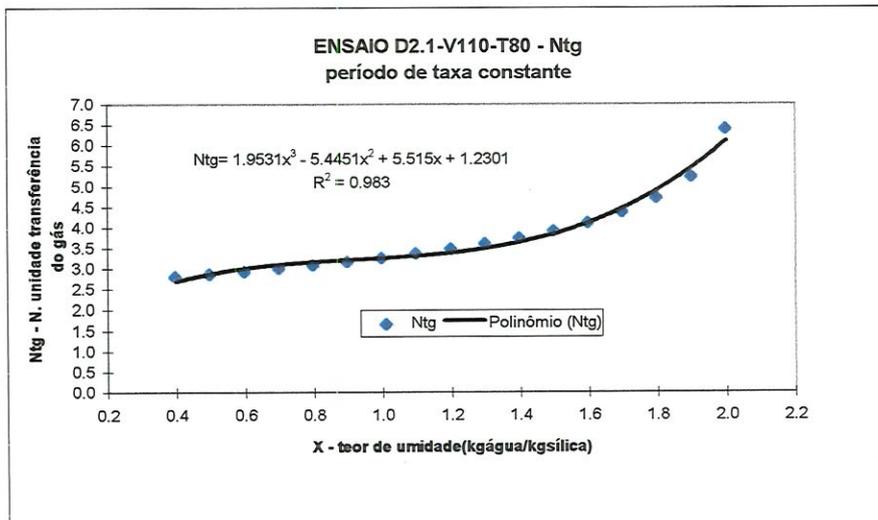


Figura A

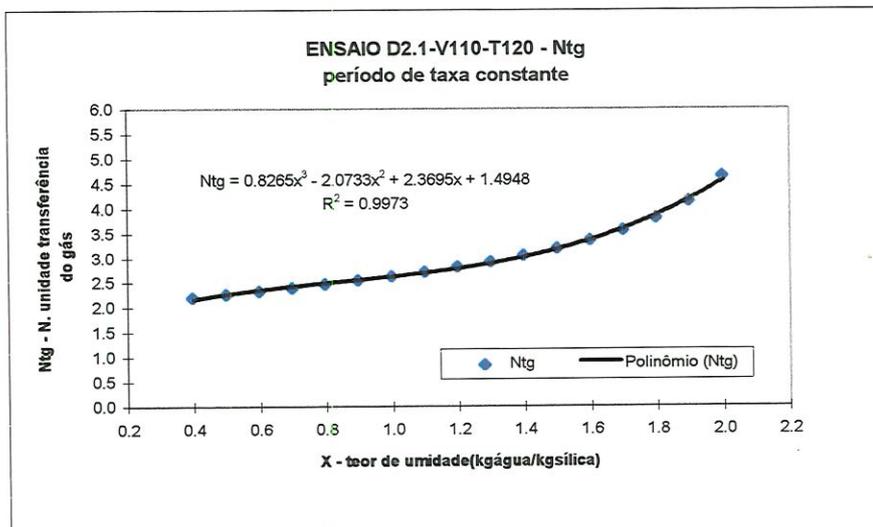


Figura B

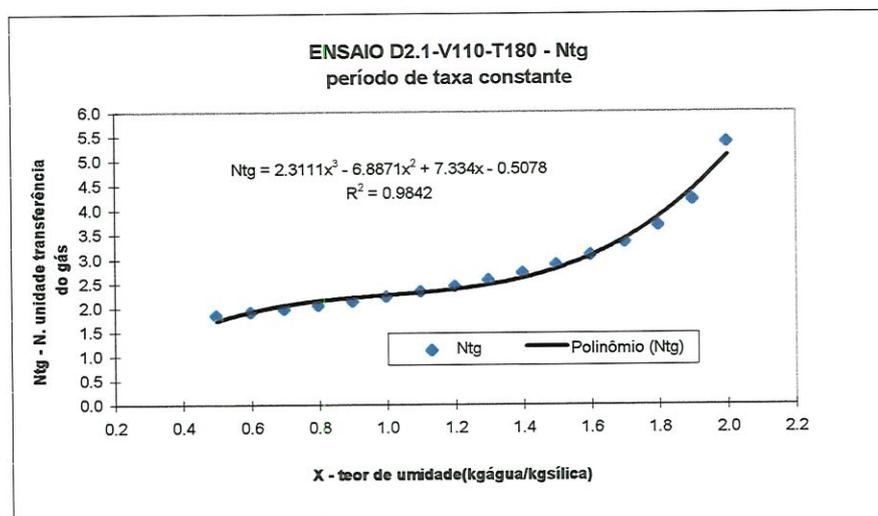


Figura C

Figura 5.28- Ntg para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial de 110 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

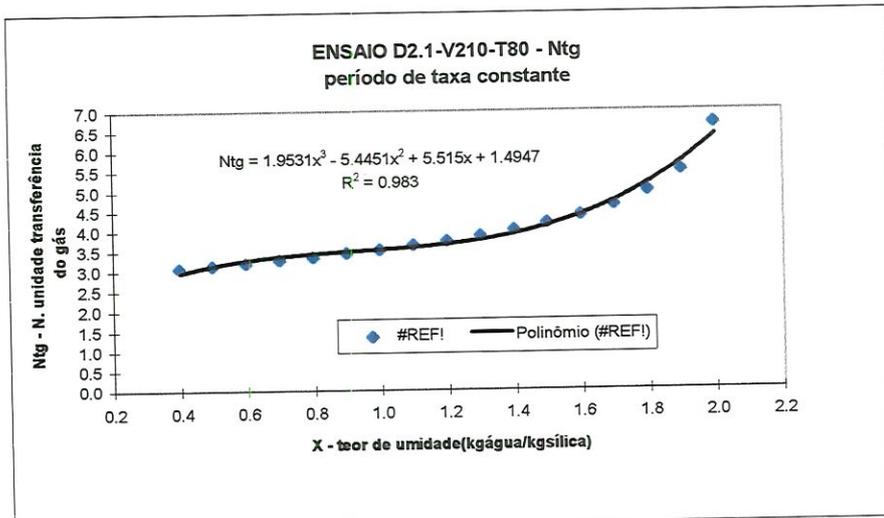


Figura A

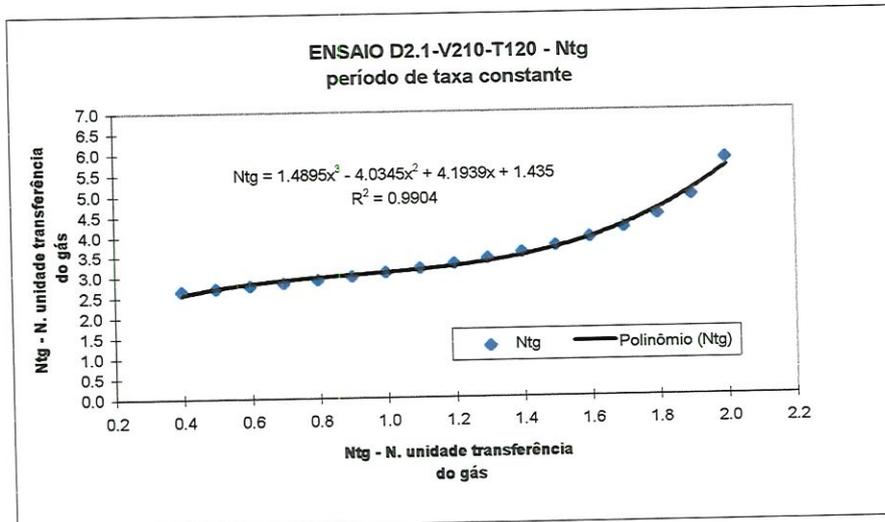


Figura B

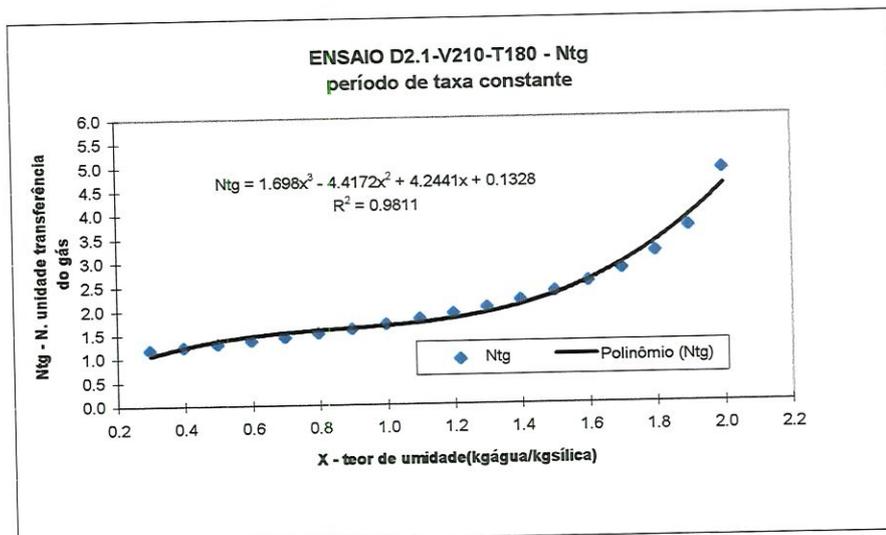


Figura C

Figura 5.29- Ntg para sílica de granulometria média 2.1 mm e vazão de ar inicial de 210 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

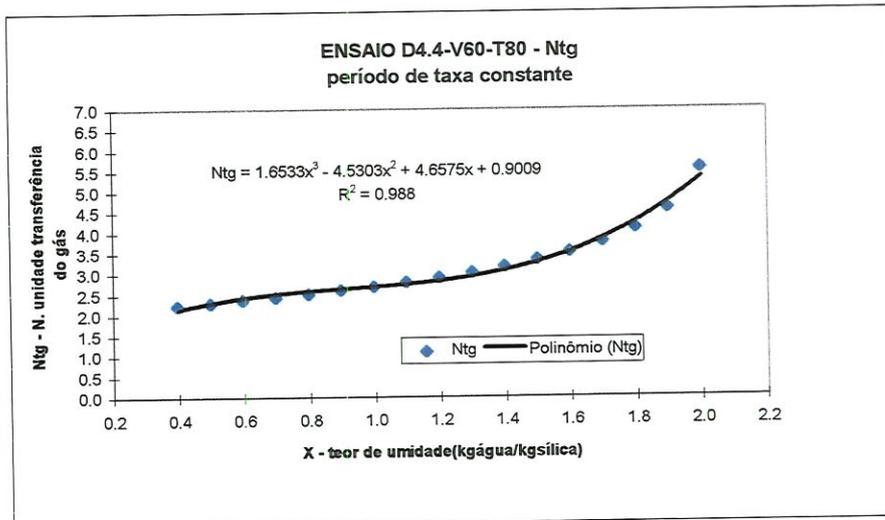


Figura A

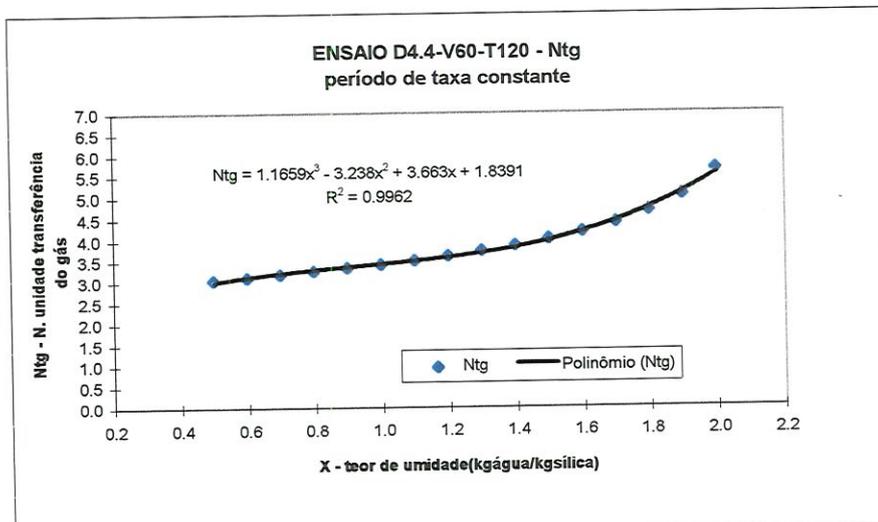


Figura B

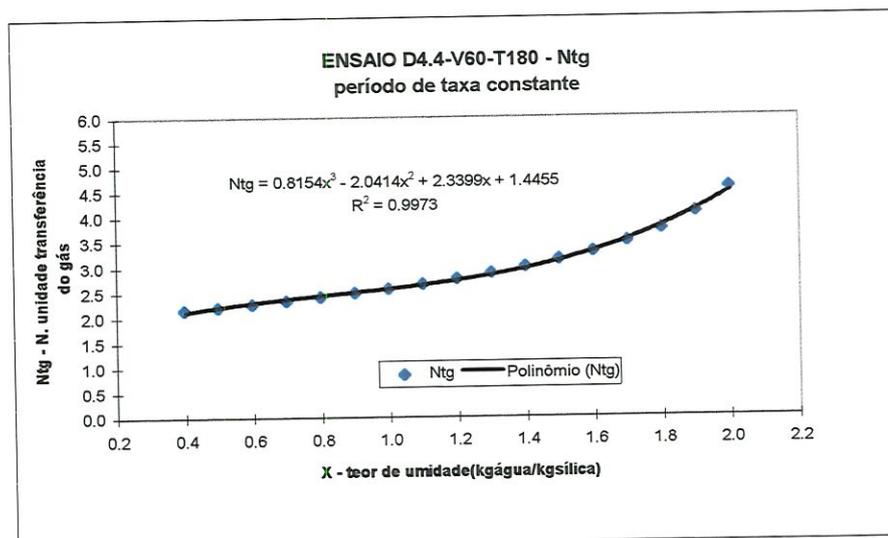


Figura C

Figura 5.30- Ntg para sílica de granulometria média 4.4 mm e vazão de ar inicial de 60 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

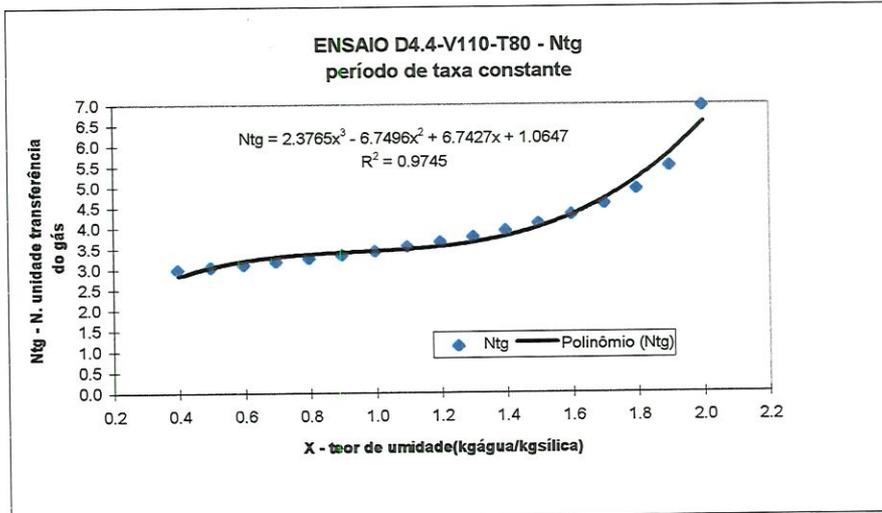


Figura A

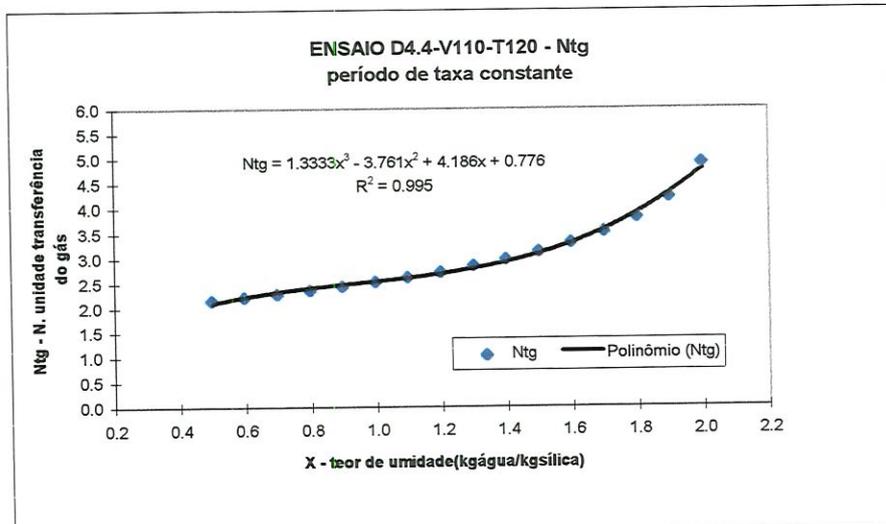


Figura B

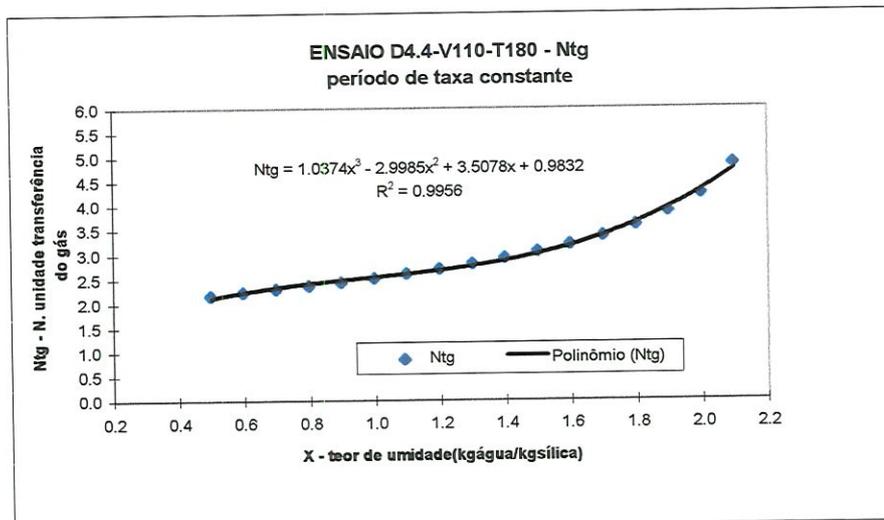


Figura C

Figura 5.31- Ntg para sílica de granulometria média 4.4 mm e vazão de ar inicial de 110 kg/h
A) $T_e = 80 \text{ o.C}$ B) $T_e = 120 \text{ o.C}$ C) $T_e = 180 \text{ o.C}$

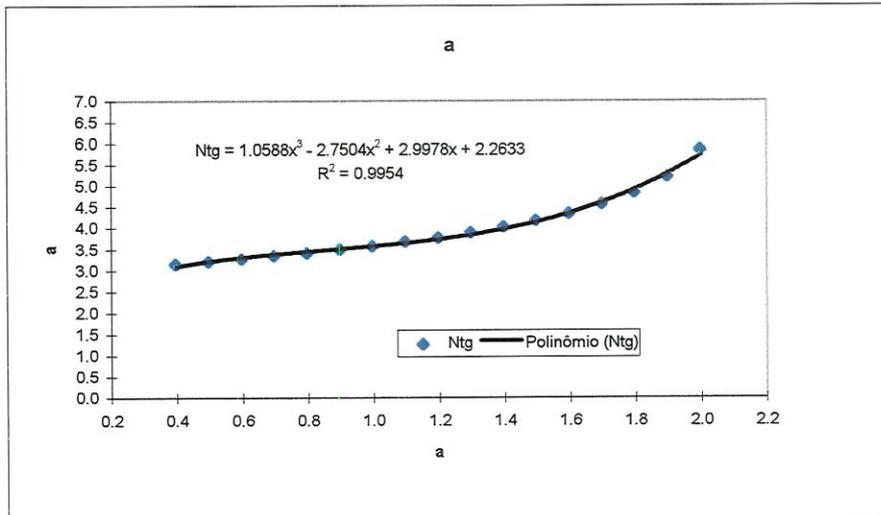


Figura A

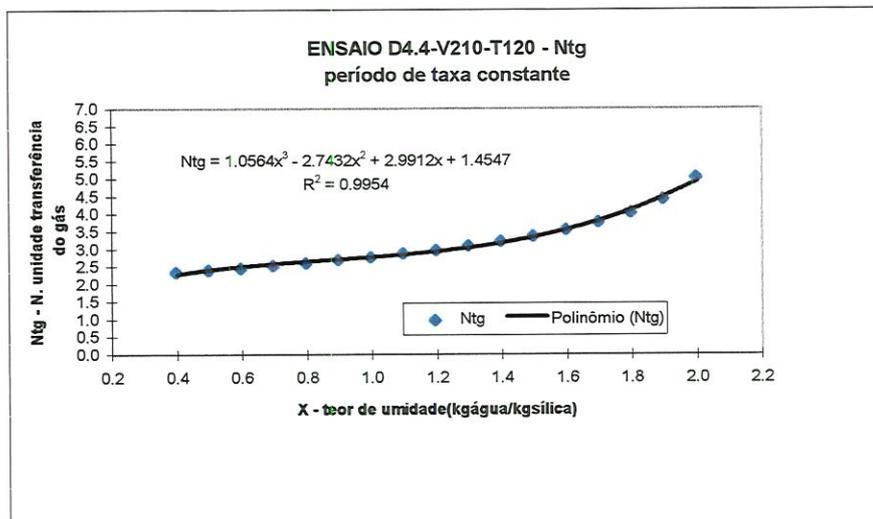


Figura B

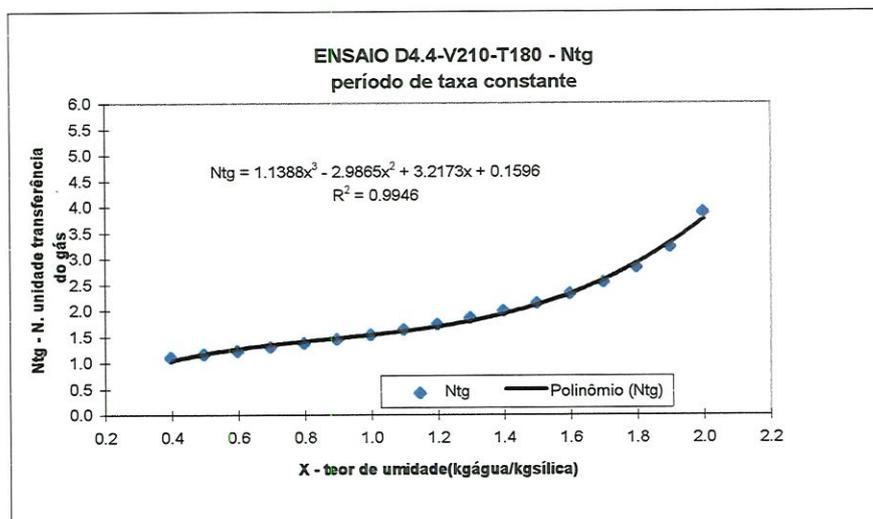


Figura C

Figura 5.32- Ntg para sílica de granulometria média 4.4 mm e vazão de ar inicial de 210 kg/h
A) Te = 80 o.C B) Te = 120 o.C C) Te = 180 o.C



Tabela 5.11- Valores do Ntg em função do teor de umidade para as configurações de ensaio

X	Ntg													
	GRANULOMETRIA 1,6 - 2,6 mm							GRANULOMETRIA 3,7 - 5,1 mm						
	V60-T80	V60-T120	V60-T180	V110-T80	V110-T120	V210-T80	V210-T120	V60-T80	V60-T120	V60-T180	V110-T80	V110-T120	V210-T80	V210-T120
0.3	1.82	2.51	1.67	2.45	2.04	2.45	2.37	1.94	2.68	1.99	2.54	1.73	2.94	2.13
0.4	1.95	2.68	1.88	2.69	2.16	2.69	2.56	2.14	2.86	2.11	2.83	1.93	3.09	2.28
0.5	2.05	2.81	2.04	2.87	2.26	2.87	2.71	2.30	3.01	2.21	3.05	2.10	3.21	2.40
0.6	2.13	2.91	2.16	3.00	2.35	3.00	2.82	2.42	3.12	2.29	3.19	2.22	3.30	2.49
0.7	2.19	2.99	2.24	3.09	2.42	3.09	2.90	2.51	3.22	2.36	3.29	2.32	3.38	2.57
0.8	2.25	3.06	2.31	3.16	2.49	3.16	2.97	2.57	3.29	2.43	3.36	2.40	3.44	2.63
0.9	2.30	3.12	2.36	3.21	2.55	3.21	3.03	2.63	3.36	2.49	3.40	2.47	3.51	2.69
1.0	2.36	3.18	2.42	3.25	2.62	3.25	3.08	2.68	3.43	2.56	3.43	2.53	3.57	2.76
1.1	2.44	3.25	2.48	3.31	2.69	3.31	3.15	2.74	3.50	2.63	3.48	2.60	3.64	2.83
1.2	2.53	3.33	2.56	3.38	2.78	3.38	3.23	2.82	3.59	2.72	3.54	2.69	3.73	2.92
1.3	2.64	3.44	2.67	3.49	2.89	3.49	3.34	2.93	3.69	2.83	3.64	2.79	3.84	3.03
1.4	2.79	3.58	2.81	3.64	3.02	3.64	3.49	3.08	3.82	2.96	3.80	2.92	3.97	3.16
1.5	2.97	3.76	3.01	3.84	3.17	3.84	3.68	3.27	3.98	3.11	4.01	3.09	4.15	3.33
1.6	3.20	3.99	3.26	4.11	3.36	4.11	3.92	3.53	4.19	3.30	4.31	3.31	4.36	3.55
1.7	3.49	4.27	3.59	4.46	3.59	4.46	4.22	3.85	4.44	3.53	4.70	3.57	4.61	3.80
1.8	3.82	4.61	3.99	4.91	3.86	4.91	4.60	4.25	4.74	3.80	5.19	3.90	4.92	4.11
1.9	4.23	5.02	4.48	5.45	4.18	5.45	5.06	4.74	5.11	4.11	5.81	4.30	5.29	4.48
2.0	4.70	5.51	5.07	6.10	4.55	6.10	5.60	5.32	5.54	4.48	6.56	4.77	5.73	4.92
2.1	5.25	6.08	5.77	6.89	4.98	6.89	6.24	6.01	6.05	4.91	7.47	5.33	6.23	5.42

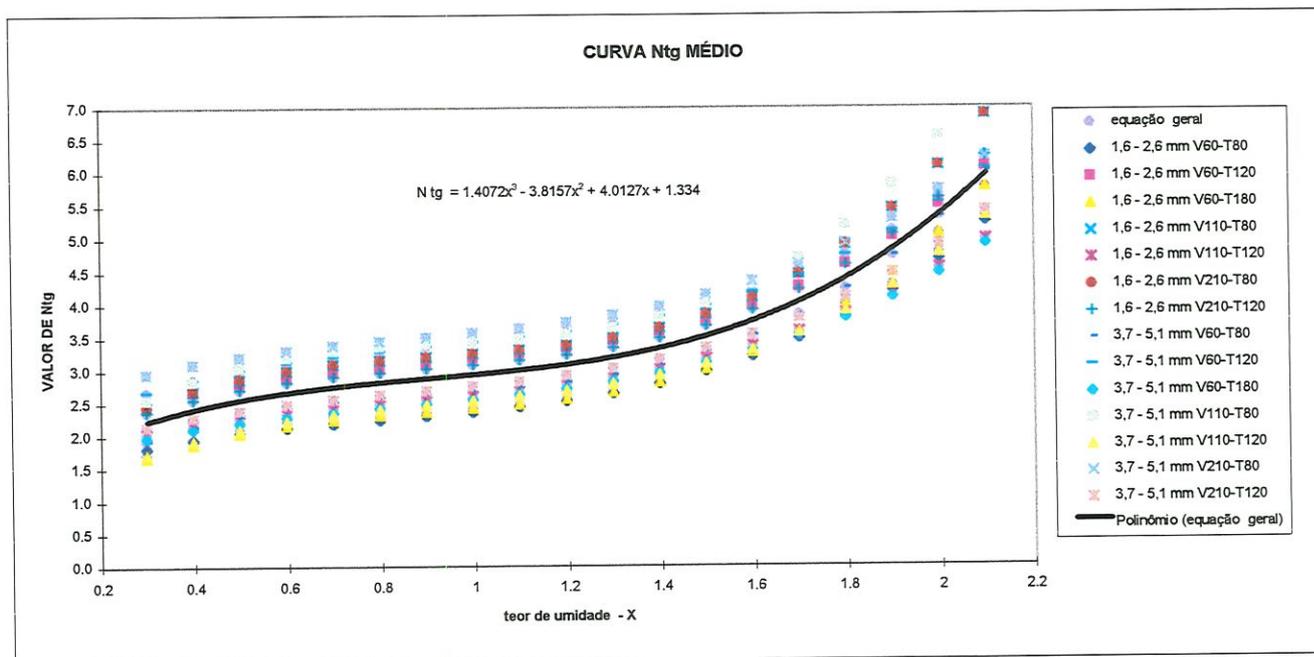


Figura 5.33- Curva de Ntg médio.

6- CONCLUSÕES

A secagem de sílica gel em leito fixo, com fluxo de ar através do leito, foi objeto de extenso trabalho experimental. Diversos ajustes e aperfeiçoamentos foram realizados no sistema experimental para que se pudesse obter resultados com a qualidade desejada. Mesmo assim, pequena heterogeneidade ainda permaneceu na preparação da sílica gel na bandeja de secagem, sendo fonte de variação das curvas de temperatura de secagem em alguns ensaios. Isto é típico de material de forma irregular e de granulometria variada.

As análises de granulometria mostraram que a sílica sofre processo de fragmentação durante a secagem, além do fenômeno de encolhimento. Os grãos maiores fragmentam-se mais devido ao maior gradiente de temperatura e concentração de massa entre sua superfície e interior.

A área superficial foi afetada, diminuindo lentamente com o aumento da taxa de secagem. Por outro lado, o volume dos poros aumentou em pequena proporção. O espalhamento encontrado nos dados parece-nos mostrar que o processo de fabricação e envelhecimento da sílica pode ser aperfeiçoado.

A espessura da zona de secagem aumenta com a taxa de secagem, por ser necessária maior área de contato ar-sílica para remover o fluxo térmico do ar. Isto foi verificado através da diminuição do tempo adimensional da taxa de secagem decrescente com o aumento da taxa de secagem. Verificou-se também que, para uma mesma taxa de secagem, a espessura da zona de secagem varia inversamente ao diâmetro médio do material.

O processo de fragmentação e encolhimento da sílica refletiu na variação de pressão no leito, tendo sido observado, na maioria dos ensaios, um aumento gradual da perda de carga durante a secagem. No período de taxa de secagem decrescente, porém, ocorreu pequena diminuição da perda de carga, principalmente para os ensaios de granulometria maior de material, por haver a elutriação de finos do leito. A descarga de ar no leito também variou, porém em menor proporção.

A metodologia para obtenção da TBU no ar de saída do leito mostrou-se satisfatória para a maioria das configurações. Para a configuração de maior taxa de secagem, V210-T180, porém, houve grande variação nos resultados do balanço de massa, em razão da dificuldade em manter úmida a mecha do termopar.

A taxa de secagem para o período de taxa de secagem constante foi analisada em função do teor de umidade do leito. As curvas obtidas para a taxa de secagem em cada configuração de ensaio foram comparadas entre si e uma equação geral para todos os casos foi obtida, abrangendo todos os dados dentro de um intervalo de +/- 15 %.

Os resultados obtidos foram de aplicação para a empresa, pois permitiu aumentar o conhecimento sobre as características da sílica gel tipo MPV. Os conhecimentos e resultados obtidos neste trabalho permitem que as estufas tipo bandeja existentes possam ser modificadas, atingindo-se um processo de secagem mais eficiente, econômico e de melhor controle.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se elaborar o balanço de massa do processo de secagem a nível microscópico, propondo-se um modelo matemático para a teoria de secagem para material higroscópico, poroso, amorfo e que se fragmenta facilmente. Esta teoria pode ser comparada com a abordagem macroscópica desenvolvida no trabalho.

7- ANEXOS

7.1- RESULTADOS GRANULOMETRIA

A.1- Identificação dos ensaios de secagem e resultados da análise quanto a variação granulométrica

A.1.1- Identificação dos ensaios

Tabela relacionando a denominação dos ensaios utilizada no trabalho e a identificação dos arquivos utilizados para registro das análises de granulometria.

SÍLICA 3,7 - 5,1 mm		SÍLICA 1,6 - 2,6 mm	
D4.4-V60-T80 - A	RU1028B	D2.1-V60-T80 - A	RU1027A
D4.4-V60-T80 - B	RU1029A	D2.1-V60-T80 - B	RU1027B
D4.4-V60-T80 - C	RU1029B	D2.1-V60-T80 - C	RU1028A
D4.4-V60-T120 - A	RU1030A	D2.1-V60-T120 - A	RU1030C
D4.4-V60-T120 - B	RU1030B	D2.1-V60-T120 - B	RU1031B
D4.4-V60-T120 - C	RU1031A	D2.1-V60-T120 - C	RU1031C
D4.4-V60-T180 - A	RU1101A	D2.1-V60-T180 - A	RU1103A
D4.4-V60-T180 - B	RU1101B	D2.1-V60-T180 - B	RU1103B
D4.4-V60-T180 - C	RU1104A	D2.1-V60-T180 - C	RU1103C
D4.4-V110-T80 - A	RU1114A	D2.1-V110-T80 - A	RU1114B
D4.4-V110-T80 - B	RU1115B	D2.1-V110-T80 - B	RU1114C
D4.4-V110-T80 - C	RU1115C	D2.1-V110-T80 - C	RU1115A
D4.4-V110-T120 - A	RU1111A	D2.1-V110-T120 - A	RU1112A
D4.4-V110-T120 - B	RU1111B	D2.1-V110-T120 - B	RU1112B
D4.4-V110-T120 - C	RU1111C	D2.1-V110-T120 - C	RU1113A
D4.4-V110-T180 - A	RU1108A	D2.1-V110-T180 - A	RU1110A
D4.4-V110-T180 - B	RU1109A	D2.1-V110-T180 - B	RU1110B
		D2.1-V110-T180 - C	RU1110C
D4.4-V210-T80 - A	RU1116A	D2.1-V210-T80 - A	RU1117A
D4.4-V210-T80 - B	RU1116B	D2.1-V210-T80 - B	RU1117C
D4.4-V210-T80 - C	RU1116C	D2.1-V210-T80 - C	RU1118A
D4.4-V210-T120 - A	RU1118B	D2.1-V210-T120 - A	RU1119A
D4.4-V210-T120 - C	RU1118C	D2.1-V210-T120 - B	RU1119B
D4.4-V210-T120 - C	RU1118D	D2.1-V210-T120 - C	RU1119C
D4.4-V210-T180 - A	RU1120A	D2.1-V210-T180 - A	RU1121A
D4.4-V210-T180 - B	RU1120B	D2.1-V210-T180 - B	RU1121B
D4.4-V210-T180 - C	RU1120C	D2.1-V210-T180 - C	RU1121C

A.1.2- Metodologia para execução do teste de peneiramento

- 1) Separação/limpeza das peneiras adequadas para a execução do teste conforme a granulometria inicial da sílica:
 - sílica 1,6 - 2,6 mm = peneiras malha - 1,68 mm; 1,00mm; 0,50mm
 - sílica 3,7 - 5,1 mm = peneiras malha - 3,36mm; 2,00mm; 1,00mm; 0,50mm
- 2) Pesagem das peneiras e da bandeja inferior SEM as retenções de sílica
- 3) Montagem das peneiras em ordem decrescente, com bandeja na parte inferior
- 4) Colocação na peneira superior da amostra de sílica gel
- 5) Acionamento da mesa vibratória - tempo ajustado em 7 min (conforme análise realizada item A.1.4
- 6) Pesagem das peneiras e da bandeja inferior com as retenções de sílica
- 7) Adição dos valores coletados - etapas 2 e 6 - na planilha de cálculo

A.1.3- Secagem lenta da sílica gel em estufa de laboratório conforme patamares definidos abaixo para a determinação do grau de colapso (valor a ser comparado com a análise granulométrica dos 53 ensaios realizados)

Análise realizada em estufa de laboratório nos seguintes patamares de secagem

- 12 h a temperatura de 45 o.C
- 12 h a temperatura de 80 o.C
- 24 h a temperatura de 110 o.C

SÍLICA 1,6 - 2,6

AMOSTRA SUPERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.6	579.0
1.00	481.6	532.6
0.50	456.0	475.4
BANDEJ	429.3	436.6

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	22.4	22.4
1.68 \diamond 1.00	51.0	50.9
1.00 \diamond 0.50	19.4	19.4
0,50 <	7.3	7.3
TOTAL	100.1	

SÍLICA 3,7 - 5,1

AMOSTRA INFERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	473.4
2.00	572.4	613.2
1.00	481.6	514.9
0.50	456.0	471.0
BANDEJ	429.3	438.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	3.4	3.35
3.36 \diamond 2.00	40.8	40.16
2,00 \diamond 1.00	33.3	32.78
1,00 \diamond 0,50	15.0	14.76
0,50 <	9.1	8.96
TOTAL	101.6	

A.1.4- Análise intensidade de agitação x quebra da sílica x distribuição granulométrica

Ensaio de secagem utilizado para análise - KU1030A

SÍLICA 1.6 - 2.6 mm

VAZÃO

60 kg/h

TEMPERATURA

120 °C

ENSAIO A

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	562.6
1.00	492.7	547.7
0.50	456.1	483.8
BANDEJ	429.4	436.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	10.1	10.1
1.68<>1.00	55.0	54.9
1.00<>0.50	27.7	27.6
0.50 <	7.4	7.4
TOTAL	100.2	

ENSAIO B

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	559.4
1.00	492.7	547.8
0.50	456.1	486.6
BANDEJ	429.4	437.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.9	6.9
1.68<>1.00	55.1	54.8
1.00<>0.50	30.5	30.4
0.50 <	8.0	8.0
TOTAL	100.5	

ENSAIO C

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	559.0
1.00	492.7	547.8
0.50	456.1	487.0
BANDEJ	429.4	437.6

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.5	6.5
1.68<>1.00	55.1	54.7
1.00<>0.50	30.9	30.7
0.50 <	8.2	8.1
TOTAL	100.7	

ENSAIO D

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	558.6
1.00	492.7	547.8
0.50	456.1	487.2
BANDEJ	429.4	437.7

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.1	6.1
1.68<>1.00	55.1	54.8
1.00<>0.50	31.1	30.9
0.50 <	8.3	8.3
TOTAL	100.6	

ENSAIO E

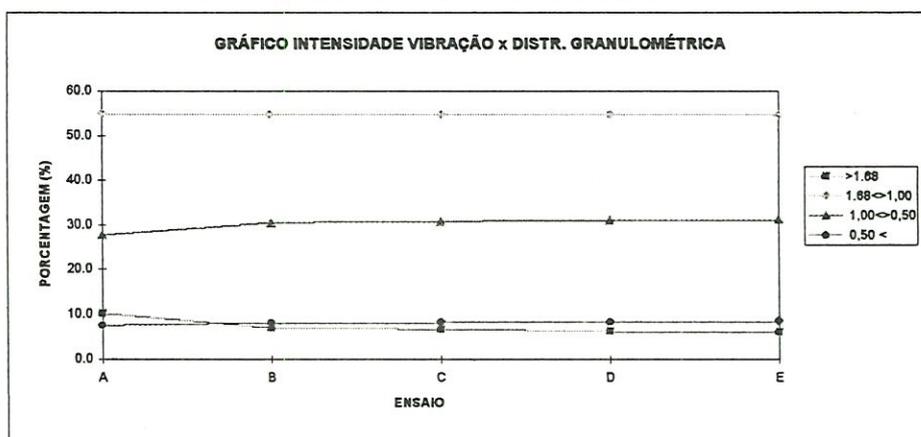
PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	558.5
1.00	492.7	547.7
0.50	456.1	487.4
BANDEJ	429.4	437.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.0	6.0
1.68<>1.00	55.0	54.6
1.00<>0.50	31.3	31.1
0.50 <	8.4	8.3
TOTAL	100.7	

- ENSAIO A = vibração manual 1 min
- ENSAIO B = vibração manual 3 min
- ENSAIO C = vibr. manual 3 min e vibr. mecânica 2 min
- ENSAIO D = vibr. manual 3 min e vibr. mecânica 1 min
- ENSAIO E = vibr. manual 3 min e vibr. mecânica 17 min

TABELA RESUMIDA

DIST. GRAN	ENSAIO				
	A	B	C	D	E
>1.68	10.1	6.9	6.5	6.1	6.0
1.68<>1.00	54.9	54.8	54.7	54.8	54.6
1.00<>0.50	27.6	30.4	30.7	30.9	31.1
0.50 <	7.4	8.0	8.1	8.3	8.3



Conclui-se que a intensidade de vibração para a execução da análise granulométrica não causa quebra da sílica gel, e que valores de agitação da ordem de 5 min (vibração manual e mecânica) são bem representativos da granulometria da amostra

ENSAIO SÍLICA GRANULOMETRIA 1.6 - 2.6 mm (úmida)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA SÍLICA SECA

ENSAIO	MÉDIA GRANULOMETRIA				GRANULOMETRIA SUPERIOR				GRANULOMETRIA INFERIOR			
	>1,68	1,68<>1,00	1,00<>0,50	0,50<	>1,68	1,68<>1,00	1,00<>0,50	0,50<	>1,68	1,68<>1,00	1,00<>0,50	0,50<
D2.1-V60-T80 - A	11.9	47.1	35.0	5.9	12.3	45.2	34.7	7.7	11.5	49.1	35.4	4.1
D2.1-V60-T80 - B	5.3	45.5	41.8	7.4	7.0	43.1	41.3	8.7	3.7	47.9	42.2	6.2
D2.1-V60-T80 - C	8.0	46.9	35.8	9.3	9.7	48.8	35.6	6.0	6.4	45.1	35.9	12.6
D2.1-V60-T120 - A	6.9	49.9	34.3	8.3	6.2	49.2	35.6	9.1	7.7	50.6	33.1	8.6
D2.1-V60-T120 - B	7.8	48.7	34.2	9.3	7.1	47.8	35.9	9.3	8.4	49.7	32.5	9.4
D2.1-V60-T120 - C	7.4	49.5	34.4	8.3	6.5	49.0	36.1	8.4	8.3	49.9	32.6	9.1
D2.1-V60-T180 - A	5.0	44.7	39.6	10.7	4.6	42.3	41.9	11.3	5.5	47.1	37.3	10.1
D2.1-V60-T180 - B	4.5	46.7	43.0	5.3	3.5	43.8	45.8	6.9	5.5	49.6	40.3	4.6
D2.1-V60-T180 - C	4.6	45.1	43.6	6.7	4.2	43.9	45.0	7.0	5.1	46.4	42.2	6.3
D2.1-V110-T80 - A	6.2	45.7	38.3	9.3	6.0	44.4	40.3	9.3	6.5	47.1	36.2	10.3
D2.1-V110-T80 - B	3.4	47.0	44.3	5.3	3.2	43.3	47.5	6.1	3.6	50.7	41.1	4.6
D2.1-V110-T80 - C	6.3	37.2	40.7	15.3	6.5	37.5	40.5	15.5	6.1	36.9	40.8	16.2
D2.1-V110-T120 - A	4.0	42.4	43.1	10.6	3.5	41.9	43.7	10.9	4.4	42.8	42.4	10.4
D2.1-V110-T120 - B	5.4	50.9	36.3	7.4	4.9	50.3	37.1	7.7	5.9	51.5	35.5	7.1
D2.1-V110-T120 - C	3.2	46.8	42.6	7.4	3.1	47.6	43.4	6.0	3.4	46.0	41.8	8.9
D2.1-V110-T180 - A	3.0	37.6	47.3	12.1	3.2	37.0	46.4	13.4	2.8	38.1	48.3	10.9
D2.1-V110-T180 - B	2.6	36.4	50.3	10.6	2.2	34.4	53.4	10.1	3.1	38.4	47.3	11.2
D2.1-V110-T180 - C	2.0	28.9	47.8	21.3	1.5	29.3	47.7	21.6	2.5	28.6	48.0	21.0
D2.1-V210-T80 - A	4.3	40.0	39.7	16.0	4.4	39.4	41.3	15.0	4.3	40.6	38.2	16.9
D2.1-V210-T80 - B	3.4	40.8	45.8	10.0	3.6	41.4	47.2	7.9	3.2	40.2	44.5	12.2
D2.1-V210-T80 - C	3.9	42.3	39.6	14.2	1.8	40.1	42.0	16.2	6.0	44.6	37.2	12.2
D2.1-V210-T120 - A	2.6	32.6	55.2	9.6	2.3	29.5	56.5	11.7	3.0	35.6	53.9	7.5
D2.1-V210-T120 - B	4.4	38.0	43.0	14.6	3.5	36.8	44.9	14.8	5.3	39.1	41.1	14.4
D2.1-V210-T120 - C	1.6	37.5	53.3	7.6	1.7	38.4	54.1	5.8	1.5	36.6	52.4	9.4
D2.1-V210-T180 - A	2.2	37.5	51.6	8.6	2.3	36.8	52.4	8.6	2.2	38.3	50.9	8.6
D2.1-V210-T180 - B	3.0	39.5	50.2	7.3	2.8	39.7	50.6	6.9	3.2	39.3	49.7	7.8
D2.1-V210-T180 - C	3.7	40.8	47.2	8.4	4.6	41.5	45.8	8.2	2.8	40.0	48.6	8.6

ENSAIO SÍLICA GRANULOMETRIA 3,7 - 5,1 mm (úmida)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA SÍLICA SECA

ENSAIO	MÉDIA GRANULOMETRIA					GRANULOMETRIA SUPERIOR					GRANULOMETRIA INFERIOR				
	>3.36 (mm)	3.36<>2,00 (mm)	2.00<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)	>3.36 (mm)	3.36<>2,00 (mm)	2.00<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)	>3.36 (mm)	3.36<>2,00 (mm)	2.00<>1,00 (mm)	1,00<>0,50 (mm)	0,50 < (mm)
D4.4-V60-T80 - A	0.6	15.8	48.4	29.0	6.2	0.5	15.4	47.0	28.2	8.8	0.8	16.1	49.7	29.8	3.5
D4.4-V60-T80 - B	1.2	16.6	40.4	25.6	16.2	1.0	16.5	40.1	26.3	16.0	1.5	16.6	40.7	24.8	16.4
D4.4-V60-T80 - C	0.8	13.7	38.5	26.3	20.7	0.6	12.9	37.6	28.5	20.4	1.0	14.6	39.3	24.1	21.1
D4.4-V60-T120 - A	0.0	21.0	46.1	23.8	9.2	0.0	18.3	48.9	23.4	9.4	0.0	23.7	43.3	24.1	8.9
D4.4-V60-T120 - B	0.0	13.3	39.3	35.3	12.1	0.0	23.2	42.0	28.9	5.9	0.0	3.5	36.5	41.7	18.3
D4.4-V60-T120 - C	0.0	6.5	46.5	30.8	16.2	0.0	6.3	44.4	31.2	18.1	0.0	6.7	48.5	30.5	14.3
D4.4-V60-T180 - A	0.0	9.1	50.9	27.9	12.1	0.0	9.7	51.8	27.0	11.5	0.0	8.4	50.1	28.8	12.7
D4.4-V60-T180 - B	0.0	7.2	48.2	31.6	12.9	0.0	6.3	47.0	33.3	13.4	0.0	8.2	49.4	29.8	12.5
D4.4-V60-T180 - C	0.1	12.7	48.0	27.0	12.1	0.1	12.9	49.5	27.1	10.4	0.2	12.4	46.5	26.9	13.9
D4.4-V110-T80 - A	0.1	16.2	45.8	26.3	11.5	0.3	17.2	45.6	25.2	11.7	0.0	15.2	46.0	27.4	11.4
D4.4-V110-T80 - B	0.1	6.7	38.3	36.0	18.9	0.1	7.5	40.5	35.1	16.8	0.1	5.9	36.1	36.9	20.9
D4.4-V110-T80 - C	0.0	8.2	48.6	31.9	11.3	0.0	9.7	52.2	28.4	9.7	0.0	6.8	45.0	35.4	12.9
D4.4-V110-T120 - A	0.1	14.8	49.6	25.1	10.4	0.1	14.2	53.8	25.1	6.8	0.1	15.4	45.4	25.1	13.9
D4.4-V110-T120 - B	0.1	14.0	52.4	24.4	9.0	0.1	14.1	53.8	25.2	6.8	0.1	13.9	51.1	23.6	11.3
D4.4-V110-T120 - C	0.3	14.6	50.7	25.8	8.6	0.3	13.8	51.7	25.2	9.0	0.4	15.4	49.7	26.3	8.3
D4.4-V110-T180 - A	0.0	2.6	46.2	38.7	12.4	0.0	2.1	50.3	38.5	9.1	0.1	3.2	42.0	39.0	15.8
D4.4-V110-T180 - B	0.1	9.6	45.7	30.5	14.0	0.1	17.9	44.8	27.0	10.3	0.1	1.4	46.7	34.0	17.7
D4.4-V210-T80 - A	0.2	11.3	41.9	31.0	15.6	0.2	13.0	46.0	30.0	10.7	0.2	9.6	37.8	32.0	20.4
D4.4-V210-T80 - B	0.0	11.5	51.1	27.0	10.4	0.0	10.0	49.9	27.3	12.9	0.1	13.0	52.3	26.8	7.8
D4.4-V210-T80 - C	0.0	11.2	56.3	26.9	5.6	0.0	11.9	58.5	24.6	5.0	0.0	10.5	54.1	29.1	6.3
D4.4-V210-T120 - A	0.0	8.1	47.8	33.2	10.9	0.0	7.3	53.0	30.4	9.3	0.0	9.0	42.6	35.9	12.5
D4.4-V210-T120 - C	0.0	4.8	49.4	32.6	13.2	0.0	4.5	50.4	30.8	14.3	0.0	5.2	48.4	34.3	12.1
D4.4-V210-T180 - A	0.0	3.0	51.2	38.1	7.7	0.0	2.7	48.2	41.8	7.3	0.0	3.3	54.2	34.3	8.2
D4.4-V210-T180 - B	0.0	1.7	55.1	38.5	4.7	0.1	1.7	57.8	37.2	3.3	0.0	1.8	52.3	39.8	6.1
D4.4-V210-T180 - C	0.0	1.5	51.2	39.8	7.4	0.1	1.4	53.7	38.9	5.9	0.0	1.7	48.7	40.8	8.8

A.1.6- Dados da análise granulométrica para cada configuração de ensaio

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
60 kg/h

TEMPERATURA
80 o.C

RUN RU 1027 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.6	569.0
1.00	481.6	527.2
0.50	456.0	491.0
BANDEJ	429.3	437.1

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	12.4	12.3
1.68<>1.00	45.6	45.2
1.00<>0.50	35.0	34.7
0,50 <	7.8	7.7
TOTAL	100.8	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.6	567.0
1.00	481.6	526.0
0.50	456.0	488.0
BANDEJ	429.3	433.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	10.4	11.49
1.68<>1.00	44.4	49.06
1,00<>0,50	32.0	35.36
0,50 <	3.7	4.09
TOTAL	90.5	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

RUN RU 1027 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.6	563.6
1.00	481.6	524.9
0.50	455.9	497.4
BANDEJ	429.3	438.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	7.0	7.0
1.68<>1.00	43.3	43.1
1,00<>0,50	41.5	41.3
0,50 <	8.7	8.7
TOTAL	100.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.6	560.0
1.00	481.6	526.0
0.50	455.9	495.0
BANDEJ	429.3	435.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.4	3.67
>1.68	44.4	47.95
>1.68	39.1	42.22
>1.68	5.7	6.16
TOTAL	92.6	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

RUN RU 1028 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.6	566.3
1.00	481.6	530.6
0.50	456.0	491.8
BANDEJ	429.3	435.3

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	9.7	9.7
1.68<>1.00	49.0	48.8
1,00<>0,50	35.8	35.6
0,50 <	6.0	6.0
TOTAL	100.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.6	563.0
1.00	481.6	527.0
0.50	456.0	492.2
BANDEJ	429.3	442.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.4	6.4
1.68<>1.00	45.4	45.1
1,00<>0,50	36.2	35.9
0,50 <	12.7	12.6
TOTAL	100.7	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

RUN RU 1028 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470.5
2.00	572.4	587.9
1.00	481.5	528.8
0.50	455.9	484.3
BANDEJ	429.3	438.2

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.5	0.5
3.36<>2,00	15.5	15.4
2,00<>1,00	47.3	47.0
1,00<>0,50	28.4	28.2
0,50 <	8.9	8.8
TOTAL	100.6	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470.8
2.00	572.4	588.8
1.00	481.5	532.0
0.50	455.9	486.2
BANDEJ	429.3	432.9

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.8	0.8
3.36<>2,00	16.4	16.1
2,00<>1,00	50.5	49.7
1,00<>0,50	30.3	29.8
0,50 <	3.6	3.5
TOTAL	101.6	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

RUN RU 1029 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	471.0
2.00	572.4	589.0
1.00	481.5	521.8
0.50	455.9	482.3
BANDEJ	429.3	445.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	1.0	1.0
3.36<>2,00	16.6	16.5
2,00<>1,00	40.3	40.1
1,00<>0,50	26.4	26.3
0,50 <	16.1	16.0
TOTAL	100.4	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	471.5
2.00	572.4	589.1
1.00	481.5	522.5
0.50	455.9	480.9
BANDEJ	429.3	445.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	1.5	1.5
3.36<>2,00	16.7	16.6
2,00<>1,00	41.0	40.7
1,00<>0,50	25.0	24.8
0,50 <	16.5	16.4
TOTAL	100.7	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

RUN RU 1029 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470.6
2.00	572.4	585.2
1.00	481.6	519.0
0.50	455.9	484.2
BANDEJ	429.3	449.6

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.6	0.6
3.36<>2,00	12.8	12.9
2,00<>1,00	37.4	37.6
1,00<>0,50	28.3	28.5
0,50 <	20.3	20.4
TOTAL	99.4	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	471.0
2.00	572.4	587.0
1.00	481.6	521.0
0.50	455.9	480.0
BANDEJ	429.3	450.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	1.0	1.0
3.36<>2,00	14.6	14.6
2,00<>1,00	39.4	39.3
1,00<>0,50	24.1	24.1
0,50 <	21.1	21.1
TOTAL	100.2	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
60 kg/h

TEMPERATURA
120 o.C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	562.9
1.00	481.6	531.0
0.50	456.0	491.8
BANDEJ	429.3	438.4

RUN RU 1030 C

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.2	6.2
1.68<>1.00	49.4	49.2
1.00<>0.50	35.8	35.6
0.50 <	9.1	9.1
TOTAL	100.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	564.4
1.00	481.6	532.3
0.50	456.0	489.1
BANDEJ	429.3	437.9

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	7.7	7.69
1.68<>1.00	50.7	50.65
1.00<>0.50	33.1	33.07
0.50 <	8.6	8.59
TOTAL	100.1	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	564.0
1.00	481.6	530.6
0.50	456.0	492.8
BANDEJ	429.3	438.8

RUN RU 1031 B

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	7.3	7.1
1.68<>1.00	49.0	47.8
1.00<>0.50	36.8	35.9
0.50 <	9.5	9.3
TOTAL	102.6	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	565.2
1.00	481.6	531.7
0.50	456.0	488.8
BANDEJ	429.3	438.8

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	8.5	8.42
>1.68	50.1	49.65
>1.68	32.8	32.51
>1.68	9.5	9.42
TOTAL	100.9	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	563.2
1.00	481.6	530.9
0.50	456.0	492.3
BANDEJ	429.3	437.8

RUN 1031 C

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.5	6.5
1.68<>1.00	49.3	49.0
1.00<>0.50	36.3	36.1
0.50 <	8.5	8.4
TOTAL	100.6	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	565.1
1.00	481.6	531.9
0.50	456.0	488.9
BANDEJ	429.3	438.5

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	8.4	8.3
1.68<>1.00	50.3	49.9
1.00<>0.50	32.9	32.6
0.50 <	9.2	9.1
TOTAL	100.8	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.0	491.0
2.00	456.0	476.3
1.00	481.6	535.8
0.50	456.0	482.0
BANDEJ	429.4	439.8

RUN 1030 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	20.3	18.3
2.00<>1.00	54.2	48.9
1.00<>0.50	26.0	23.4
0.50 <	10.4	9.4
TOTAL	110.9	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.0	491.0
2.00	456.0	480.9
1.00	481.6	527.1
0.50	456.0	481.4
BANDEJ	429.4	438.8

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	24.9	23.7
2.00<>1.00	45.5	43.3
1.00<>0.50	25.4	24.1
0.50 <	9.4	8.9
TOTAL	105.2	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.0	491.0
2.00	456.0	484.2
1.00	481.7	532.9
0.50	456.0	491.2
BANDEJ	429.4	436.6

RUN RU 1030 B

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	28.2	23.2
2.00<>1.00	51.2	42.0
1.00<>0.50	35.2	28.9
0.50 <	7.2	5.9
TOTAL	121.8	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.0	491.0
2.00	456.0	459.2
1.00	481.6	514.6
0.50	456.0	493.7
BANDEJ	429.4	445.9

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	3.2	3.5
2.00<>1.00	33.0	36.5
1.00<>0.50	37.7	41.7
0.50 <	16.5	18.3
TOTAL	90.4	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470.0
2.00	572.4	578.8
1.00	481.5	526.4
0.50	455.9	487.4
BANDEJ	429.3	447.6

RUN RU 1031 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	6.4	6.3
2.00<>1.00	44.9	44.4
1.00<>0.50	31.5	31.2
0.50 <	18.3	18.1
TOTAL	101.1	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470
2.00	572.4	579.1
1.00	481.5	530.2
0.50	455.9	486.5
BANDEJ	429.3	443.7

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	6.7	6.7
2.00<>1.00	48.7	48.5
1.00<>0.50	30.6	30.5
0.50 <	14.4	14.3
TOTAL	100.4	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
60 kg/h

TEMPERATURA
180 o.C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	557.1
1.00	481.7	524.4
0.50	456.0	498.3
BANDEJ	429.4	440.8

RUN RU 1103 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	4.6	4.6
1.68<>1.00	42.7	42.3
1.00<>0.50	42.3	41.9
0,50 <	11.4	11.3
TOTAL	101.0	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	558.0
1.00	481.7	528.7
0.50	456.0	493.2
BANDEJ	429.4	439.5

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	5.5	5.51
1.68<>1.00	47.0	47.09
1.00<>0.50	37.2	37.27
0,50 <	10.1	10.12
TOTAL	99.8	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	556.0
1.00	481.7	525.8
0.50	456.0	502.2
BANDEJ	429.4	436.4

RUN RU 1103 B

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.5	3.5
1.68<>1.00	44.1	43.8
1.00<>0.50	46.2	45.8
0,50 <	7.0	6.9
TOTAL	100.8	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	558.1
1.00	481.7	531.8
0.50	456.0	496.7
BANDEJ	429.4	434.1

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	5.6	5.54
>1.68	50.1	49.55
>1.68	40.7	40.26
>1.68	4.7	4.65
TOTAL	101.1	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	556.7
1.00	481.7	526.0
0.50	456.0	501.4
BANDEJ	429.4	436.5

RUN 1103 C

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	4.2	4.2
1.68<>1.00	44.3	43.9
1.00<>0.50	45.4	45.0
0,50 <	7.1	7.0
TOTAL	101.0	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	557.6
1.00	481.7	528.3
0.50	456.0	498.4
BANDEJ	429.4	435.7

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	5.1	5.1
1.68<>1.00	46.6	46.4
1.00<>0.50	42.4	42.2
0,50 <	6.3	6.3
TOTAL	100.4	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.2	491.2
2.00	572.6	582.6
1.00	492.7	545.8
0.50	456.0	483.7
BANDEJ	429.5	441.3

RUN RU 1101 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	10.0	9.7
2.00<>1.00	53.1	51.8
1.00<>0.50	27.7	27.0
0,50 <	11.8	11.5
TOTAL	102.6	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.1
2.00	572.6	581.3
1.00	492.7	544.6
0.50	456.0	485.8
BANDEJ	429.5	442.7

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	8.7	8.4
2.00<>1.00	51.9	50.1
1.00<>0.50	29.8	28.8
0,50 <	13.2	12.7
TOTAL	103.6	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.1	470.1
2.00	572.6	578.9
1.00	481.7	528.8
0.50	456.1	489.5
BANDEJ	429.4	442.8

RUN RU 1101 B

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	6.3	6.3
2.00<>1.00	47.1	47.0
1.00<>0.50	33.4	33.3
0,50 <	13.4	13.4
TOTAL	100.2	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470.0
2.00	572.6	580.8
1.00	481.7	531.1
0.50	456.1	485.9
BANDEJ	429.4	441.9

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	8.2	8.2
2.00<>1.00	49.4	49.4
1.00<>0.50	29.8	29.8
0,50 <	12.5	12.5
TOTAL	99.9	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.6	586.1
1.00	492.8	544.4
0.50	456.0	484.3
BANDEJ	429.4	440.2

RUN RU 1104 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<>2.00	13.5	12.9
2.00<>1.00	51.6	49.5
1.00<>0.50	28.3	27.1
0,50 <	10.8	10.4
TOTAL	104.3	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.3
2.00	572.6	585.1
1.00	492.8	539.6
0.50	456.0	483.1
BANDEJ	429.4	443.4

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.2	0.2
3.36<>2.00	12.5	12.4
2.00<>1.00	46.8	46.5
1.00<>0.50	27.1	26.9
0,50 <	14.0	13.9
TOTAL	100.6	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
110 kg/h

TEMPERATURA
80 o.C

RUN RU 1114 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	558.6
1.00	481.7	526.2
0.50	456.1	496.5
BANDEJ	448.1	457.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.0	6.0
1.68<->1.00	44.5	44.4
1.00<->0.50	40.4	40.3
0.50 <	9.3	9.3
TOTAL	100.2	

RUN RU 1114 C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	555.8
1.00	481.6	525.1
0.50	456.0	503.7
BANDEJ	448.1	454.2

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.2	3.2
1.68<->1.00	43.5	43.3
1.00<->0.50	47.7	47.5
0.50 <	6.1	6.1
TOTAL	100.5	

RUN RU 1115 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	559.1
1.00	481.7	519.0
0.50	456.1	496.4
BANDEJ	448.1	463.5

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.5	6.5
1.68<->1.00	37.3	37.5
1.00<->0.50	40.3	40.5
0.50 <	15.4	15.5
TOTAL	99.5	

RUN RU 1114 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.4
2.00	572.7	590
1.00	481.7	527.4
0.50	456.1	481.4
BANDEJ	448.1	459.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.3	0.3
3.36<->2.00	17.3	17.2
2.00<->1.00	45.7	45.6
1.00<->0.50	25.3	25.2
0.50 <	11.7	11.7
TOTAL	100.3	

RUN RU 1115 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.7	580.2
1.00	481.7	522.3
0.50	456.1	491.3
BANDEJ	448.1	465

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<->2.00	7.5	7.5
2.00<->1.00	40.6	40.5
1.00<->0.50	35.2	35.1
0.50 <	16.9	16.8
TOTAL	100.3	

RUN RU 1115.C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.1
2.00	572.6	582.3
1.00	481.7	534.0
0.50	456.0	484.5
BANDEJ	448.1	457.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<->2.00	9.7	9.7
2.00<->1.00	52.3	52.2
1.00<->0.50	28.5	28.4
0.50 <	9.7	9.7
TOTAL	100.2	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	563.2
1.00	492.8	540.0
0.50	456.0	492.3
BANDEJ	429.4	439.7

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.5	6.48
1.68<->1.00	47.2	47.06
1.00<->0.50	36.3	36.19
0.50 <	10.3	10.27
TOTAL	100.3	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	560.3
1.00	492.8	543.7
0.50	456.1	497.3
BANDEJ	429.4	434.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.6	3.59
>1.68	50.9	50.75
>1.68	41.2	41.08
>1.68	4.6	4.59
TOTAL	100.3	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	562.7
1.00	492.8	529.0
0.50	456.1	496.2
BANDEJ	429.3	445.2

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.0	6.1
1.68<->1.00	36.2	36.9
1.00<->0.50	40.1	40.8
0.50 <	15.9	16.2
TOTAL	98.2	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.4	491.4
2.00	572.7	587.9
1.00	492.8	538.8
0.50	456.1	483.5
BANDEJ	429.4	440.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<->2.00	15.2	15.2
2.00<->1.00	46.0	46.0
1.00<->0.50	27.4	27.4
0.50 <	11.4	11.4
TOTAL	100	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.6	578.5
1.00	492.8	528.9
0.50	456.1	493.0
BANDEJ	448.1	469.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<->2.00	5.9	5.9
2.00<->1.00	36.1	36.1
1.00<->0.50	36.9	36.9
0.50 <	20.9	20.9
TOTAL	99.9	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.0	491.0
2.00	572.6	579.7
1.00	492.7	539.9
0.50	456.1	493.3
BANDEJ	448.1	461.6

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<->2.00	7.1	6.8
2.00<->1.00	47.2	45.0
1.00<->0.50	37.2	35.4
0.50 <	13.5	12.9
TOTAL	105	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
110 kg/h

TEMPERATURA
120 o.C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	556.1
1.00	481.6	523.3
0.50	456.0	499.5
BANDEJ	429.4	440.2

RUN RU 1112 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.5	3.5
1.68<->1.00	41.7	41.9
1.00<->0.50	43.5	43.7
0.50 <	10.8	10.9
TOTAL	99.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	557.0
1.00	481.6	524.5
0.50	456.0	498.5
BANDEJ	429.4	439.8

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	4.4	4.4
1.68<->1.00	42.9	42.8
1.00<->0.50	42.5	42.4
0.50 <	10.4	10.4
TOTAL	100.2	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	557.6
1.00	481.6	532.5
0.50	456.0	493.5
BANDEJ	429.4	437.2

RUN RU 1112 B

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	5.0	4.9
1.68<->1.00	50.9	50.3
1.00<->0.50	37.5	37.1
0.50 <	7.8	7.7
TOTAL	101.2	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	558.5
1.00	481.6	533.3
0.50	456.0	491.6
BANDEJ	429.4	436.5

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	5.9	5.9
>1.68	51.7	51.5
>1.68	35.6	35.5
>1.68	7.1	7.1
TOTAL	100.3	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	555.7
1.00	481.6	529.3
0.50	456.0	499.5
BANDEJ	429.4	435.4

RUN RU 1113 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.1	3.1
1.68<->1.00	47.7	47.6
1.00<->0.50	43.5	43.4
0.50 <	6.0	6.0
TOTAL	100.3	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	556.0
1.00	481.6	527.6
0.50	456.0	497.8
BANDEJ	429.4	438.3

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.4	3.4
1.68<->1.00	46.0	46.0
1.00<->0.50	41.8	41.8
0.50 <	8.9	8.9
TOTAL	100.1	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.6	586.9
1.00	481.6	535.7
0.50	456.1	481.4
BANDEJ	429.4	436.2

RUN RU 1111 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<->2.00	14.3	14.2
2.00<->1.00	54.1	53.8
1.00<->0.50	25.3	25.1
0.50 <	6.8	6.8
TOTAL	100.6	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.7	588.3
1.00	481.6	527.5
0.50	456.0	481.4
BANDEJ	429.4	443.5

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<->2.00	15.6	15.4
2.00<->1.00	45.9	45.4
1.00<->0.50	25.4	25.1
0.50 <	14.1	13.9
TOTAL	101.1	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.7	586.9
1.00	481.7	535.7
0.50	456.1	481.4
BANDEJ	429.4	436.2

RUN 1111 B

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<->2.00	14.2	14.1
2.00<->1.00	54.0	53.8
1.00<->0.50	25.3	25.2
0.50 <	6.8	6.8
TOTAL	100.4	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.7	586.0
1.00	481.7	530.5
0.50	456.1	478.6
BANDEJ	429.4	440.2

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<->2.00	13.3	13.9
2.00<->1.00	48.8	51.1
1.00<->0.50	22.5	23.6
0.50 <	10.8	11.3
TOTAL	95.5	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.4
2.00	572.7	586.8
1.00	481.6	534.4
0.50	456.0	481.8
BANDEJ	429.3	438.5

RUN 1111 C

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.3	0.3
3.36<->2.00	14.1	13.8
2.00<->1.00	52.8	51.7
1.00<->0.50	25.8	25.2
0.50 <	9.2	9.0
TOTAL	102.2	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.5
2.00	572.7	587.9
1.00	481.6	530.8
0.50	456.0	482.0
BANDEJ	429.4	437.6

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.4	0.4
3.36<->2.00	15.2	15.4
2.00<->1.00	49.2	49.7
1.00<->0.50	26.0	26.3
0.50 <	8.2	8.3
TOTAL	99	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
110 kg/h

TEMPERATURA
180 o.C

RUN RU 1110 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	555.7
1.00	481.6	518.7
0.50	456.0	502.5
BANDEJ	429.3	442.7

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.2	3.2
1.68<>1.00	37.1	37.0
1.00<>0.50	46.5	46.4
0,50 <	13.4	13.4
TOTAL	100.2	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	555.3
1.00	492.7	530.9
0.50	456.0	504.4
BANDEJ	429.4	440.3

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.8	2.8
1.68<>1.00	38.2	38.1
1.00<>0.50	48.4	48.3
0,50 <	10.9	10.9
TOTAL	100.3	

RUN RU 1110 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	554.7
1.00	481.6	516.4
0.50	456.0	510.0
BANDEJ	429.3	439.5

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.2	2.2
1.68<>1.00	34.8	34.4
1.00<>0.50	54.0	53.4
0,50 <	10.2	10.1
TOTAL	101.2	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	555.6
1.00	481.6	520.2
0.50	456.0	503.5
BANDEJ	429.3	440.5

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.1	3.1
>1.68	38.6	38.4
>1.68	47.5	47.3
>1.68	11.2	11.2
TOTAL	100.4	

RUN RU 1110 C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	554.0
1.00	481.6	511.0
0.50	456.0	503.9
BANDEJ	429.3	451.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	1.5	1.5
1.68<>1.00	29.4	29.3
1.00<>0.50	47.9	47.7
0,50 <	21.7	21.6
TOTAL	100.5	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.5	555.0
1.00	481.6	510.4
0.50	456.0	504.3
BANDEJ	429.3	450.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.5	2.5
1.68<>1.00	28.8	28.6
1.00<>0.50	48.3	48.0
0,50 <	21.1	21.0
TOTAL	100.7	

RUN 1108 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470
2.00	572.0	574.1
1.00	481.6	532.0
0.50	456.0	494.5
BANDEJ	429.3	438.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	2.1	2.1
2.00<>1.00	50.4	50.3
1.00<>0.50	38.5	38.5
0,50 <	9.1	9.1
TOTAL	100.1	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.0	470.1
2.00	572.0	575.2
1.00	481.6	523.7
0.50	456.0	495.1
BANDEJ	429.3	445.1

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<>2.00	3.2	3.2
2.00<>1.00	42.1	42.0
1.00<>0.50	39.1	39.0
0,50 <	15.8	15.8
TOTAL	100.3	

RUN 1109 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491	491.1
2.00	455.9	476.9
1.00	481.5	534.1
0.50	455.9	487.6
BANDEJ	429.2	441.3

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<>2.00	21.0	17.9
2.00<>1.00	52.6	44.8
1.00<>0.50	31.7	27.0
0,50 <	12.1	10.3
TOTAL	117.5	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491	491.1
2.00	455.9	457.3
1.00	481.5	527.6
0.50	455.9	489.5
BANDEJ	429.2	446.7

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<>2.00	1.4	1.4
2.00<>1.00	46.1	46.7
1.00<>0.50	33.6	34.0
0,50 <	17.5	17.7
TOTAL	98.7	

RUN RU

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36		
2.00		
1.00		
0.50		
BANDEJ		

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	#DIV/0!
3.36<>2.00	0.0	#DIV/0!
2.00<>1.00	0.0	#DIV/0!
1.00<>0.50	0.0	#DIV/0!
0,50 <	0.0	#DIV/0!
TOTAL	0	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36		
2.00		
1.00		
0.50		
BANDEJ		

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	#DIV/0!
3.36<>2.00	0.0	#DIV/0!
2.00<>1.00	0.0	#DIV/0!
1.00<>0.50	0.0	#DIV/0!
0,50 <	0.0	#DIV/0!
TOTAL	0	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
210 kg/h

TEMPERATURA
80 o.C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	557.0
1.00	481.6	521.2
0.50	456.0	497.5
BANDEJ	448.1	463.2

RUN RU 1117 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	4.4	4.4
1.68<>1.00	39.6	39.4
1.00<>0.50	41.5	41.3
0,50 <	15.1	15.0
TOTAL	100.6	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	561.0
1.00	492.8	533.6
0.50	456.0	494.4
BANDEJ	429.3	446.3

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	4.3	4.28
1.68<>1.00	40.8	40.60
1.00<>0.50	38.4	38.21
0,50 <	17.0	16.92
TOTAL	100.5	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	556.2
1.00	481.7	523.3
0.50	456.0	503.4
BANDEJ	448.1	456.0

RUN RU 1117 C

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.6	3.6
1.68<>1.00	41.6	41.4
1.00<>0.50	47.4	47.2
0,50 <	7.9	7.9
TOTAL	100.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	559.9
1.00	492.8	533.1
0.50	456.1	500.7
BANDEJ	429.4	441.6

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.2	3.19
>1.68	40.3	40.18
>1.68	44.6	44.47
>1.68	12.2	12.16
TOTAL	100.3	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	558.4
1.00	481.7	520.3
0.50	456.0	496.4
BANDEJ	448.2	463.8

RUN RU 1118 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	1.7	1.8
1.68<>1.00	38.6	40.1
1.00<>0.50	40.4	42.0
0,50 <	15.6	16.2
TOTAL	96.3	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	562.7
1.00	492.8	537.4
0.50	456.1	493.3
BANDEJ	429.4	441.6

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	6.0	6.0
1.68<>1.00	44.6	44.6
1.00<>0.50	37.2	37.2
0,50 <	12.2	12.2
TOTAL	100.0	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.3
2.00	572.7	585.8
1.00	481.7	527.9
0.50	456.1	486.3
BANDEJ	448.1	458.9

RUN RU 1116 A

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.2	0.2
3.36<>2.00	13.1	13.0
2.00<>1.00	46.2	46.0
1.00<>0.50	30.2	30.0
0,50 <	10.8	10.7
TOTAL	100.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.3
2.00	572.7	582.3
1.00	492.8	530.8
0.50	456.1	488.3
BANDEJ	429.4	449.9

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.2	0.2
3.36<>2.00	9.6	9.6
2.00<>1.00	38.0	37.8
1.00<>0.50	32.2	32.0
0,50 <	20.5	20.4
TOTAL	100.5	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.1
2.00	572.7	582.7
1.00	481.7	531.8
0.50	456.1	483.5
BANDEJ	448.1	461.1

RUN RU 1116 B

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	10.0	10.0
2.00<>1.00	50.1	49.9
1.00<>0.50	27.4	27.3
0,50 <	13.0	12.9
TOTAL	100.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.2
2.00	572.7	585.8
1.00	492.8	545.3
0.50	456.1	483.0
BANDEJ	429.4	437.2

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<>2.00	13.1	13.0
2.00<>1.00	52.5	52.3
1.00<>0.50	26.9	26.8
0,50 <	7.8	7.8
TOTAL	100.4	

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.1
2.00	572.7	584.7
1.00	481.7	540.5
0.50	456.1	480.8
BANDEJ	448.1	453.1

RUN RU 1116 C

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	12.0	11.9
2.00<>1.00	58.8	58.5
1.00<>0.50	24.7	24.6
0,50 <	5.0	5.0
TOTAL	100.5	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.2	491.2
2.00	572.7	583.2
1.00	492.8	547.0
0.50	456.1	485.3
BANDEJ	429.4	435.7

SILICA 3.7 - 5.1 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	10.5	10.5
2.00<>1.00	54.2	54.1
1.00<>0.50	29.2	29.1
0,50 <	6.3	6.3
TOTAL	100.2	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
210 kg/h

TEMPERATURA
120 o.C

RUN RU 1119 A

AMOSTRA SUPERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.1	558.4
1.00	481.7	511.8
0.50	456.1	513.7
BANDEJ	448.1	460.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.3	2.3
1.68<->1.00	30.1	29.5
1.00<->0.50	57.6	56.5
0.50 <	11.9	11.7
TOTAL	101.9	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.1	559.1
1.00	481.7	517.7
0.50	456.1	510.5
BANDEJ	448.1	455.7

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.0	2.97
1.68<->1.00	36.0	35.64
1.00<->0.50	54.4	53.86
0.50 <	7.6	7.52
TOTAL	101.0	

RUN RU 1119 B

AMOSTRA SUPERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	560.2
1.00	481.8	518.4
0.50	456.1	500.7
BANDEJ	448.1	462.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.5	3.5
1.68<->1.00	36.6	36.8
1.00<->0.50	44.6	44.9
0.50 <	14.7	14.8
TOTAL	99.4	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	557.9
1.00	492.8	532.1
0.50	456.1	497.4
BANDEJ	485.8	500.3

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	5.3	5.28
>1.68	39.3	39.14
>1.68	41.3	41.14
>1.68	14.5	14.44
TOTAL	100.4	

RUN RU 1119 C

AMOSTRA SUPERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.7	558.4
1.00	481.7	520.4
0.50	456.1	510.6
BANDEJ	448.1	453.9

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	1.7	1.7
1.68<->1.00	38.7	38.4
1.00<->0.50	54.5	54.1
0.50 <	5.8	5.8
TOTAL	100.7	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	552.6	554.1
1.00	492.8	529.7
0.50	456.1	508.9
BANDEJ	485.8	495.3

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	1.5	1.5
1.68<->1.00	36.9	36.6
1.00<->0.50	52.8	52.4
0.50 <	9.5	9.4
TOTAL	100.7	

RUN RU 1118 B

AMOSTRA SUPERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.1
2.00	572.8	580.1
1.00	481.7	535.0
0.50	456.1	486.7
BANDEJ	448.1	457.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<->2.00	7.3	7.3
2.00<->1.00	53.3	53.0
1.00<->0.50	30.6	30.4
0.50 <	9.3	9.3
TOTAL	100.5	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.1
2.00	572.7	581.7
1.00	492.8	535.6
0.50	456.1	492.1
BANDEJ	429.4	442.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<->2.00	9.0	9.0
2.00<->1.00	42.8	42.6
1.00<->0.50	36.0	35.9
0.50 <	12.6	12.5
TOTAL	100.4	

RUN RU 1118 C

AMOSTRA SUPERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36		
2.00		
1.00		
0.50		
BANDEJ		

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	#DIV/0!
3.36<->2.00	0.0	#DIV/0!
2.00<->1.00	0.0	#DIV/0!
1.00<->0.50	0.0	#DIV/0!
0.50 <	0.0	#DIV/0!
TOTAL	0	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36		
2.00		
1.00		
0.50		
BANDEJ		

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	#DIV/0!
3.36<->2.00	0.0	#DIV/0!
2.00<->1.00	0.0	#DIV/0!
1.00<->0.50	0.0	#DIV/0!
0.50 <	0.0	#DIV/0!
TOTAL	0	

RUN RU 1118 D

AMOSTRA SUPERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	491.1	491.1
2.00	572.7	577.2
1.00	492.8	543.5
0.50	456.1	487.1
BANDEJ	485.8	500.2

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<->2.00	4.5	4.5
2.00<->1.00	50.7	50.4
1.00<->0.50	31.0	30.8
0.50 <	14.4	14.3
TOTAL	100.6	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

MALHA (mm)	PENEIRA	
	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.1	470.1
2.00	572.7	577.9
1.00	481.7	530.3
0.50	456.1	490.6
BANDEJ	448.1	460.3

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<->2.00	5.2	5.2
2.00<->1.00	48.6	48.4
1.00<->0.50	34.5	34.3
0.50 <	12.2	12.1
TOTAL	100.5	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
SILICA SECA

VAZÃO
210 kg/h

TEMPERATURA
180 o.C

RUN RU 1121 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.8	559.1
1.00	492.8	530.1
0.50	456.1	509.2
BANDEJ	448.1	456.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.3	2.3
1.68<>1.00	37.3	36.8
1.00<>0.50	53.1	52.4
0,50 <	8.7	8.6
TOTAL	101.4	

RUN RU 1121 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.8	559.6
1.00	492.8	532.8
0.50	456.1	507.1
BANDEJ	448.1	455.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.8	2.8
1.68<>1.00	40.0	39.7
1.00<>0.50	51.0	50.6
0,50 <	6.9	6.9
TOTAL	100.7	

RUN RU 1121 C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
1.68	556.8	561.4
1.00	492.9	534.6
0.50	456.2	502.2
BANDEJ	448.2	456.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	4.6	4.6
1.68<>1.00	41.7	41.5
1.00<>0.50	46.0	45.8
0,50 <	8.2	8.2
TOTAL	100.5	

RUN RU 1120 A

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	471.1	471.1
2.00	572.8	575.5
1.00	492.8	541.5
0.50	456.1	498.3
BANDEJ	448.1	455.5

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	2.7	2.7
2.00<>1.00	48.7	48.2
1.00<>0.50	42.2	41.8
0,50 <	7.4	7.3
TOTAL	101	

RUN RU 1020 B

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.1	470.2
2.00	572.9	574.6
1.00	492.8	551.1
0.50	456.1	493.6
BANDEJ	448.1	451.4

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<>2.00	1.7	1.7
2.00<>1.00	58.3	57.8
1.00<>0.50	37.5	37.2
0,50 <	3.3	3.3
TOTAL	100.9	

RUN RU 1020 C

AMOSTRA SUPERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIA (g)	TOTAL (g)
3.36	470.1	470.2
2.00	572.9	574.3
1.00	492.8	547.1
0.50	456.1	495.4
BANDEJ	448.1	454.1

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.1	0.1
3.36<>2.00	1.4	1.4
2.00<>1.00	54.3	53.7
1.00<>0.50	39.3	38.9
0,50 <	6.0	5.9
TOTAL	101.1	

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.8	559.0
1.00	492.8	531.4
0.50	456.1	507.4
BANDEJ	448.1	456.8

SILICA 1.6 - 2.6 mm

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.2	2.18
1.68<>1.00	38.6	38.30
1.00<>0.50	51.3	50.90
0,50 <	8.7	8.61
TOTAL	100.8	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.8	560.0
1.00	492.8	532.3
0.50	456.1	506.0
BANDEJ	448.1	455.9

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	3.2	3.19
>1.68	39.5	39.34
>1.68	49.9	49.70
>1.68	7.8	7.77
TOTAL	100.4	

SILICA 1.6 - 2.6 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
1.68	556.8	559.6
1.00	492.8	533.0
0.50	456.1	504.9
BANDEJ	448.2	456.8

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>1.68	2.8	2.8
1.68<>1.00	40.2	40.0
1.00<>0.50	48.8	48.6
0,50 <	8.6	8.6
TOTAL	100.4	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.1	470.1
2.00	572.9	576.2
1.00	492.8	547.3
0.50	456.1	490.6
BANDEJ	448.1	456.3

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	3.3	3.3
2.00<>1.00	54.5	54.2
1.00<>0.50	34.5	34.3
0,50 <	8.2	8.2
TOTAL	100.5	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.1	470.1
2.00	572.9	574.7
1.00	492.8	545.5
0.50	456.1	496.2
BANDEJ	448.1	454.2

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	1.8	1.8
2.00<>1.00	52.7	52.3
1.00<>0.50	40.1	39.8
0,50 <	6.1	6.1
TOTAL	100.7	

SILICA 3.7 - 5.1 mm

AMOSTRA INFERIOR

PENEIRA		
MALHA (mm)	VAZIO (g)	TOTAL (g)
3.36	470.1	470.1
2.00	572.9	574.6
1.00	492.8	541.9
0.50	456.1	497.2
BANDEJ	448.1	457.0

DIST.GRANULOM.		
(mm)	PESO (g)	PORCE (%)
>3.36	0.0	0.0
3.36<>2.00	1.7	1.7
2.00<>1.00	49.1	48.7
1.00<>0.50	41.1	40.8
0,50 <	8.9	8.8
TOTAL	100.8	

7.2- RESULTADOS DOS ENSAIOS

- PLANINHAS

ENSAIO D2.1-V60-T80 -A

dados da secagem

RU1027A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.260$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.8$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.244$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.016$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE

$T_{amb,m} = 27.9$ o.C
 $W_{amb,m} = 0.022$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 $T_{amb,m} = 79.3$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 2.7$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 7.3$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 340$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 284$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.84$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 13.2$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 14.8$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 60$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 57$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 18.3$ mmca

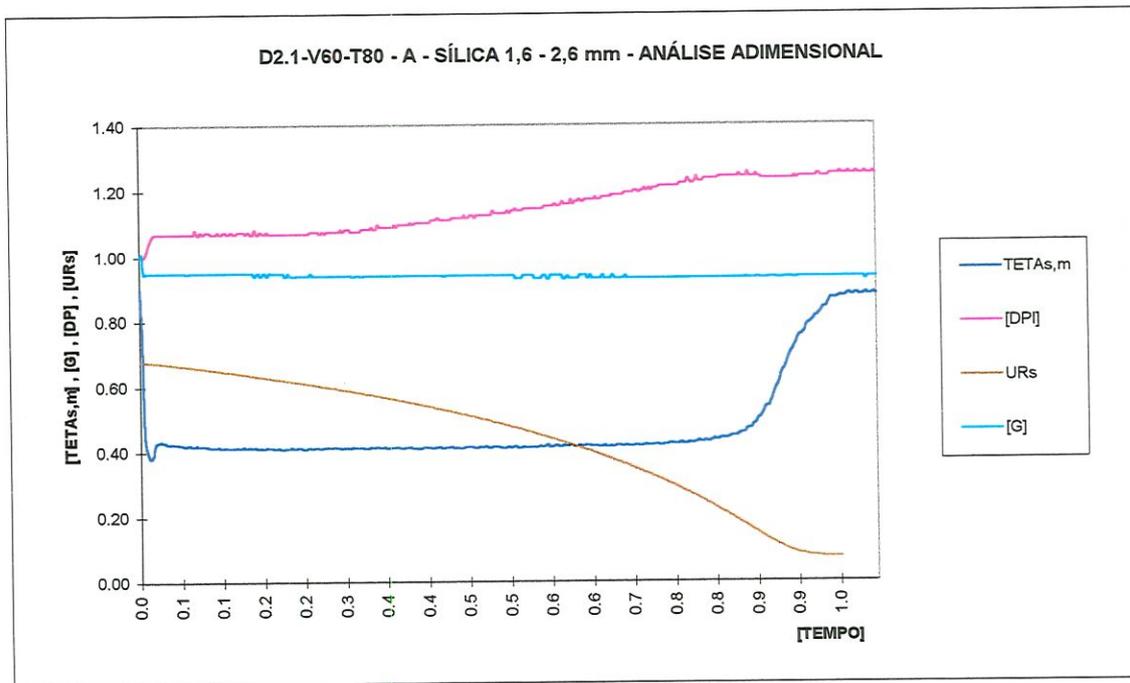
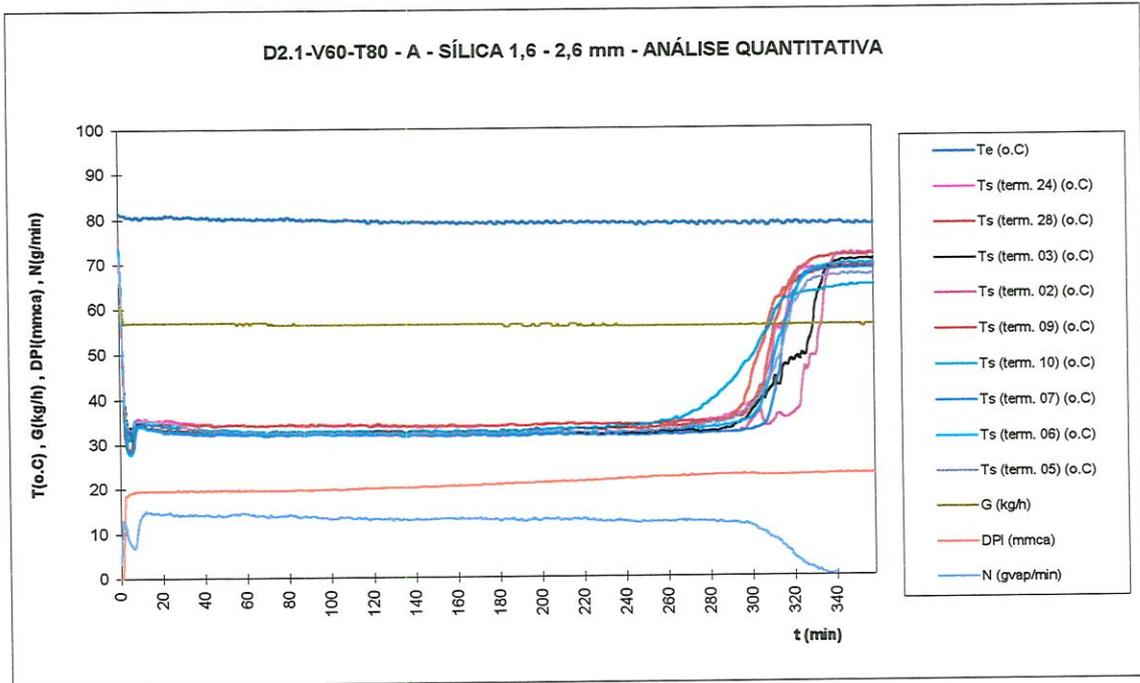


Figura A.2.1- Resultado do ensaio D2.1-V60-T80 -A

ENSAIO D2.1-V60-T80 - B dados da secagem

RU1027B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.160$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 23.6$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.8$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.018$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.176$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 81.0$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 1.984$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 2.2$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 325$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 4.9$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$\tau = 265$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_f = 0.82$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 13.7$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 60.1$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 14.2$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 57.1$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 16.3$ mmca

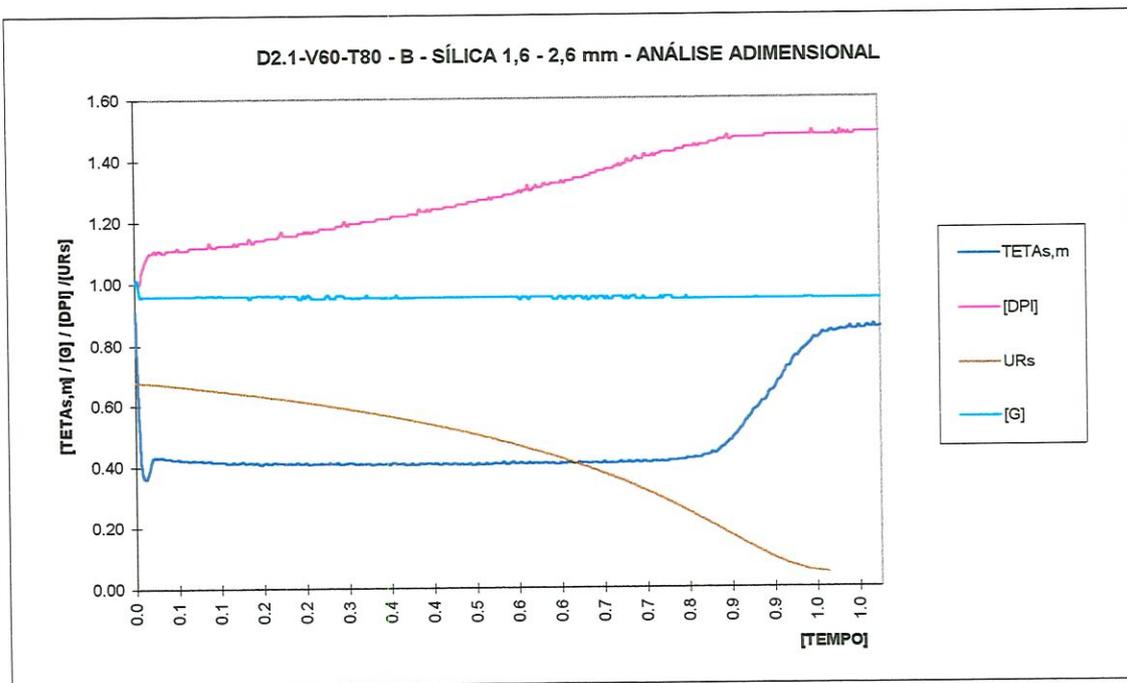
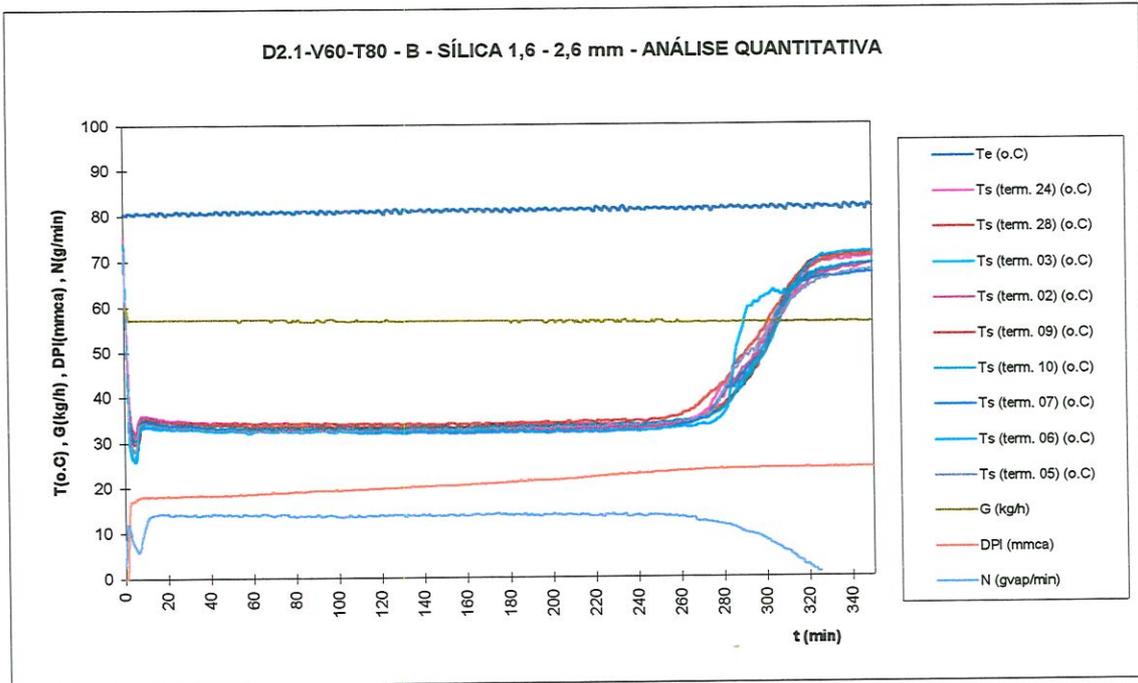


Figura A.2.2- Resultado do ensaio D2.1-V60-T80 -B

ENSAIO D2.1-V60-T80 -C

dados da secagem

RU1028A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.420$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.4$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.327$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.093$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE

$T_{amb,m} = 28.6$ o.C
 $w_{amb,m} = 0.021$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 $T_{amb,m} = 80.7$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 2.0$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 5.7$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_r = 338$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_f = 283$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.84$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 14.1$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 16.4$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 60.1$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 57.1$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 17.4$ mmca

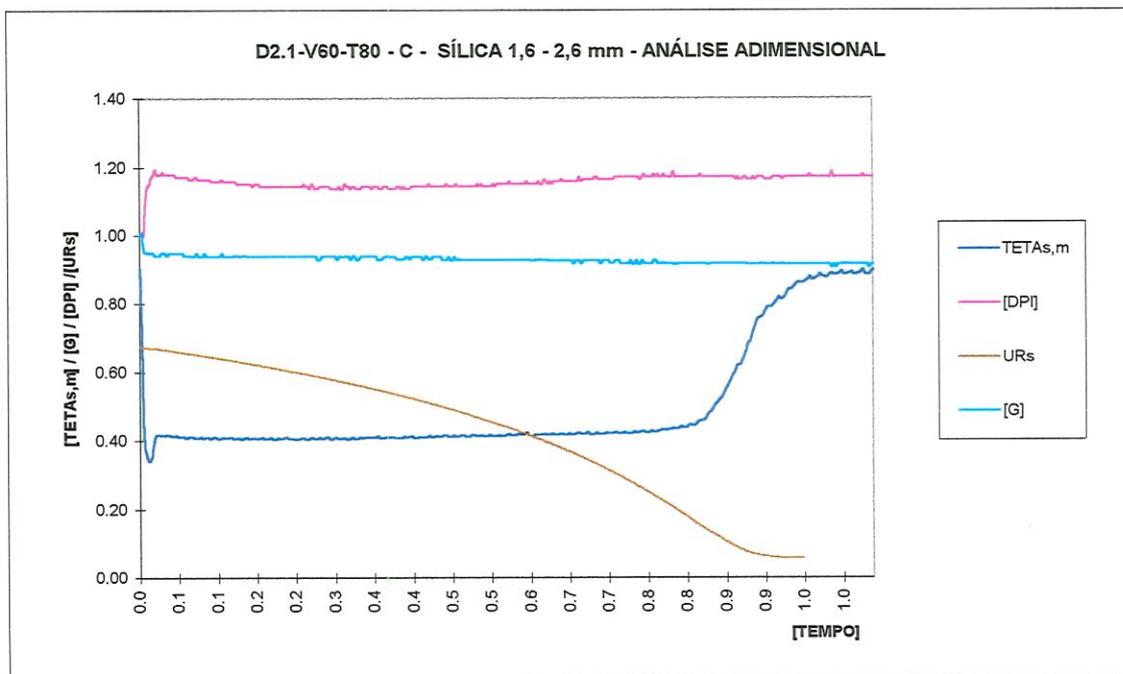
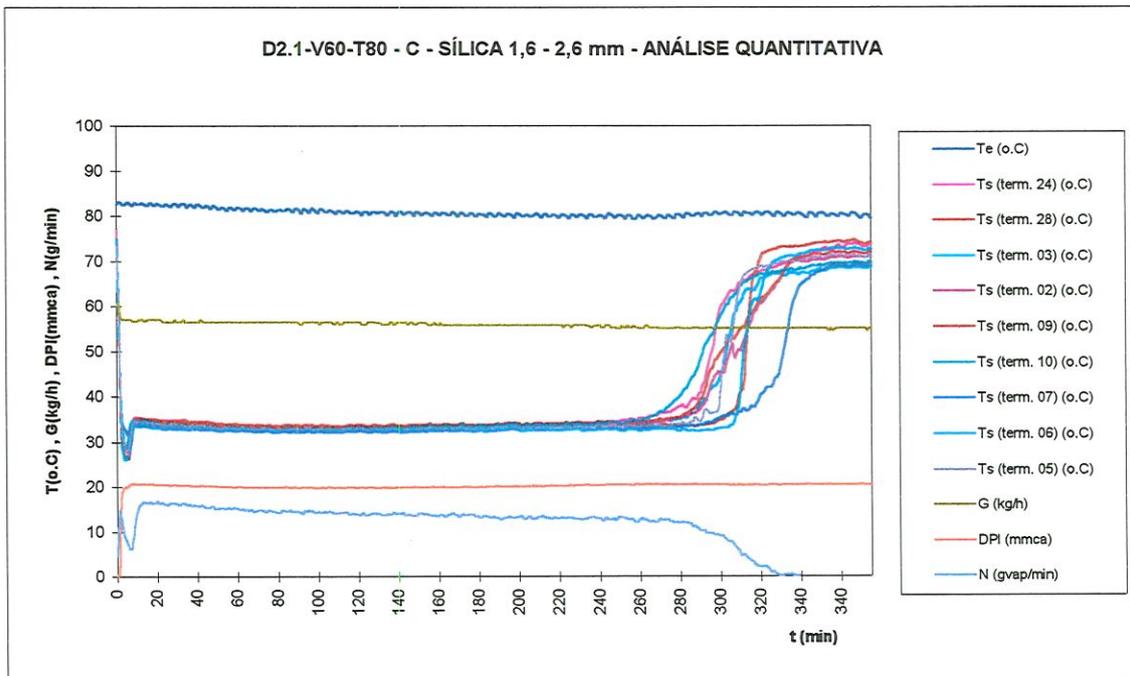


Figura A.2.3- Resultado do ensaio D2.1-V60-T80 - C

ENSAIO D4.4-V60-T80 -B

dados da secagem

RU1029A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.600$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.2$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.435$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.165$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE

$T_{amb,m} = 30.5$ o.C
 $W_{amb,m} = 0.020$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 $T_{amb,m} = 80.5$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 1.9$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 12.6$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.
 TEMP ADMENSIONAL PONTO

$t_F = 347$ min
 $t_r = 268$ min
 $\tau_r = 0.77$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 13.9$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 16.4$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE

DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 59.5$ kg/h

DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 58.0$ kg/h

VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 8.6$ mmca

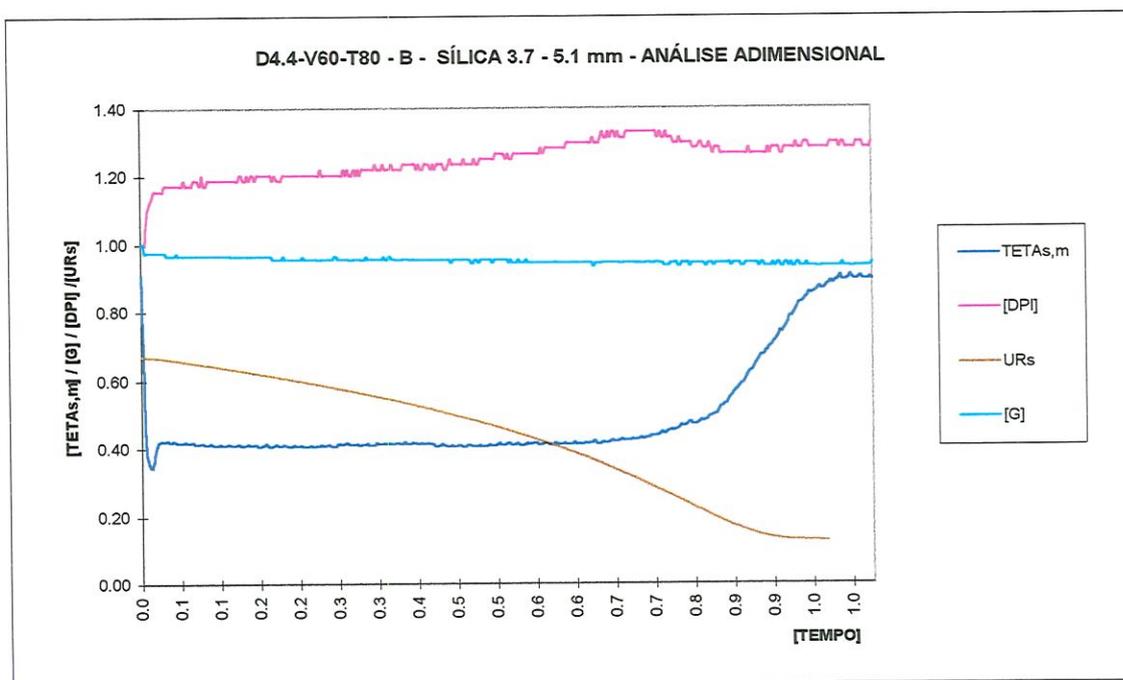
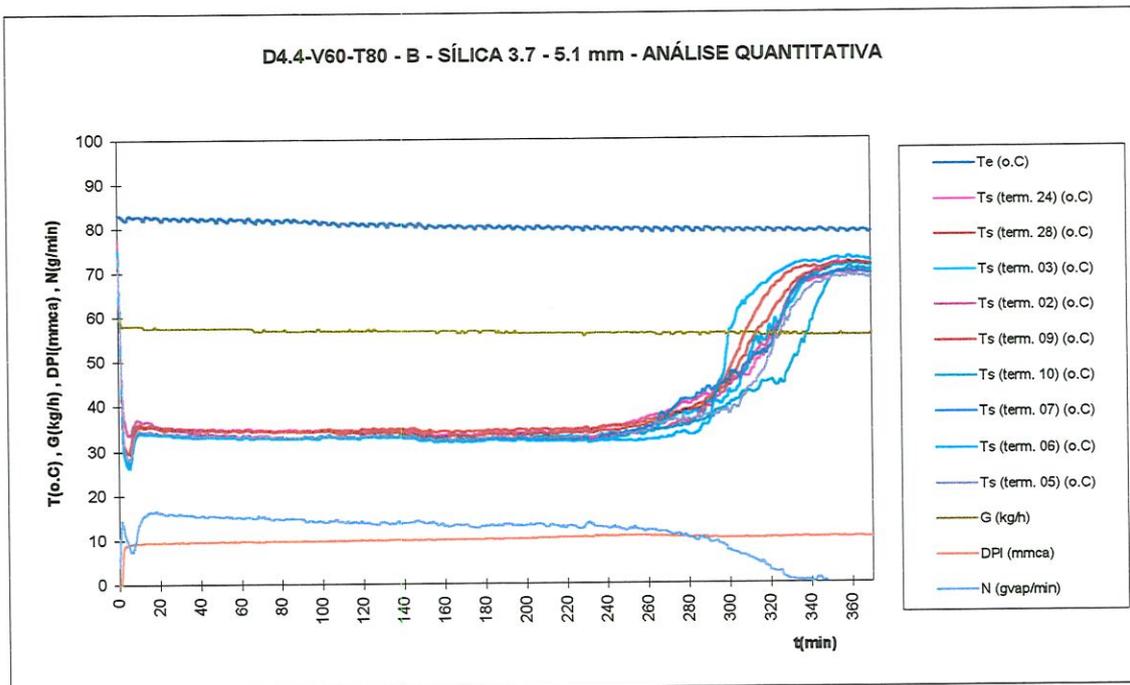


Figura A.2.4- Resultado do ensaio D4.4-V60-T80 - B

ENSAIO D4.4-V60-T80 - C

dados da secagem

RU1029B

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.600$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.6$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.462$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{ss} = 2.138$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE

$T_{amb,m} = 30.6$ o.C
 $W_{amb,m} = 0.020$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 $T_{amb,m} = 80.1$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 2.1$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 3.8$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 341$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 247$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.72$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 14.3$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 14.7$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 59.5$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 58.0$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 8.3$ mmca

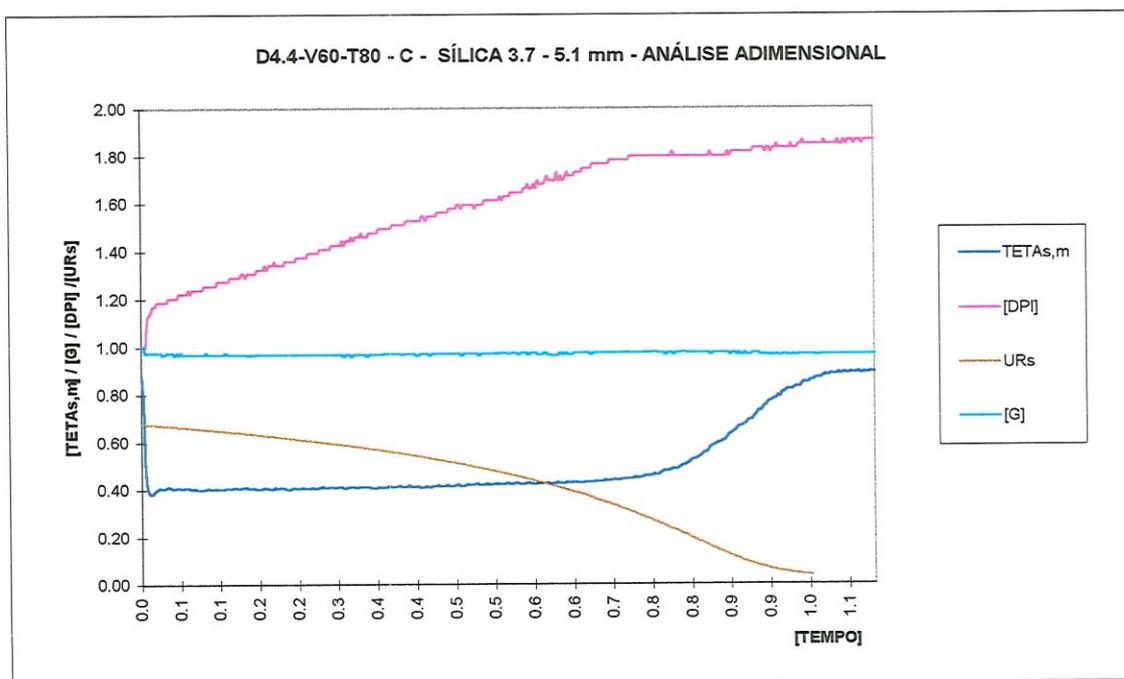
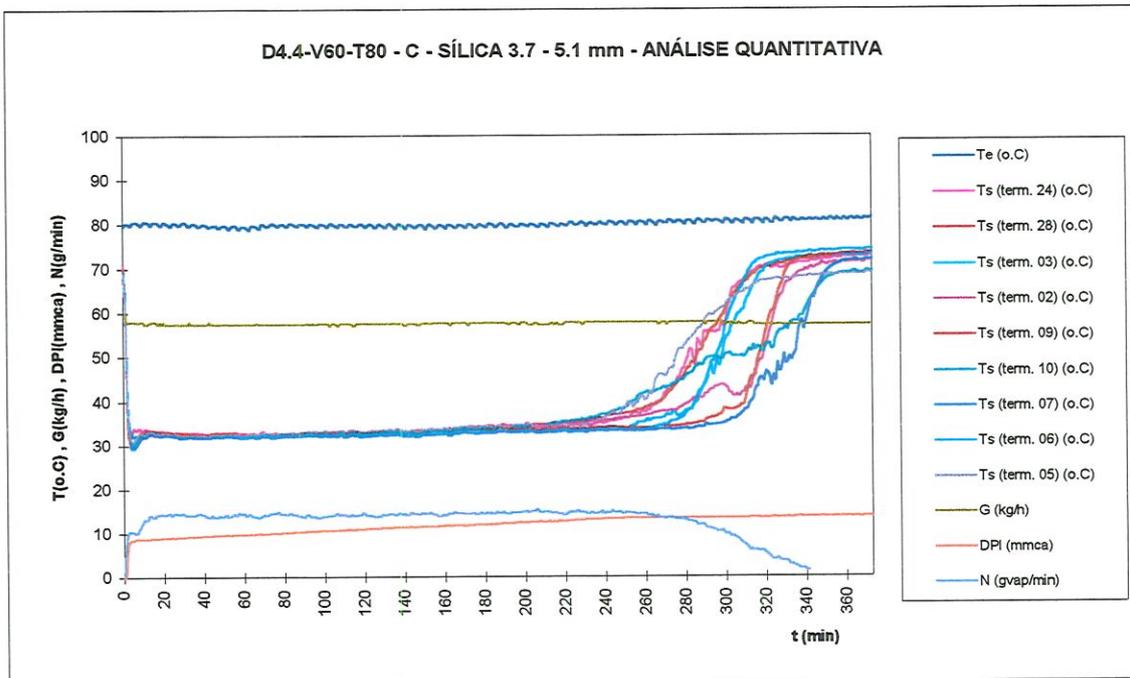


Figura A.2.5- Resultado do ensaio D4.4-V60-T80 - B

ENSAIO D2.1-V60-T120 -A dados da secagem

RU1030C

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.590$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 28.2$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.7$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.021$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.461$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 121.0$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.129$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.8$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 210$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 1.7$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 164$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$t_r = 0.78$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 23.3$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 59.8$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 24.5$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 57.3$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 19.4$ mmca

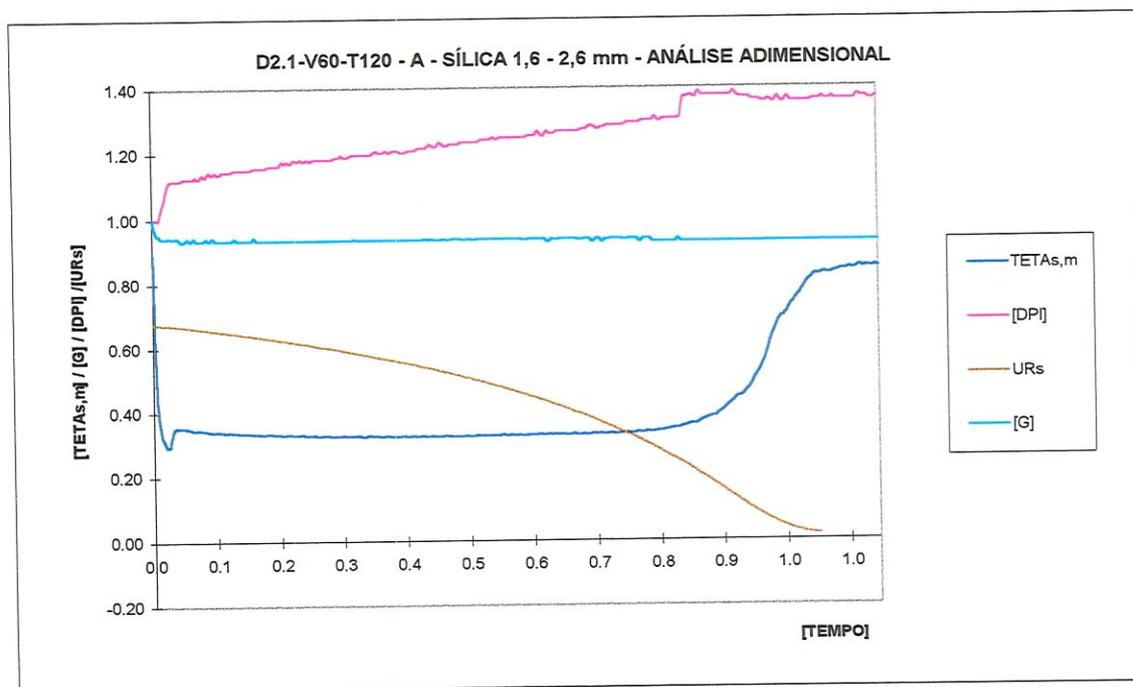
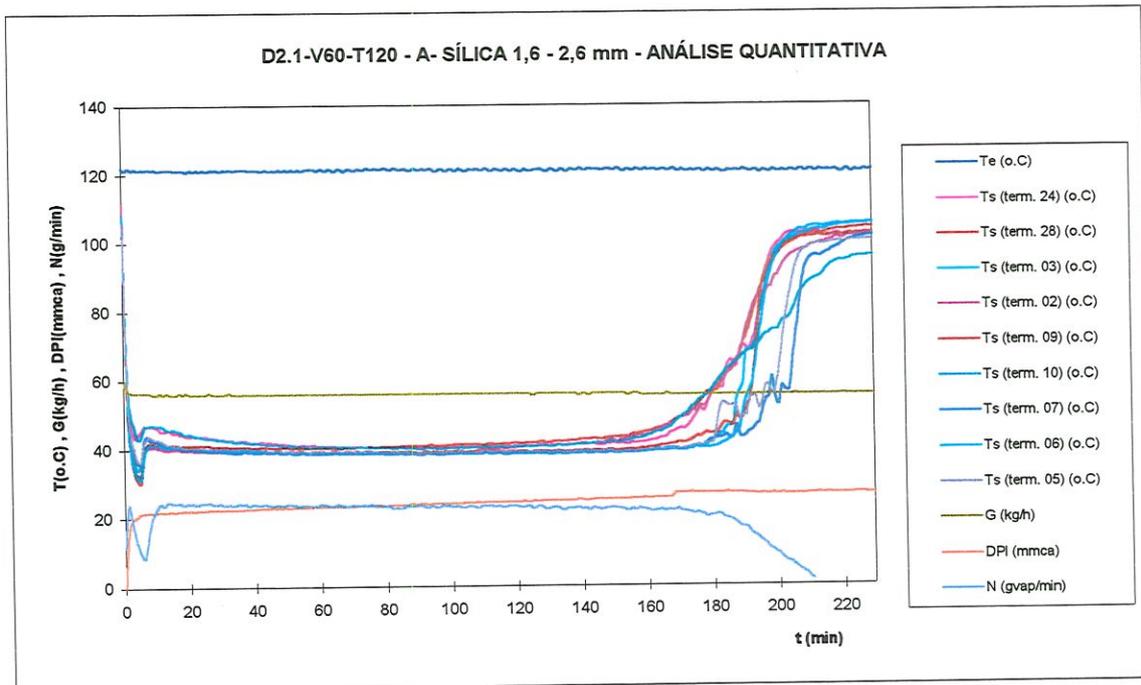


Figura A.2.6- Resultado do ensaio D2.1-V60-T120 - A

ENSAIO D2.1-V60-T120 - B dados da secagem

RU1031B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 31.7$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.8$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.025$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.475$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 117.2$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.125$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_e = 243$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 4.9$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 152$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$t_r = 0.63$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 21.5$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 60.6$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 22.8$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 59.6$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	DPI = 18.6 mmca

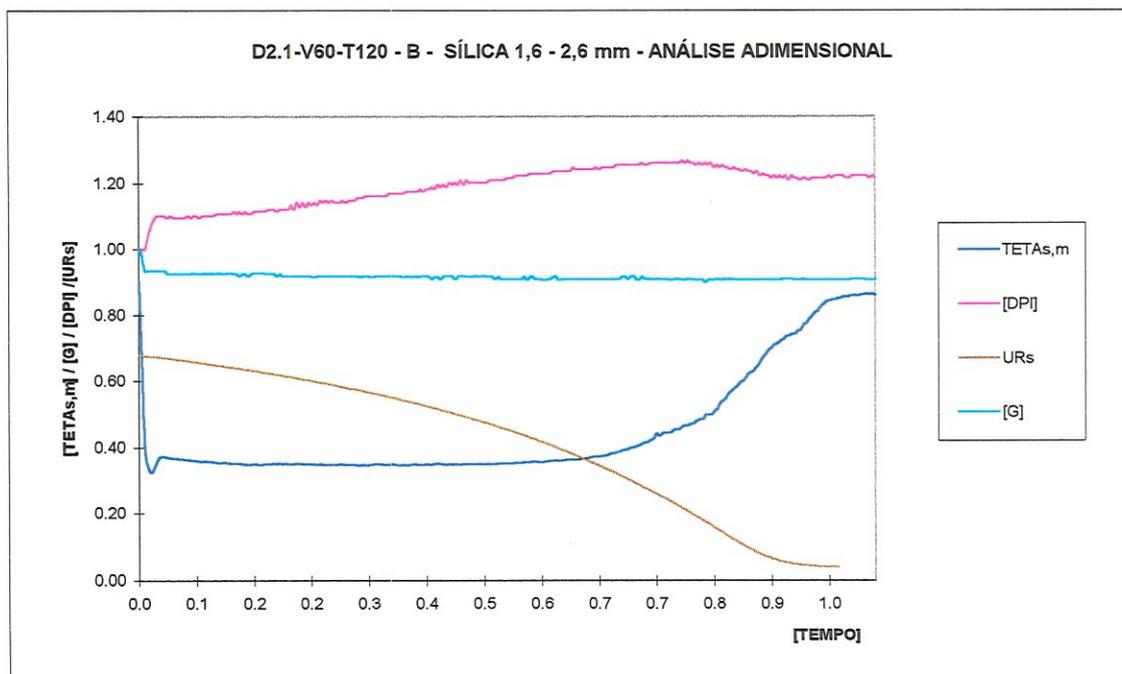
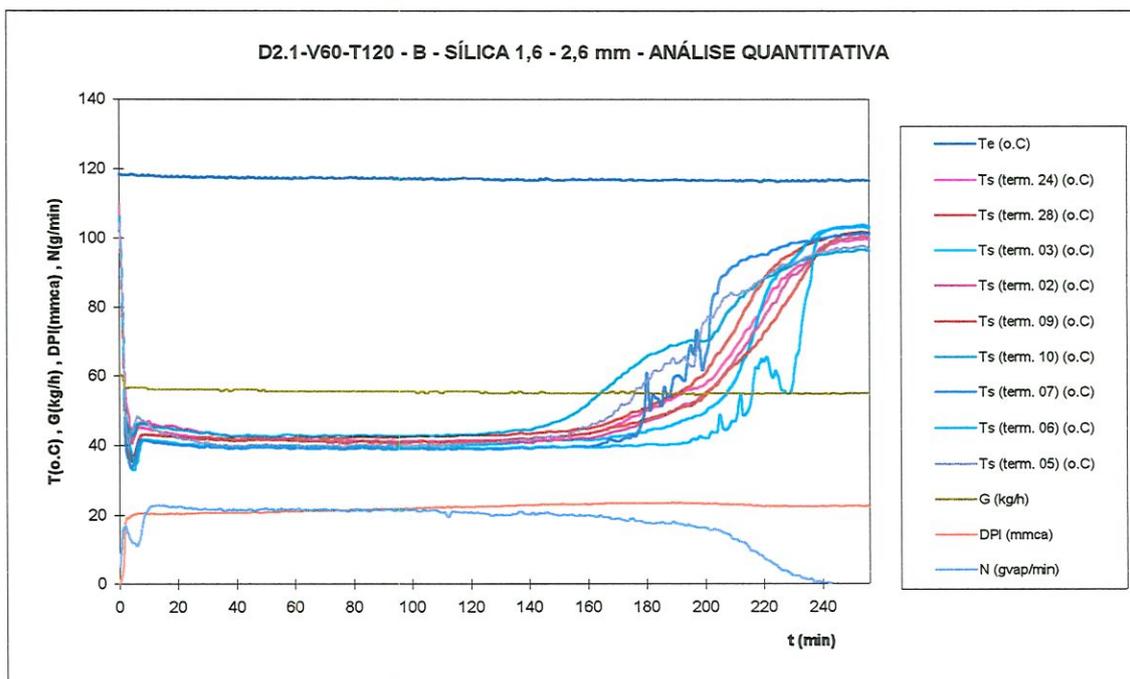


Figura A.2.7- Resultado do ensaio D2.1-V60-T120 - B

ENSAIO D2.1-V60-T120 - C dados da secagem

RU1031C

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.610$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.6$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.468$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{sp} = 2.142$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 26.7$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.021$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 120.8$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 1.0$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -1.8$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 227$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 152$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.67$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 22.8$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 23.5$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 59.5$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 56.9$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 15.3$ mmca

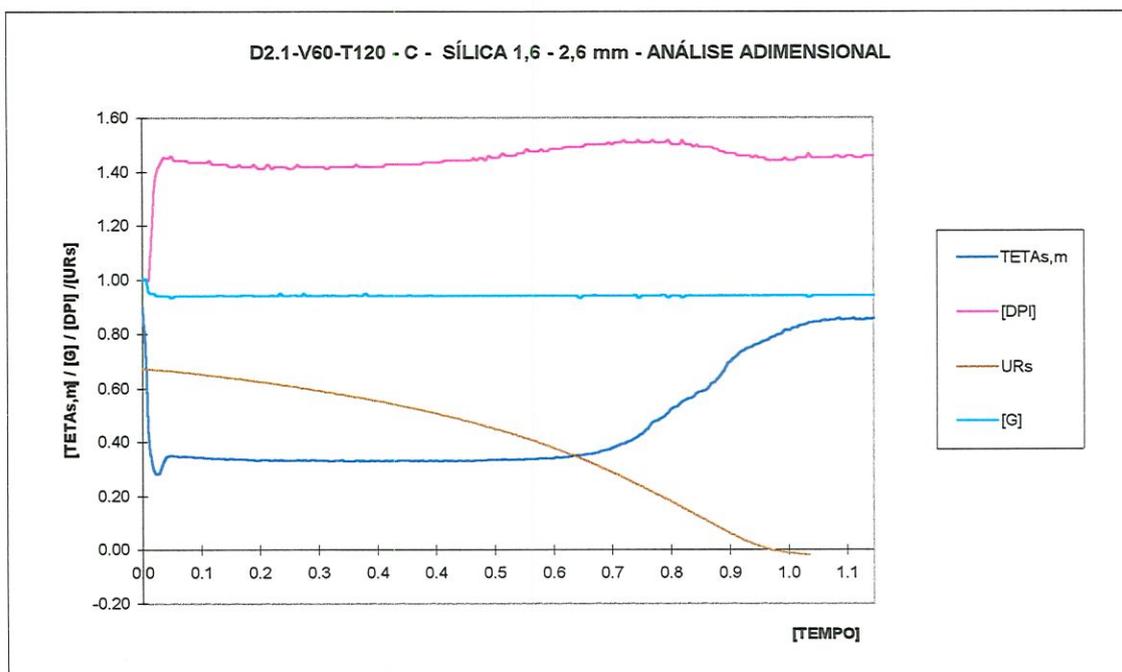
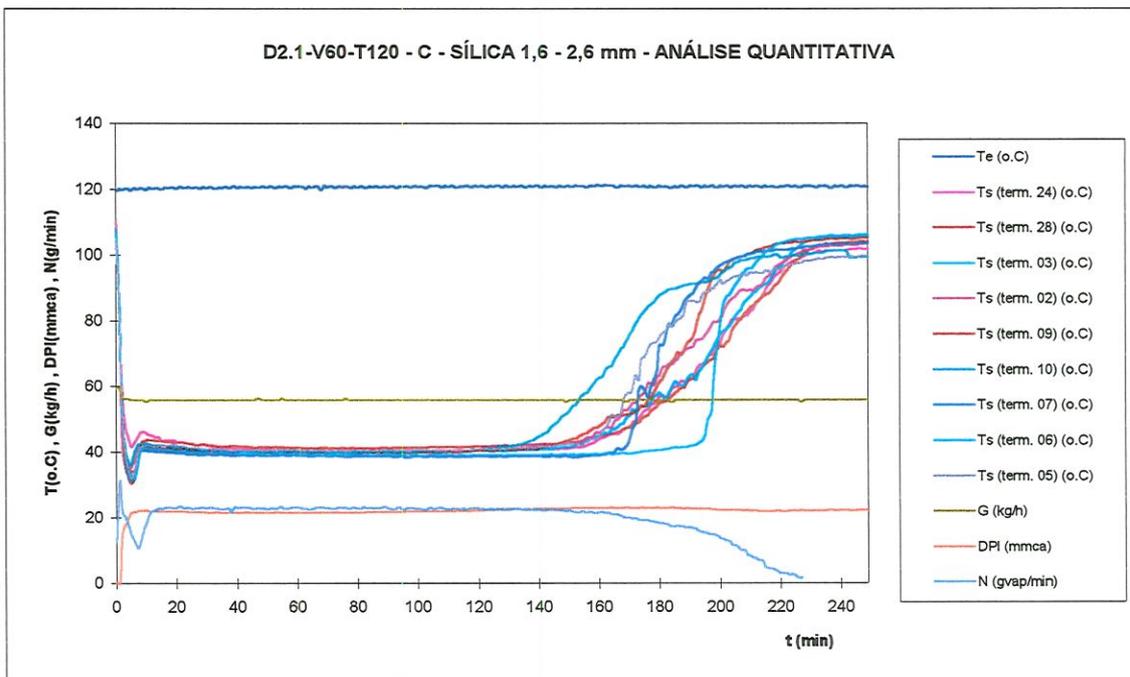


Figura A.2.8- Resultado do ensaio D2.1-V60-T120 - C

ENSAIO D4.4-V60-T120 - A dados da secagem

RU1030A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.610$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 29.2$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.5$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.024$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.462$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 120.0$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.148$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 213$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 1.6$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 142$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$t_d = 0.67$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 24.4$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 60.0$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 26.1$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 58.4$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 7.9$ mmca

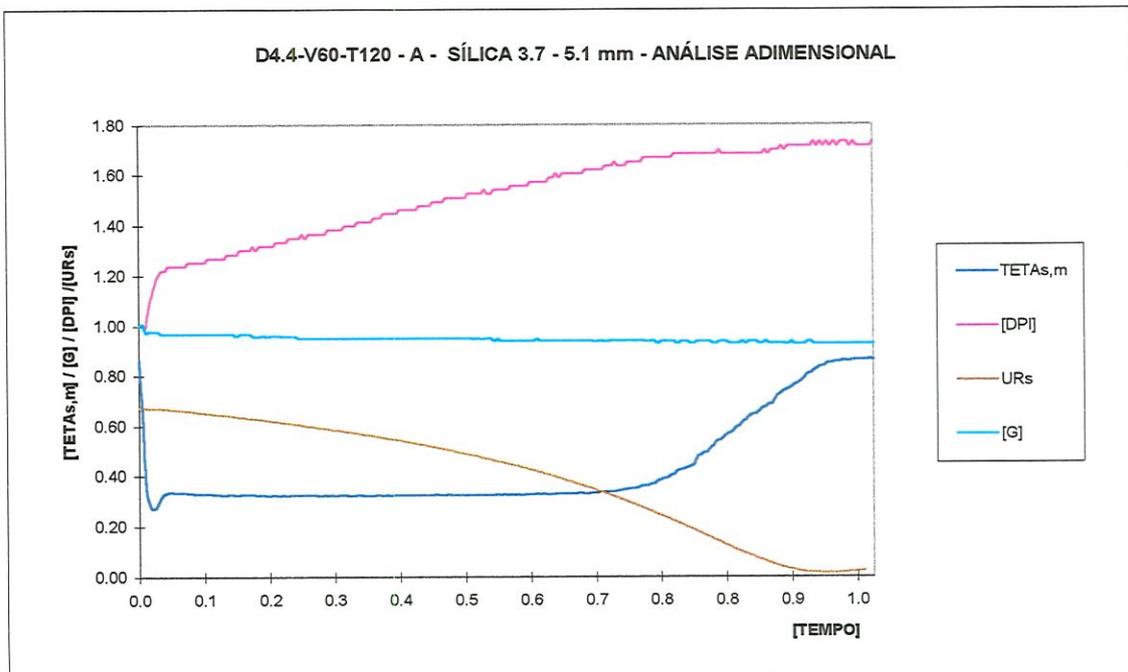
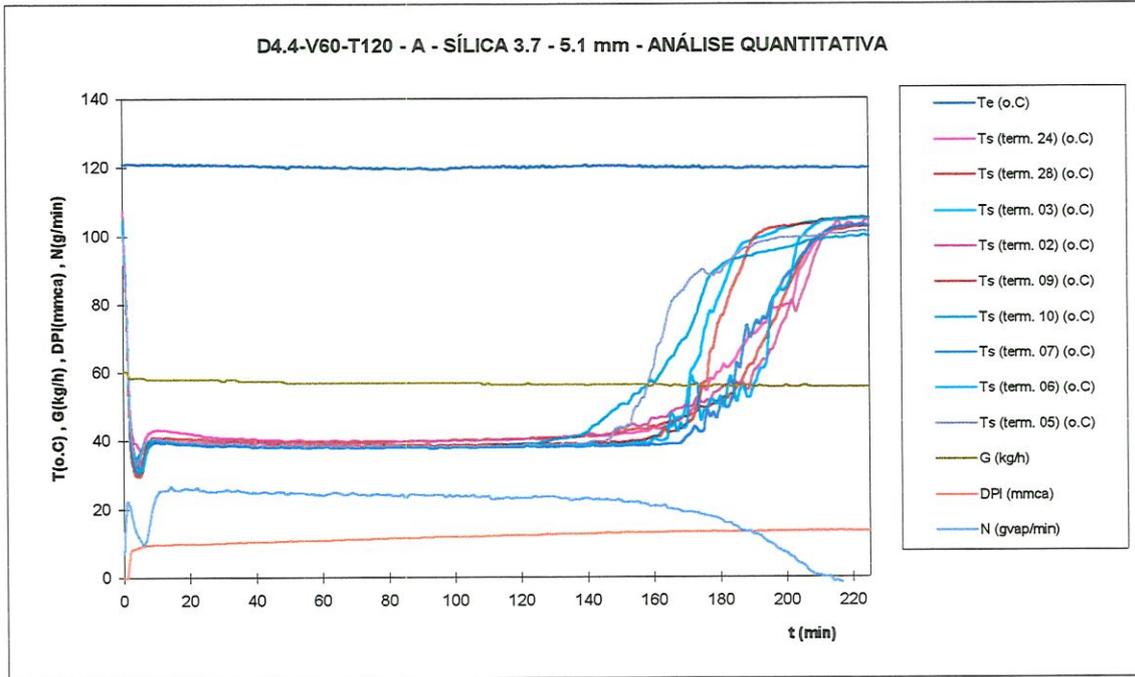


Figura A.2.9- Resultado do ensaio D4.4-V60-T120 - A

ENSAIO D4.4-V60-T120 -B dados da secagem

RU1030B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 33.5$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.9$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.026$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.547$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 119.9$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.053$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_c = 222$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 11.0$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 145$ min
		TEMP ADIMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.65$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 21.9$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 57.9$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 22.7$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 56.4$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 9.4$ mmca

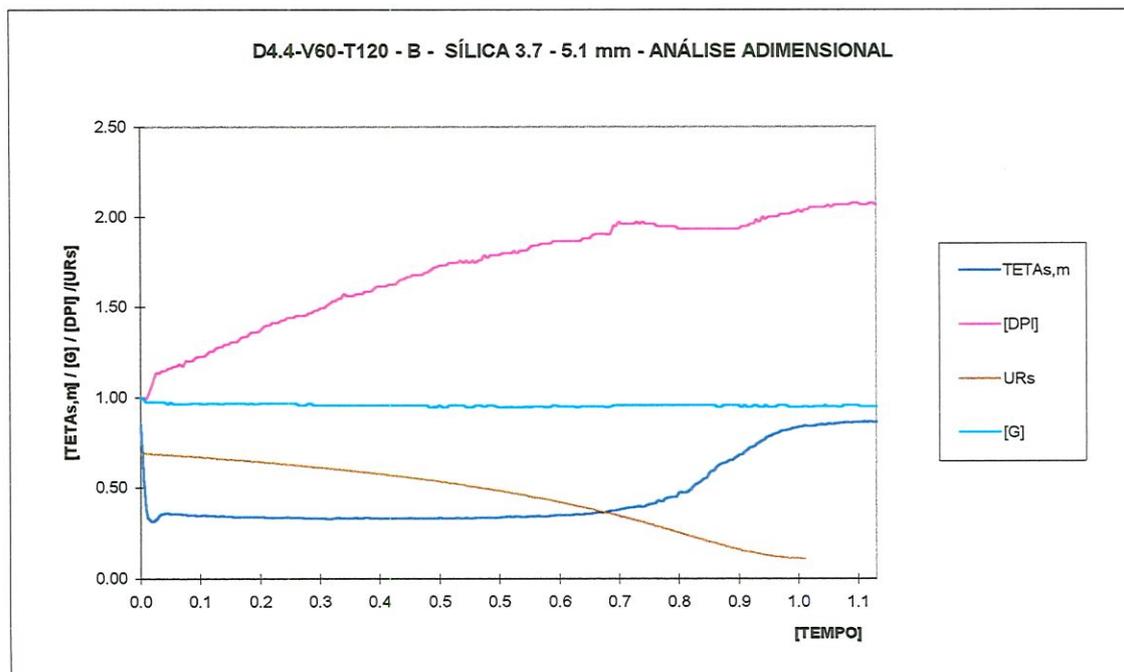
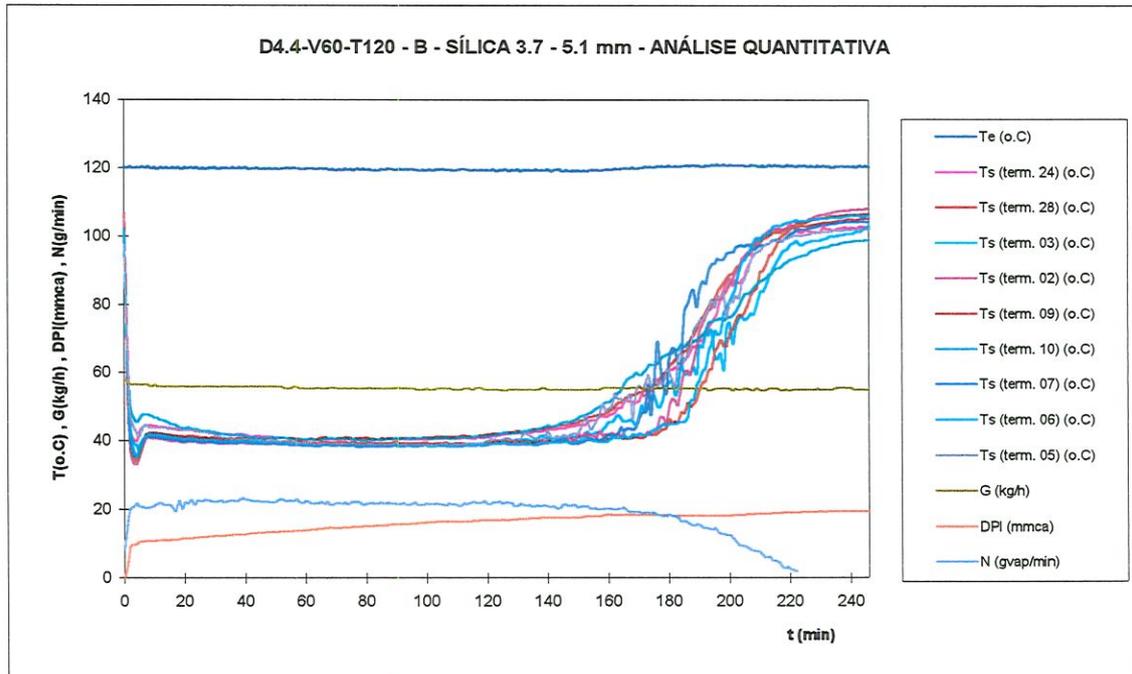


Figura A.2.10- Resultado do ensaio D4.4-V60-T120 - B

ENSAIO D2.1-V60-T180 -A dados da secagem

RU1103A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 29.9$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.1$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.023$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.495$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 180.4$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.105$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.5$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 145$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -2.1$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 99$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_f = 0.68$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 38.8$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(t,band)} = 60.2$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 40.6$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 56.7$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 20.9$ mmca

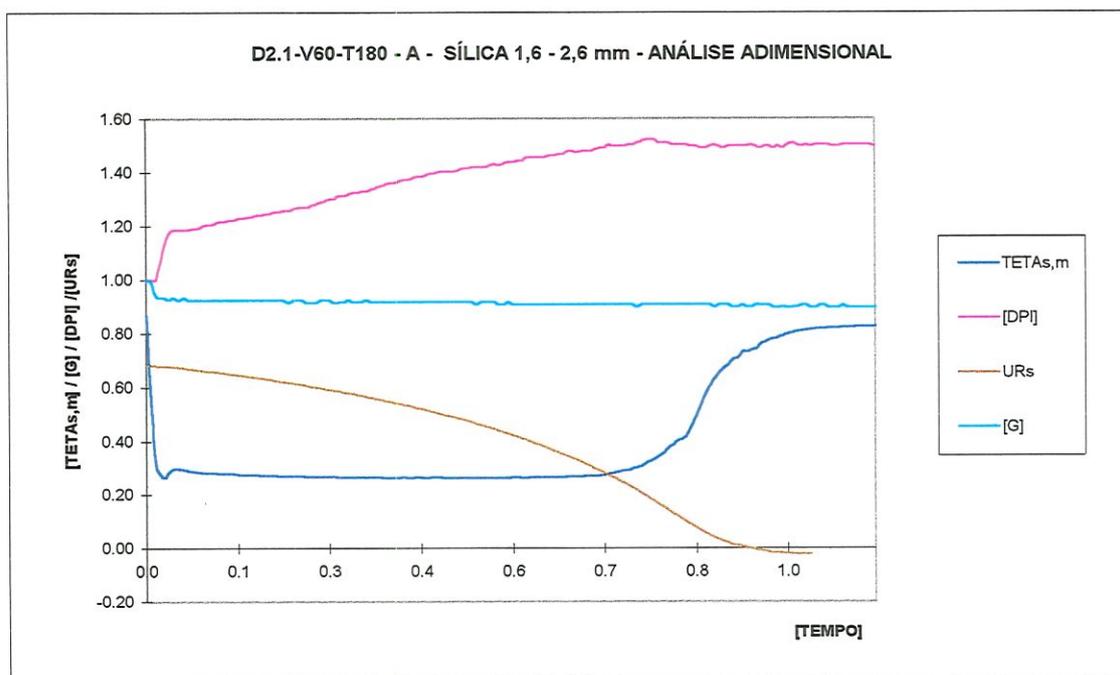
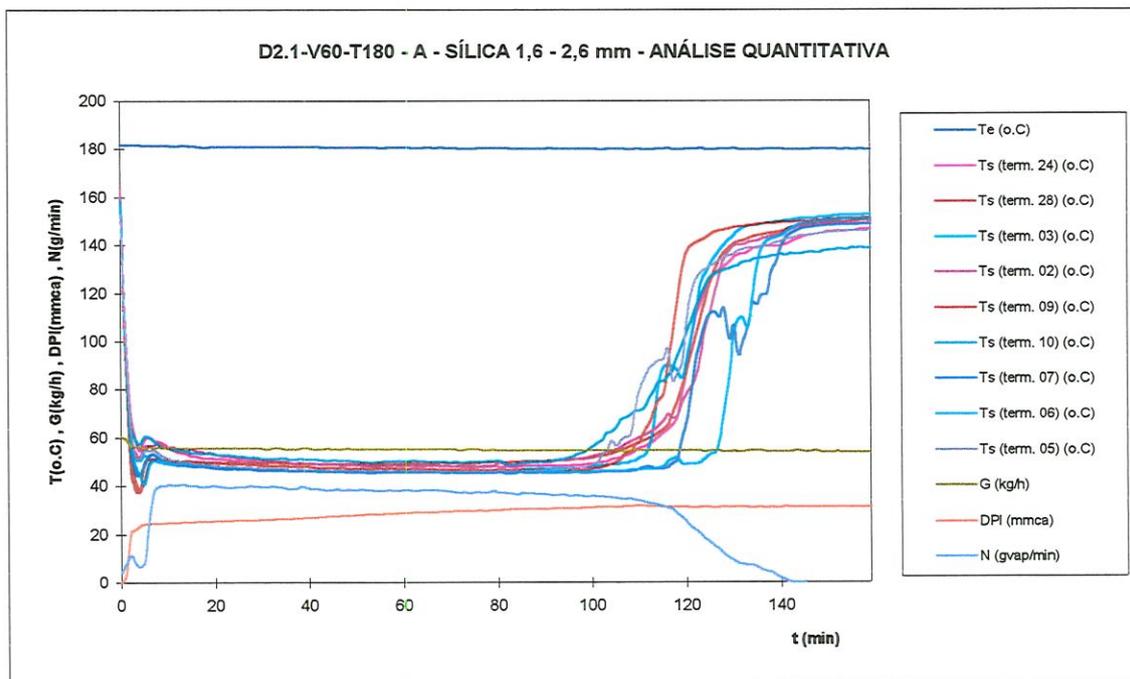


Figura A.2.11- Resultado do ensaio D2.1-V60-T180 -A

ENSAIO D2.1-V60-T180 - B dados da secagem

RU1103B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 31.2$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.1$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.024$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.429$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 179.0$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{ss} = 2.171$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.3$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 137$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -2.6$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 101$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.74$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 38.4$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 59.6$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 41.5$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 56.6$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 23.9$ mmca

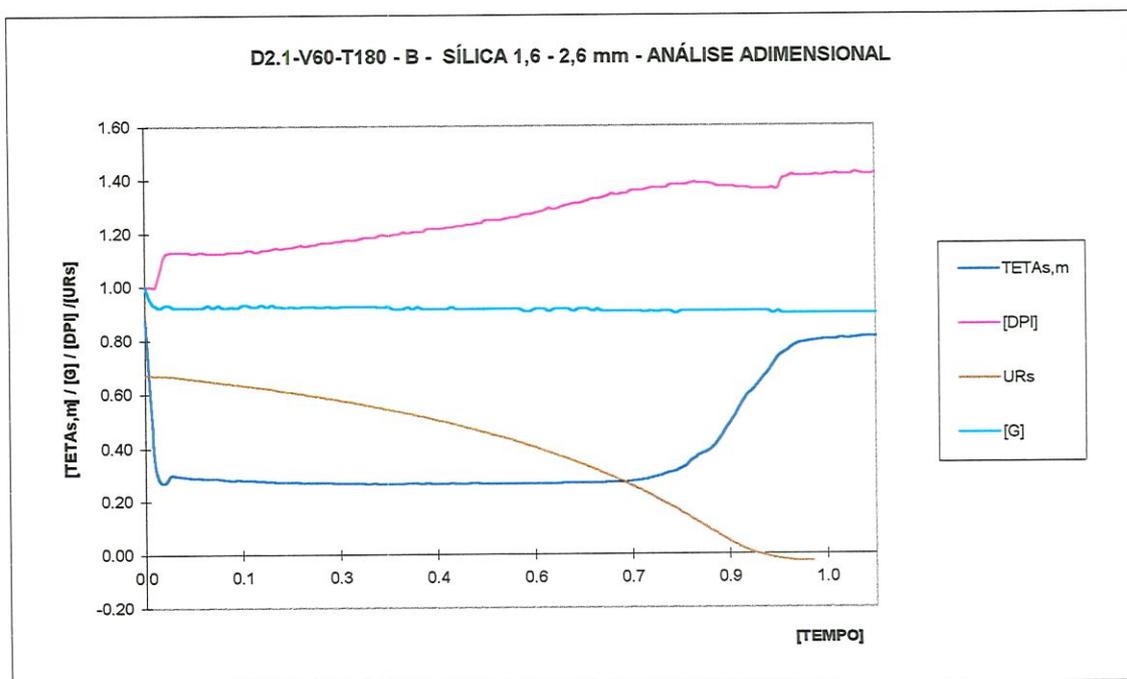
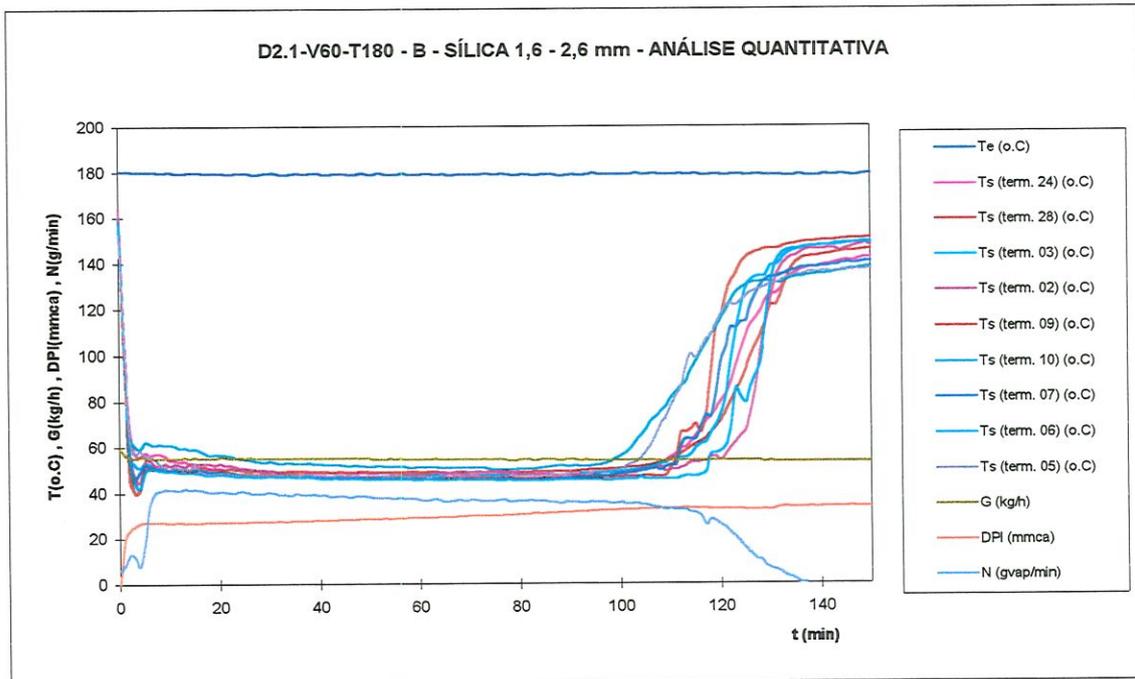


Figura A.2.12- Resultado do ensaio D2.1-V60-T180- B

ENSAIO D4.4-V60-T180 -A dados da secagem

RU1101A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.610$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 29.7$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.7$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.025$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.475$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 178.4$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.135$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.3$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 141$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -2.4$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 84$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.60$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 38.5$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(p,band)} = 59.8$ (kg/h)
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 42.1$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 58.8$ (kg/h)
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 6.5$ (mmca)

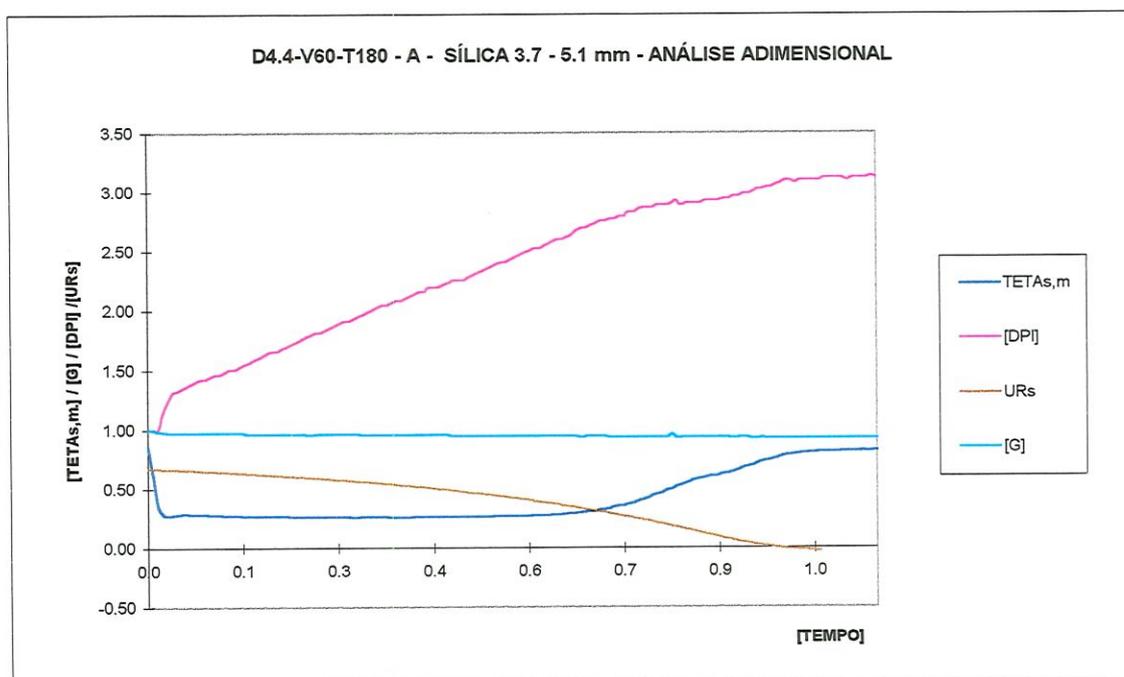
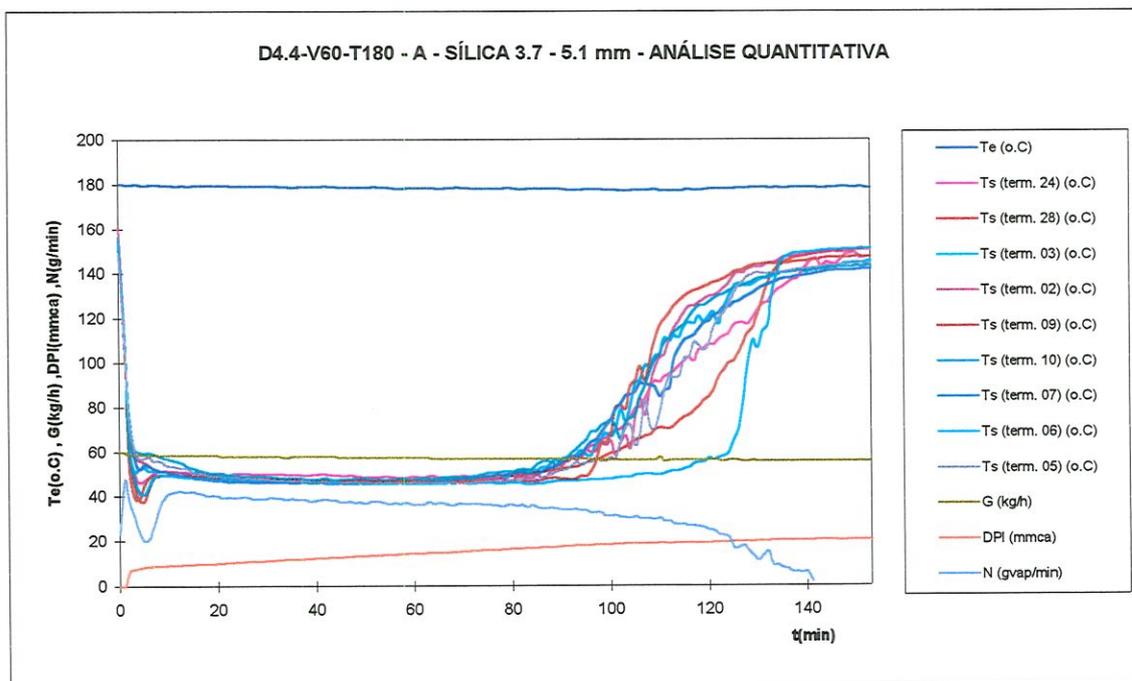


Figura A.2.13- Resultado do ensaio D4.4-V60-T180 -A

ENSAIO D4.4-V60-T180 -B dados da secagem

RU1101B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.590$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 33.2$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.7$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.026$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.527$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 179.1$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{sp} = 2.063$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.5$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 139$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 4.9$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 85$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.61$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 40.7$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 59.4$ (kg/h)
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 43$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 58.0$ (kg/h)
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 7.3$ (mmca)

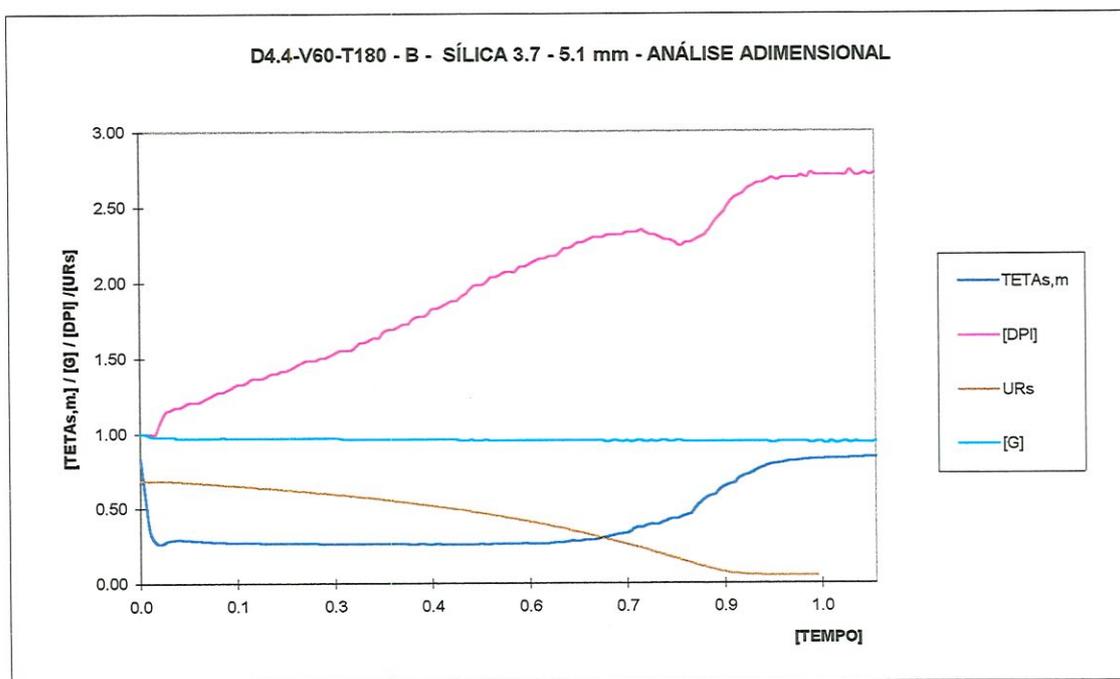
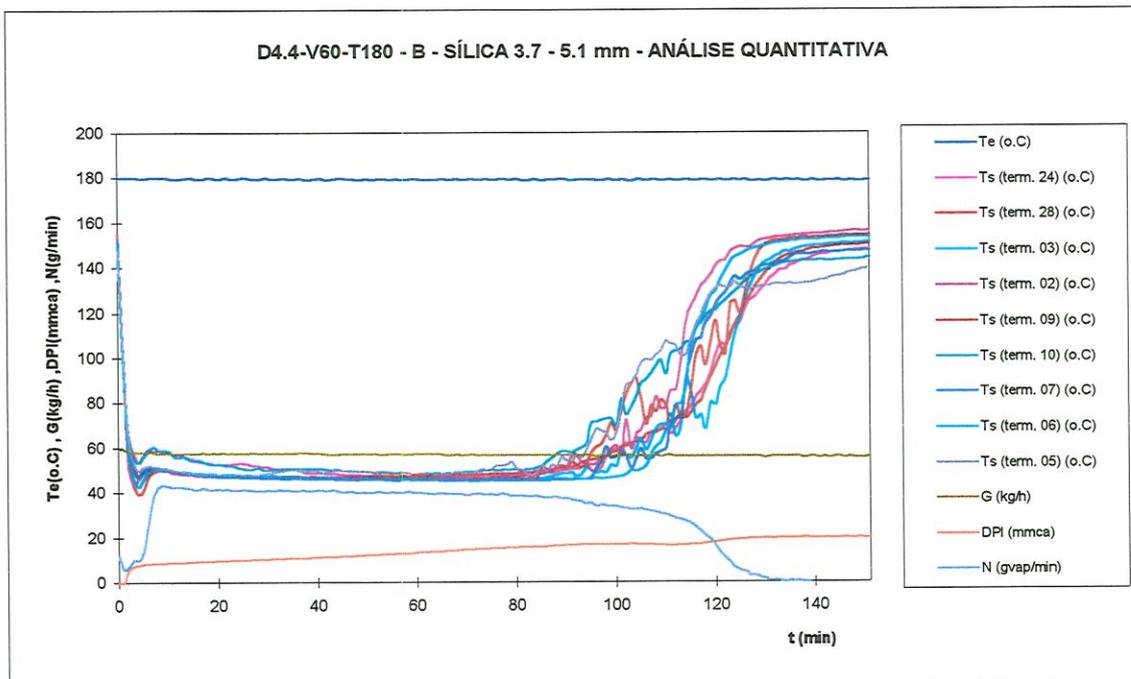


Figura A.2.14- Resultado do ensaio D4.4-V60-T180 -B

ENSAIO D4.4-V60-T180 -C dados da secagem

RU1104A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6\,590$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 32.0$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.7$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.020$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.527$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 180.0$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.063$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.5$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 143$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 0.2$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 86$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_f = 0.60$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 38.7$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 59.0$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 39.8$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 58.1$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 7.1$ mmca

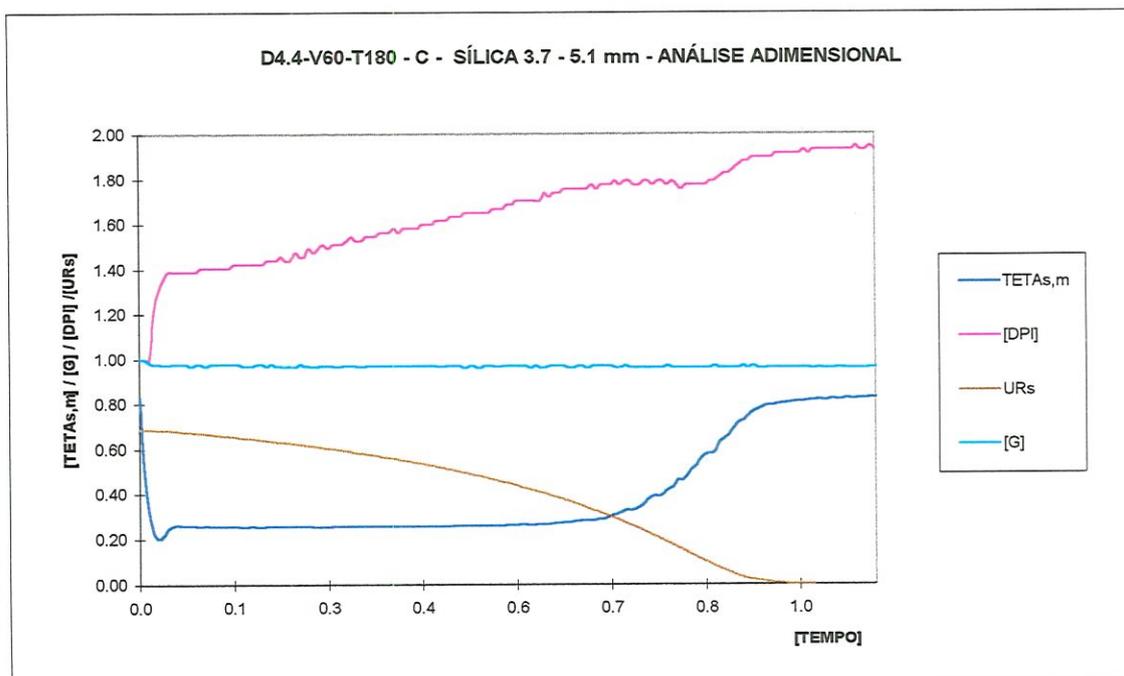
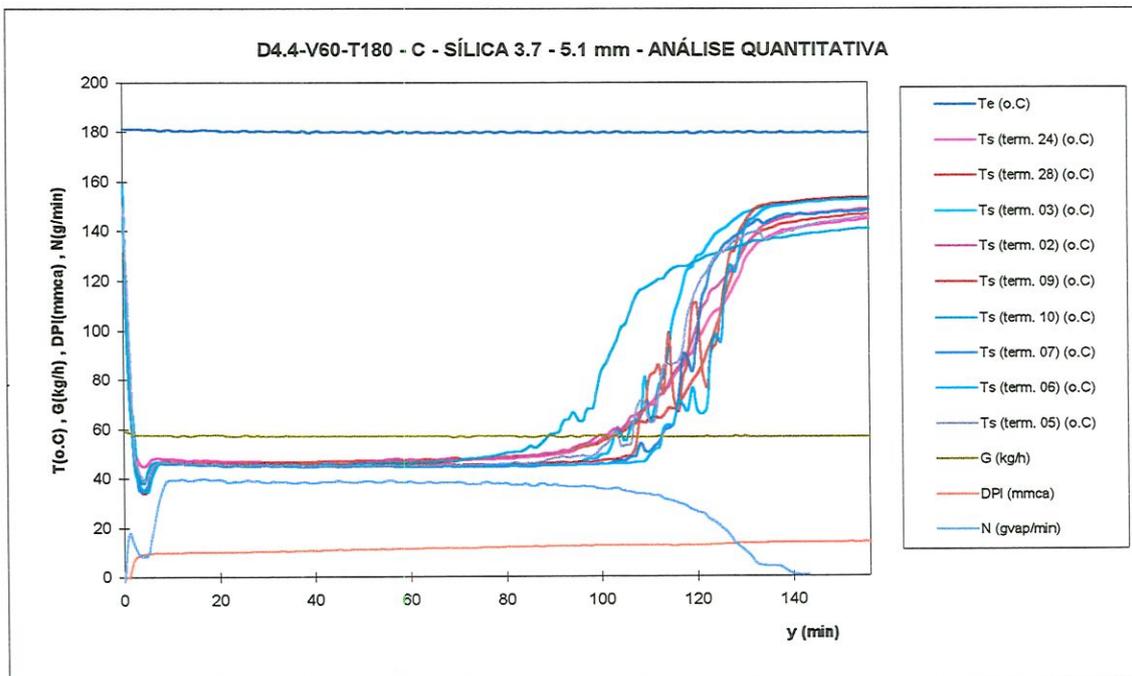


Figura A.2.15- Resultado do ensaio D4.4-V60-T180 - C

ENSAIO D2.1-V110-T80 -A

dados da secagem

RU1114B

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.600$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.4$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.448$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.152$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 27.5$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.019$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP.MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 80.5$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 1.9$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 6.9$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_c = 197$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 147$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.75$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 24.1$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 26.9$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(t,band)} = 110.2$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 99.4$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 49.4$ mmca

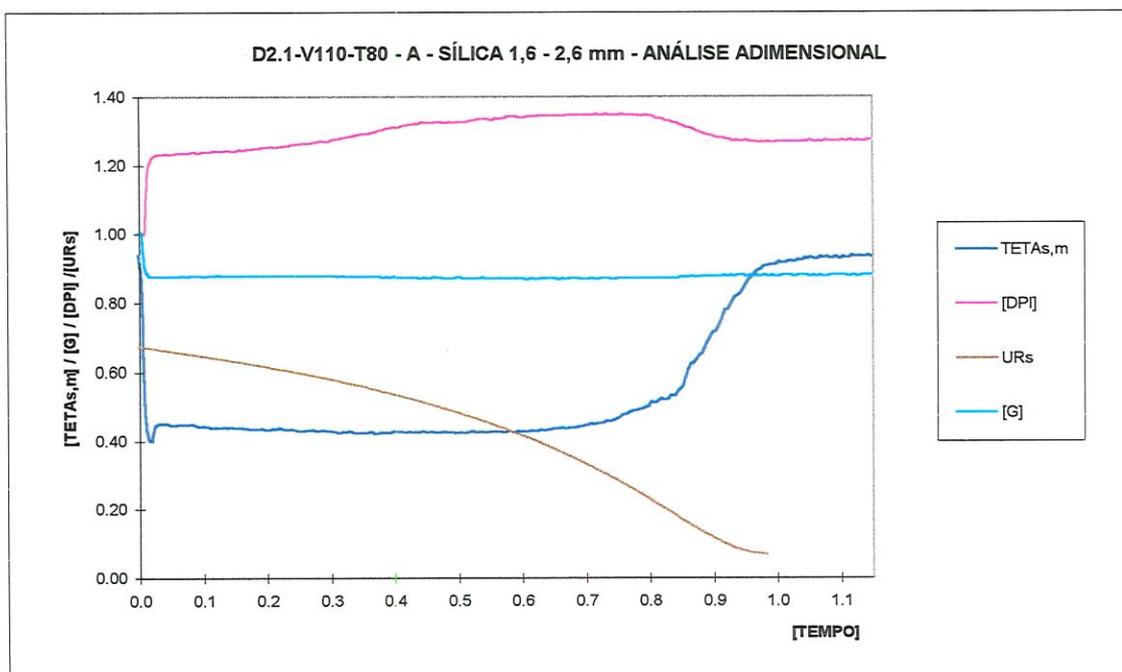
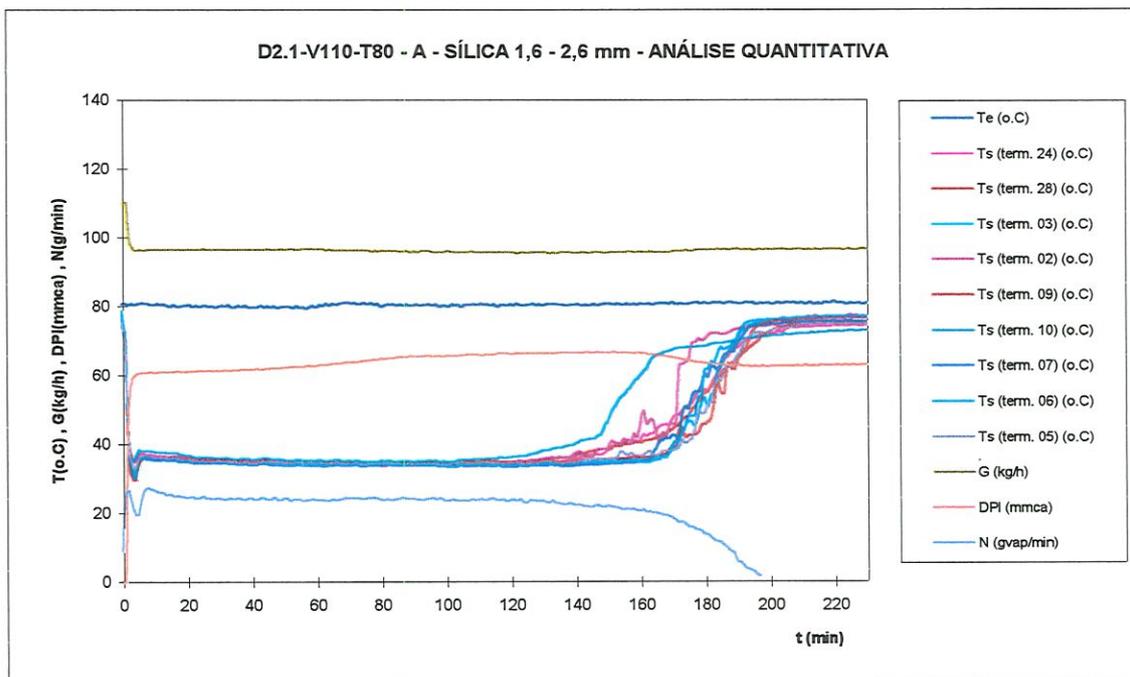


Figura A.2.16- Resultado do ensaio D2.1-V110-T80 -A

ENSAIO D2.1-V110-T80 -B

dados da secagem

RU1114C

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.610$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 66.9$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.422$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{ss} = 2.188$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 24.5$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.016$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 81.1$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 2.2$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 5.5$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 192$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 141$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.73$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 25.5$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 26.4$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(p,band)} = 110.5$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 111.0$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 66.5$ mmca

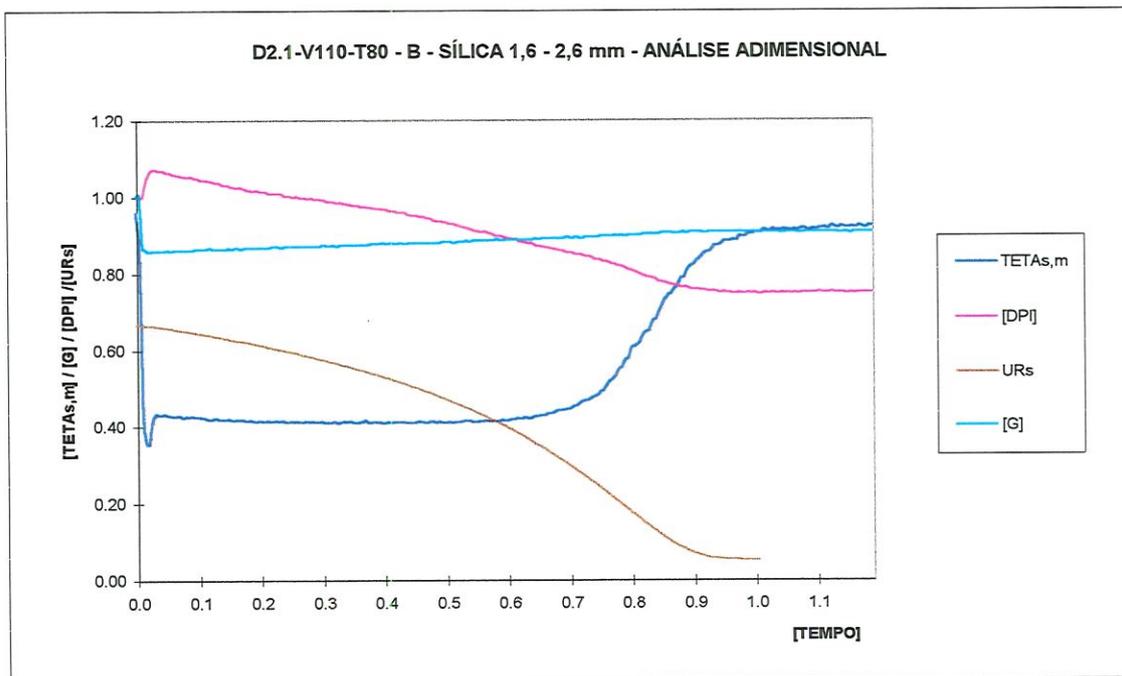
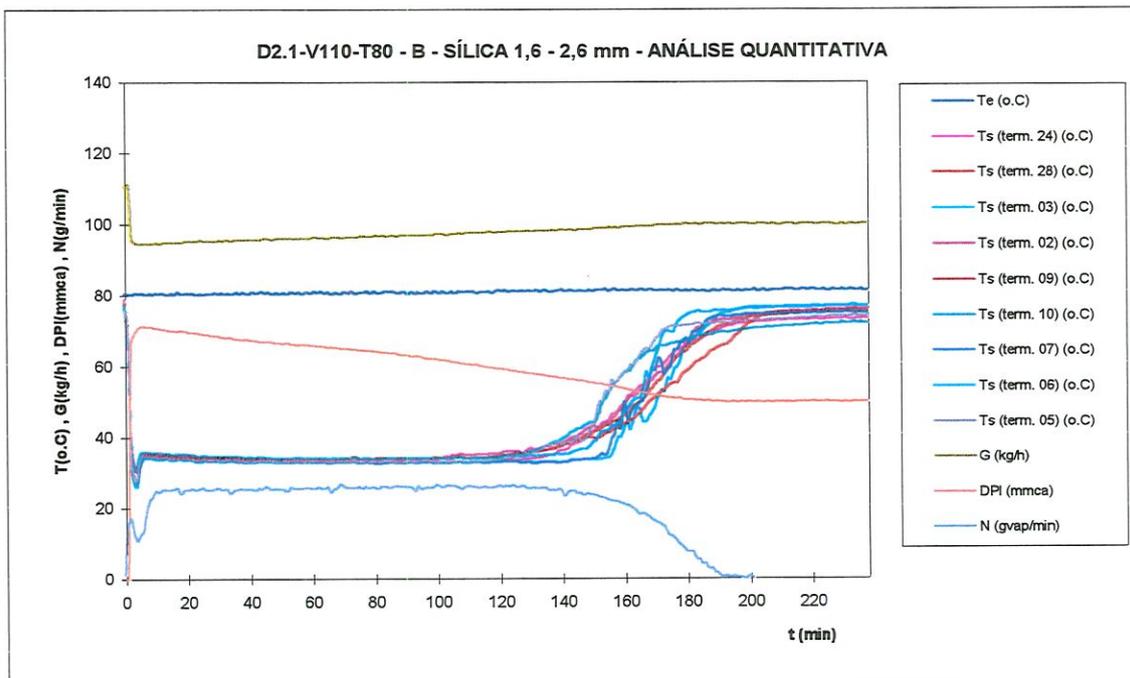


Figura A.2.17- Resultado do ensaio D2.1-V110-T80 -B

ENSAIO D2.1-V110-T80 -C dados da secagem

RU1115A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.610$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 24.8$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.3$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$w_{amb,m} = 0.018$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.449$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.2$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.161$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 2.0$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 191$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 9.0$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 144$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$t_i = 0.75$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 24.6$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s.band)} = 111.7$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 26.6$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 106.5$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 60.8$ mmca

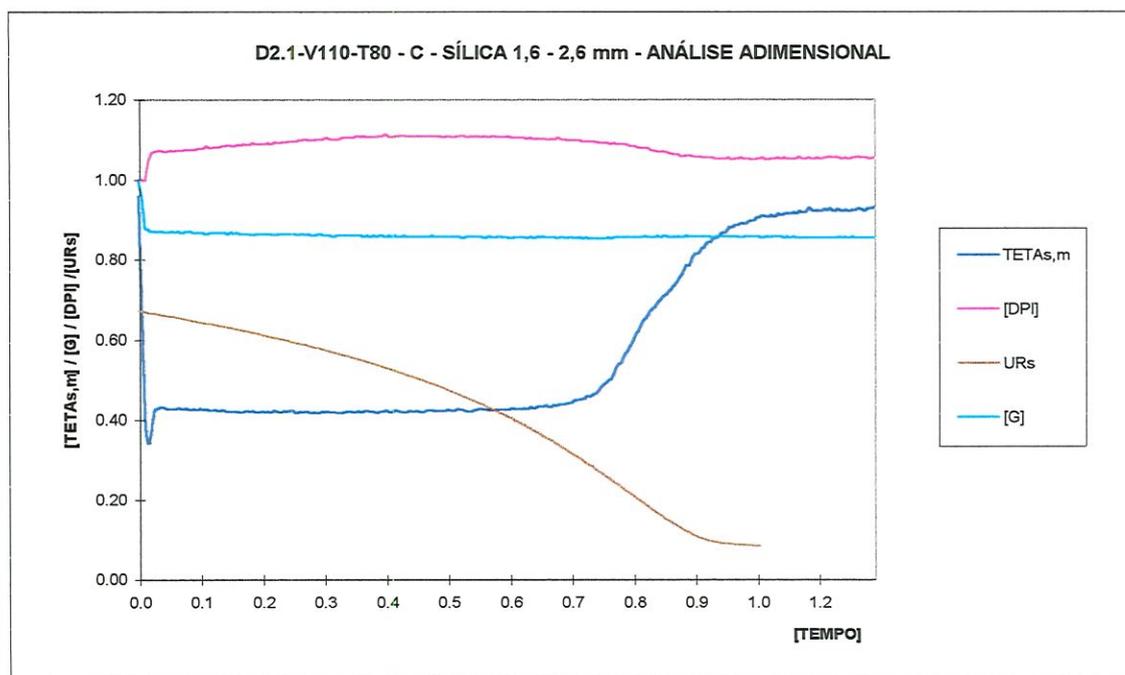
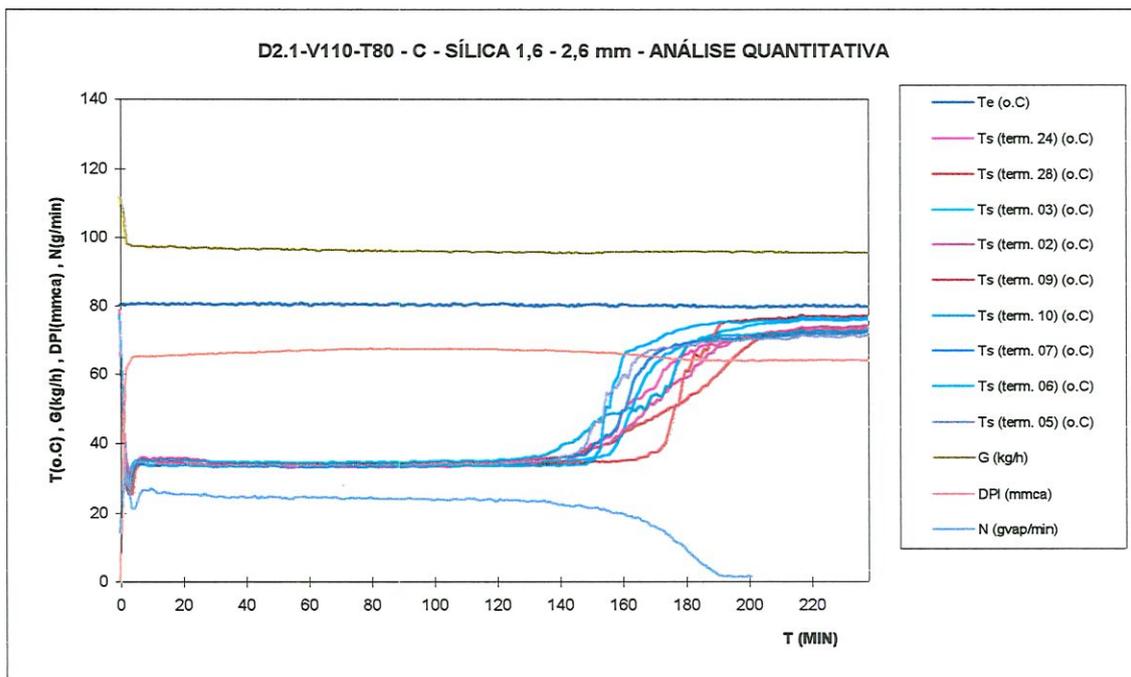


Figura A.2.18- Resultado do ensaio D2.1-V110-T80 -C

ENSAIO D4.4-V110-T80 -A dados da secagem

RU1114A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.630$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 28.4$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.2$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.020$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.455$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 84.5$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{ss} = 2.175$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 1.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 178$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 4.2$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 122$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.69$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 29.0$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 110.6$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 30.4$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 107.3$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 22.6$ mmca

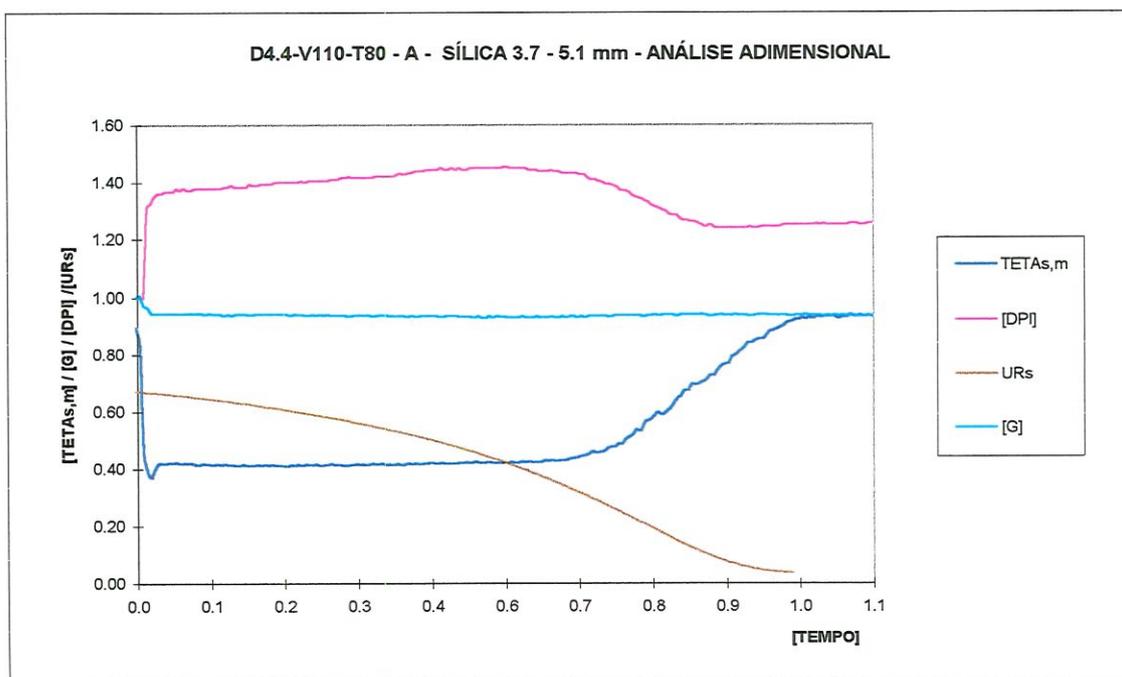
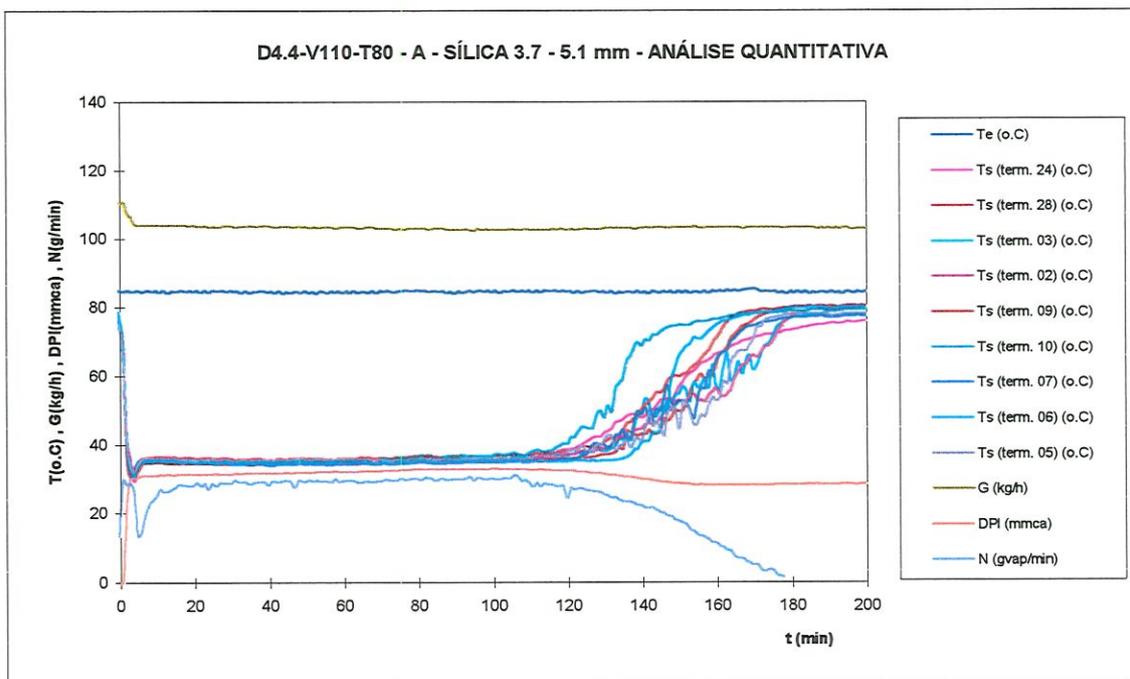


Figura A.2.19- Resultado do ensaio D4.1-V110-T80 -A

ENSAIO D4.4-V110-T80 - B dados da secagem

RU1115B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.610$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 25.6$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.2$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.019$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.442$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.5$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.168$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 1.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 179$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 5.4$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 131$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$t_r = 0.73$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 27.0$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 110.3$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 31.1$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 106.2$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 18.6$ mmca

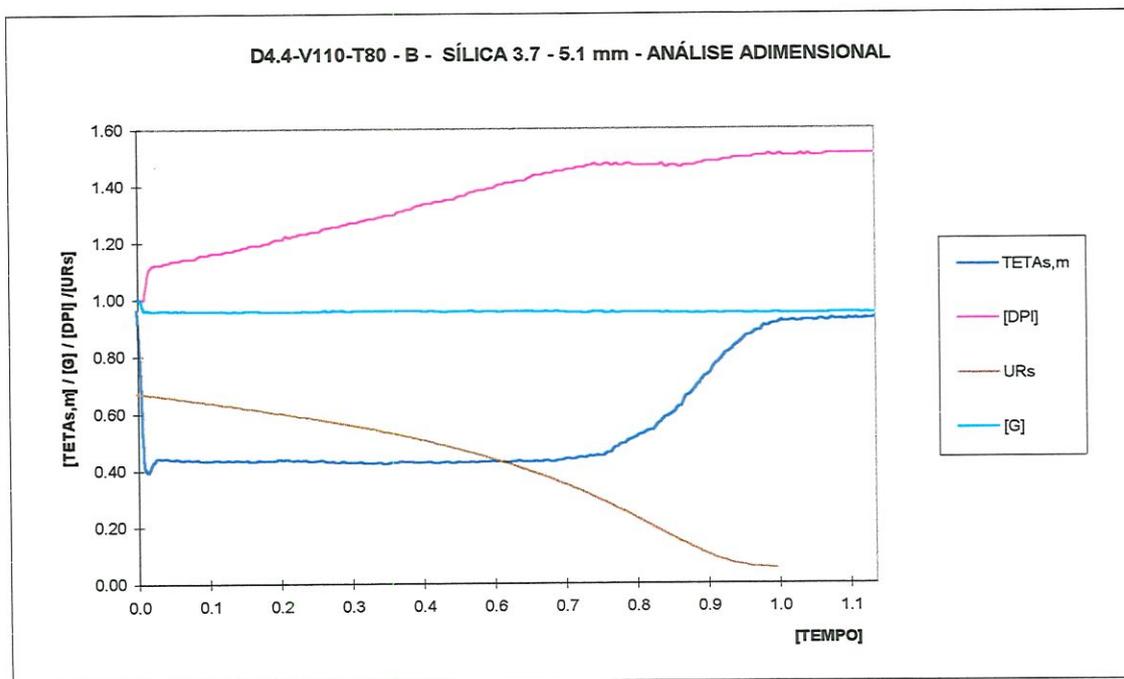
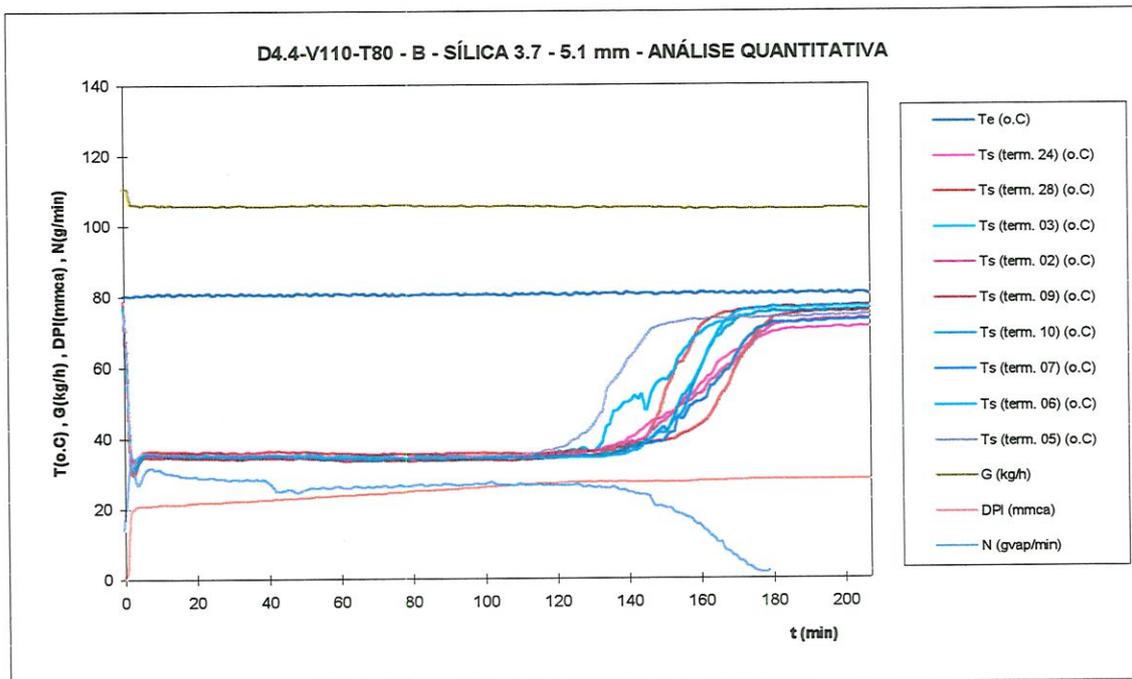


Figura A.2.20- Resultado do ensaio D4.4-V110-T80 -B

ENSAIO D4.4-V110-T80 - C dados da secagem

RU1115C

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.610$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 23.3$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 66.8$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.017$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.415$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 81.0$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{sp} = 2.195$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 1.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_T = 179$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 5.2$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 115$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.64$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 28.1$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 111.3$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 30.7$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 107.0$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 18.4$ mmca

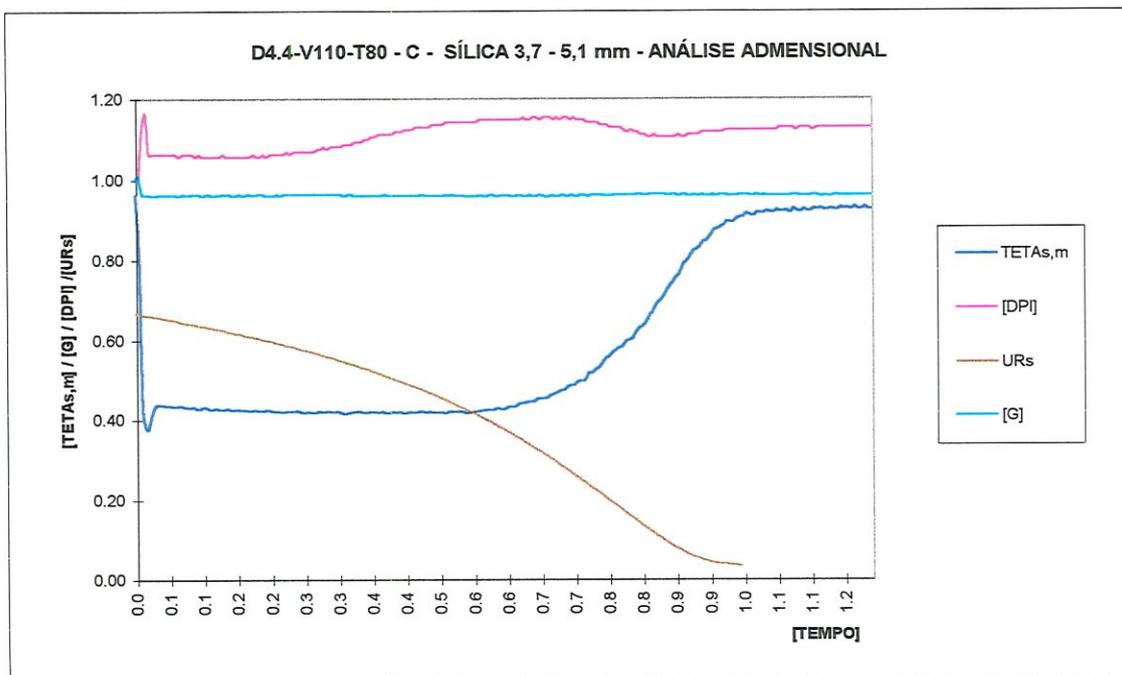
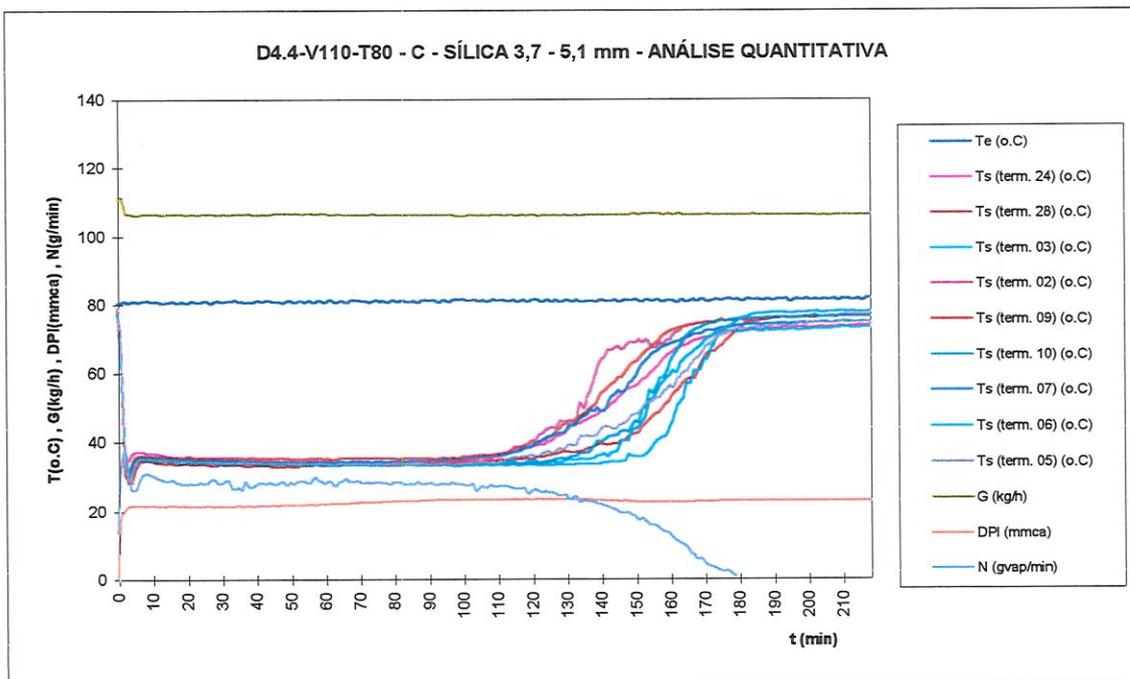


Figura A.2.21- Resultado do ensaio D4.4-V110-T80-C

ENSAIO D2.1-V110-T120 -A dados da secagem

RU112A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.590$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 29.5$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.8$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.020$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.468$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 120.4$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.122$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.8$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_T = 120$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 1.3$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 86$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.72$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 43.5$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 109.8$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 47.5$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 103.2$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 31.4$ mmca

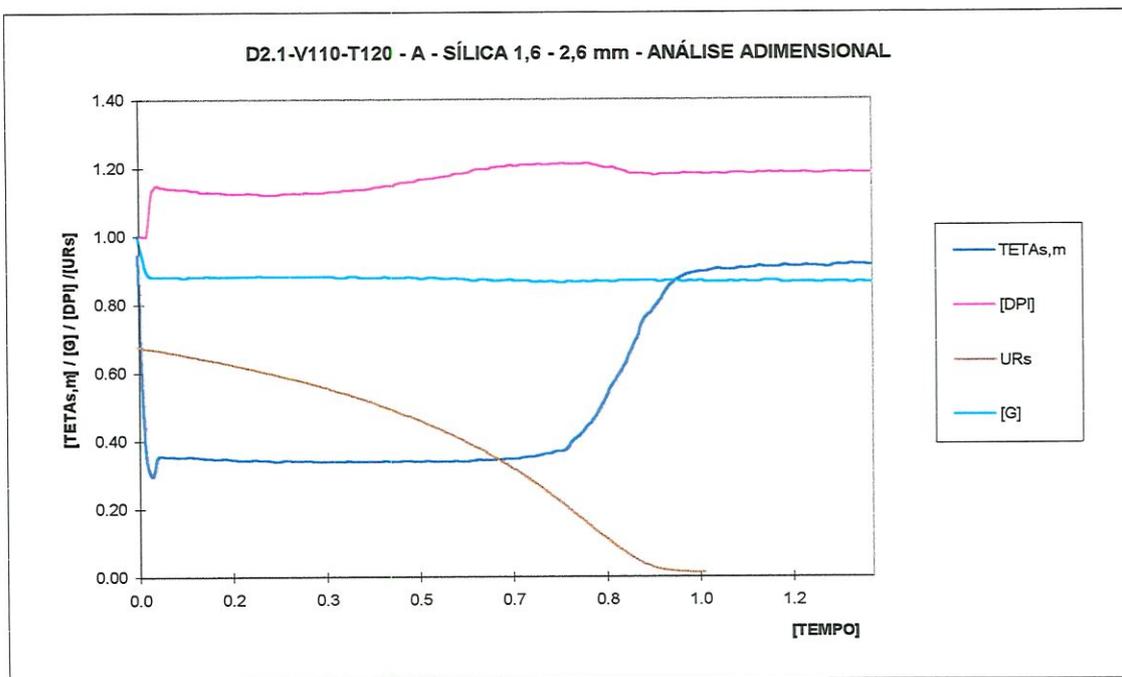
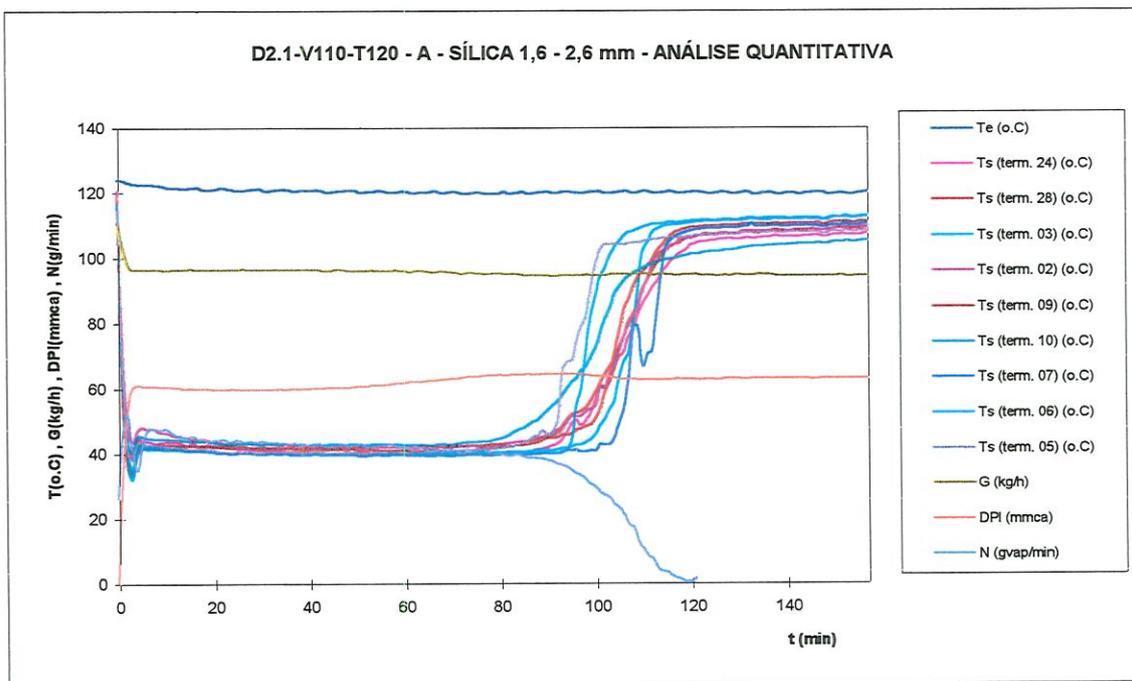


Figura A.2.22- Resultado do ensaio D2.1-V110-T120 - A

ENSAIO D2.1-V110-T120 -B dados da secagem

RU1112B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.590$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 32.0$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.7$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.020$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.527$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 119.2$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.063$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 1.1$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 123$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 0.6$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 82$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.67$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 43.6$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 108.1$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 50.6$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 110.4$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 57.9$ mmca

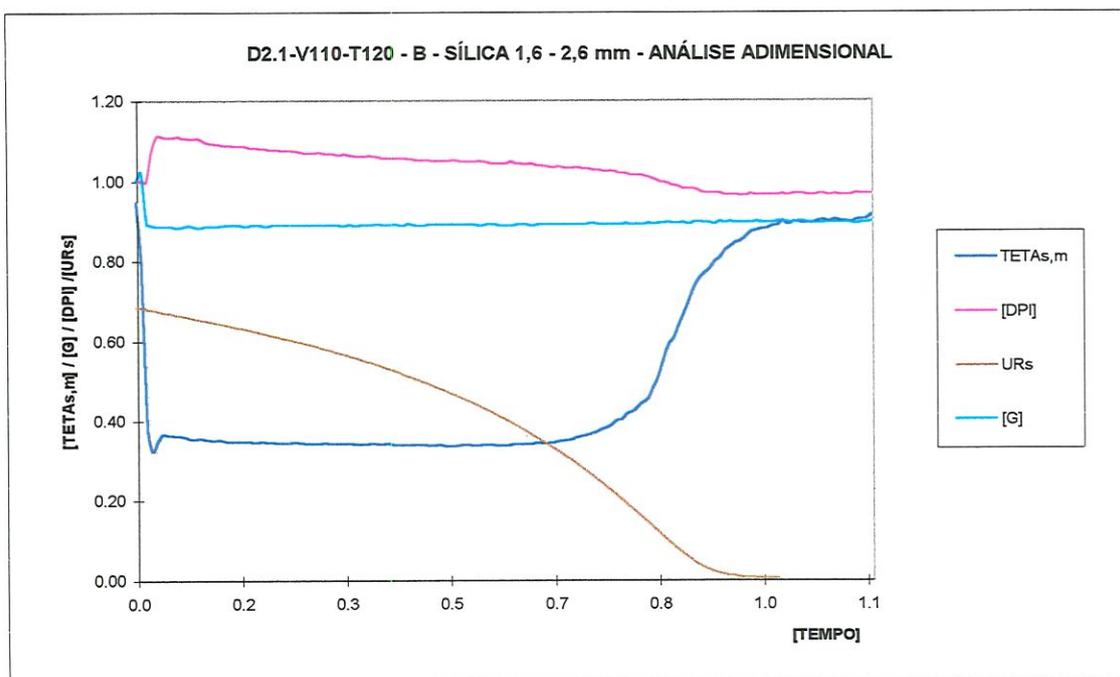
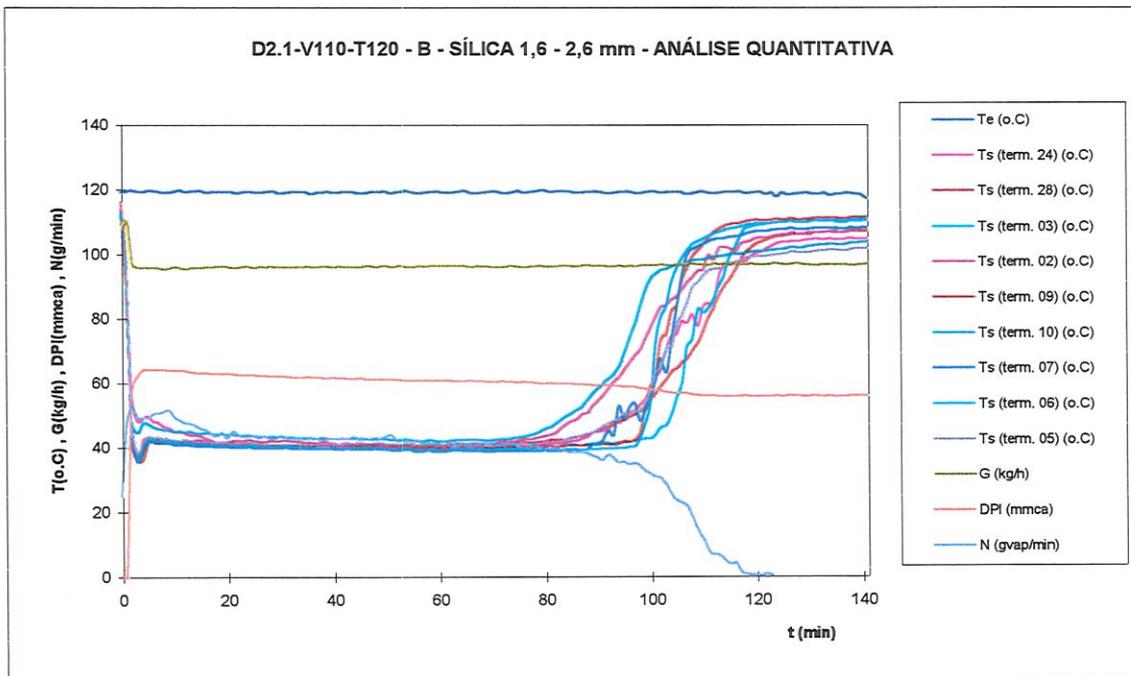


Figura A.2.23- Resultado do ensaio D2.1-V110-T120 - B

ENSAIO D4.4-V110-T120 - A dados da secagem

RU1111A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.9$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{L,0} = 4.475$ kg água
 MASSA DE SILICA SECA NO LEITO $m_{ps} = 2.115$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE

$T_{amb,m} = 32.7$ o.C
 $W_{amb,m} = 0.021$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 $T_{amb,q} = 120.8$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.7$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 22.0$ %

TEMPO TERMINO SECAGEM $t_r = 116$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_f = 88$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $t_p = 0.59$

$t_r = 116$ min
 $t_f = 88$ min
 $t_p = 0.59$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 40.0$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 45.1$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(band)} = 109.5$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 105.2$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 17.1$ mmca

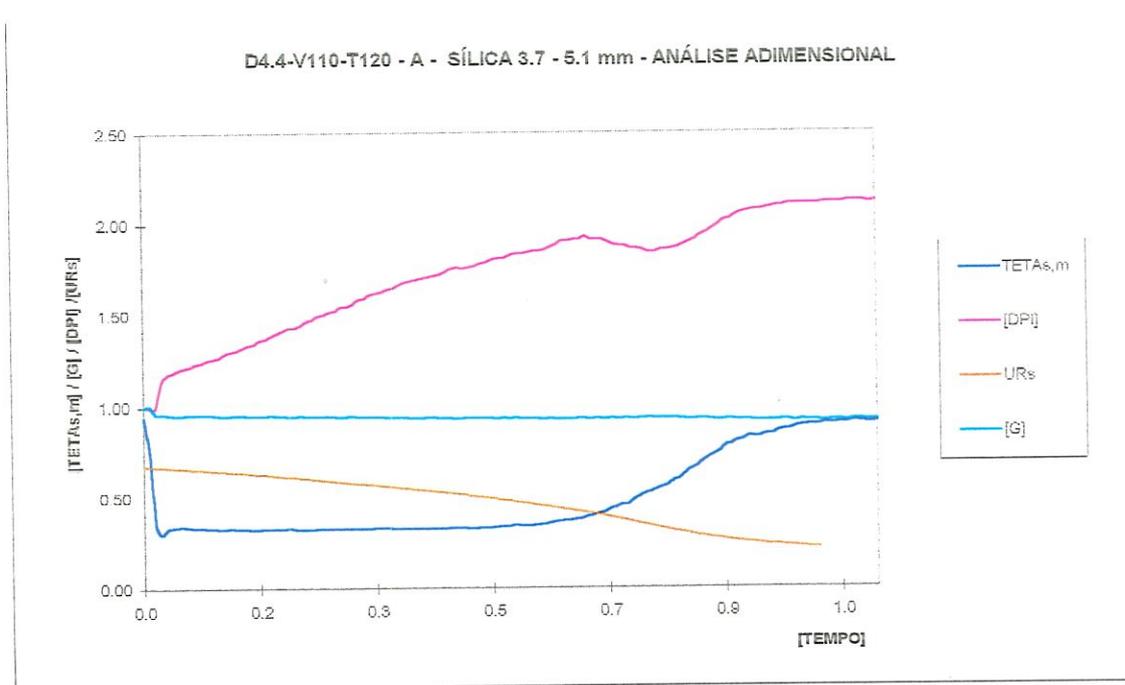
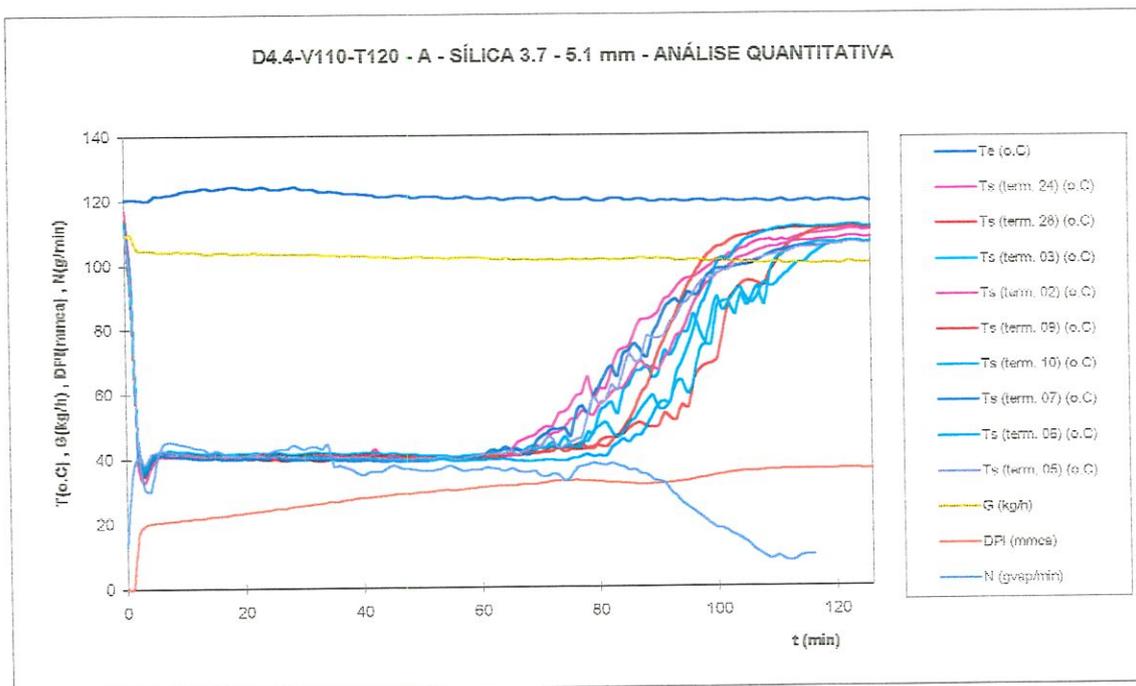


Figura A.2.24- Resultado do ensaio D4.4-V110-T120 - A

ENSAIO D4.4-V110-T120 - C dados da secagem

RU1111C

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.590$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 27.7$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.6$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.020$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.455$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,r} = 122.7$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.135$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - medida	$UR_{L,f,med} = 0.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_T = 113$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - calcul.	$UR_{L,f,calc} = 2.8$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 74$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.65$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 47.5$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 109.9$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 49.1$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 109.4$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 25.1$ mmca

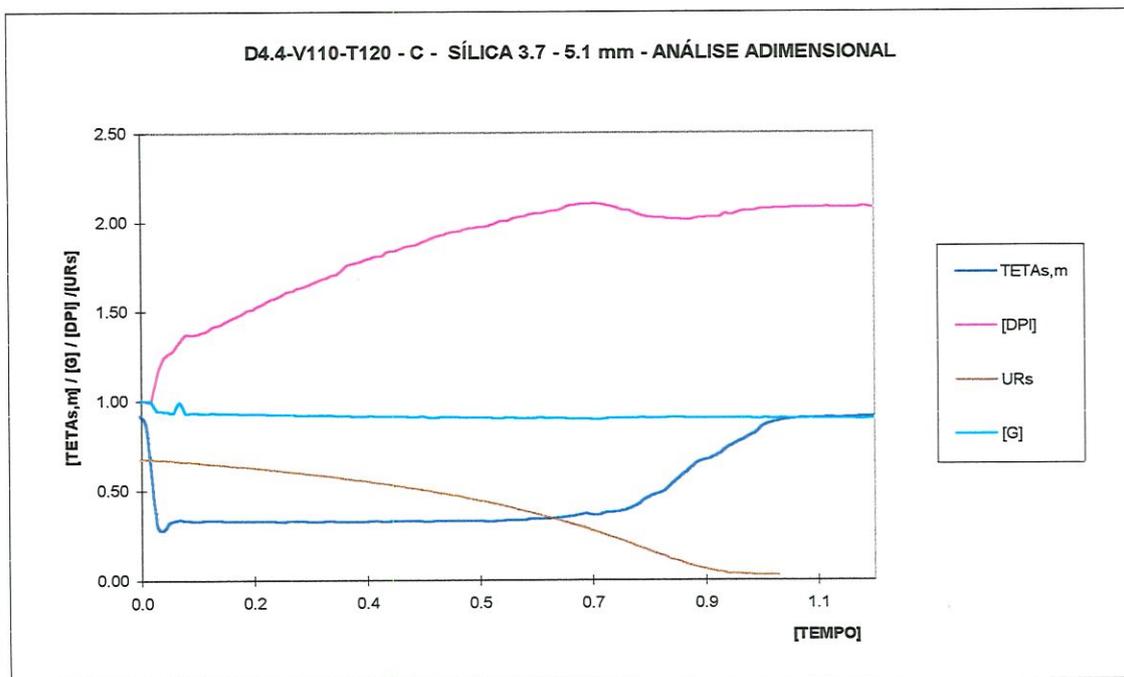
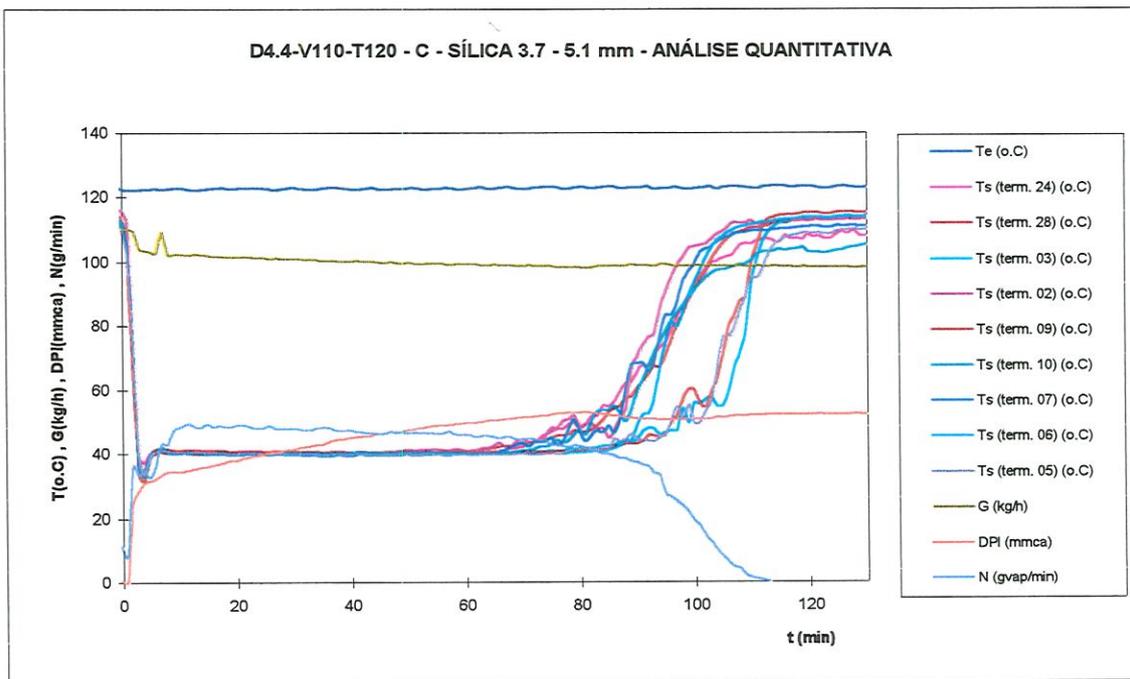


Figura A.2.25- Resultado do ensaio D4.4-V110-T120 - C

ENSAIO D2.1-V110-T180 -A dados da secagem

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.630$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 68.1$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.515$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{sp} = 2.115$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 30.0$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.020$ (kg_{vap}/kg_a)
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 179.7$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.3$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 1.8$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 75$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 51$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_f = 0.68$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 67.2$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 73.4$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 109.1$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 104.9$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 53.8$ mmca

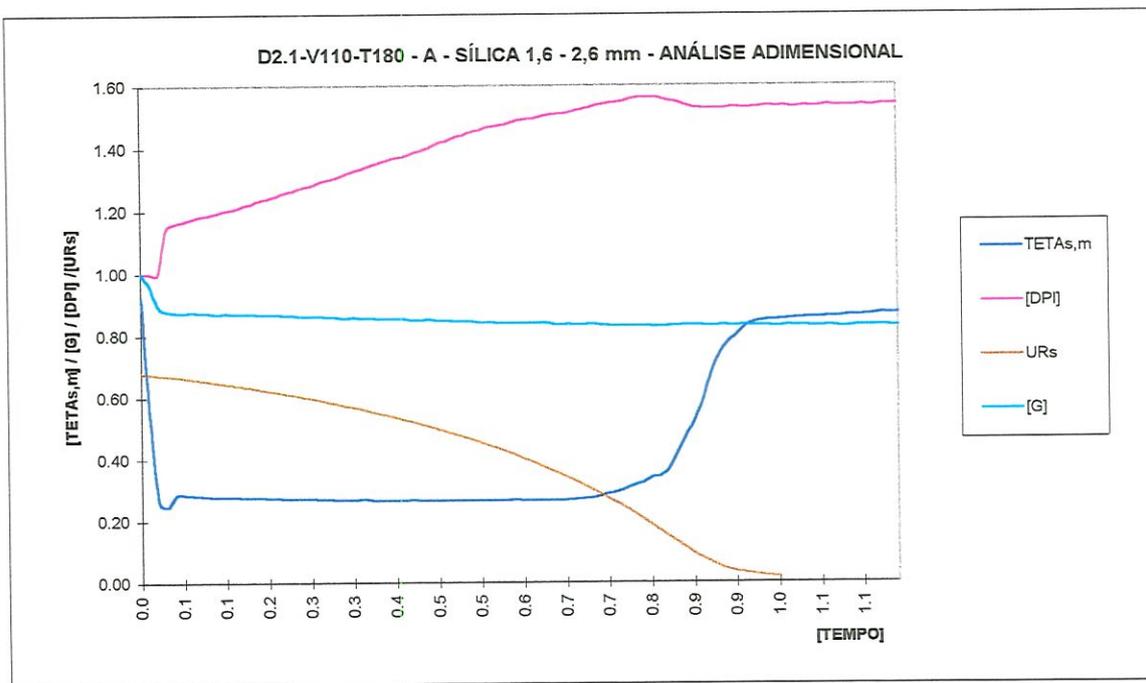
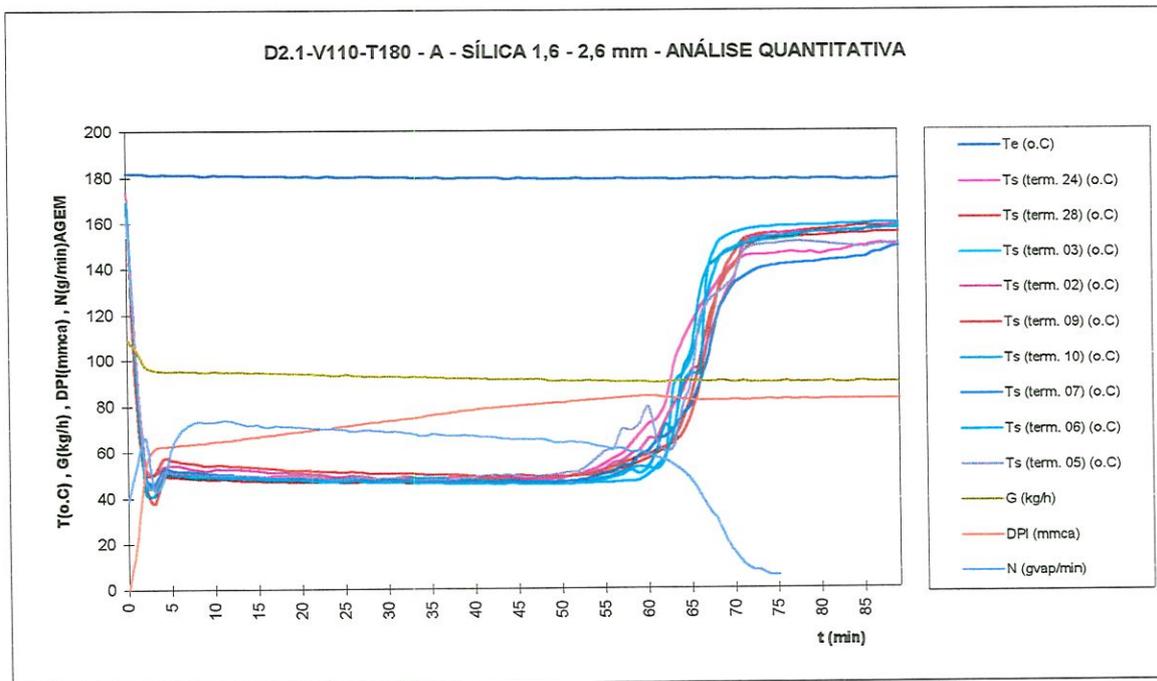


Figura A.2.26- Resultado do ensaio D2.1-V110-T180 - A

ENSAIO D2.1-V110-T180 - B dados da secagem

RU1110B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.190$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 32.3$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 66$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.021$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.271$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,q} = 179.2$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 1.919$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - medida	$UR_{L,f,med} = 0.3$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_r = 75$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - calcul.	$UR_{L,f,calc} = -3.8$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_f = 48$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_i = 0.64$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 63.4$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(0,band)} = 108.6$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 76.7$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 101.0$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 35.1$ mmca

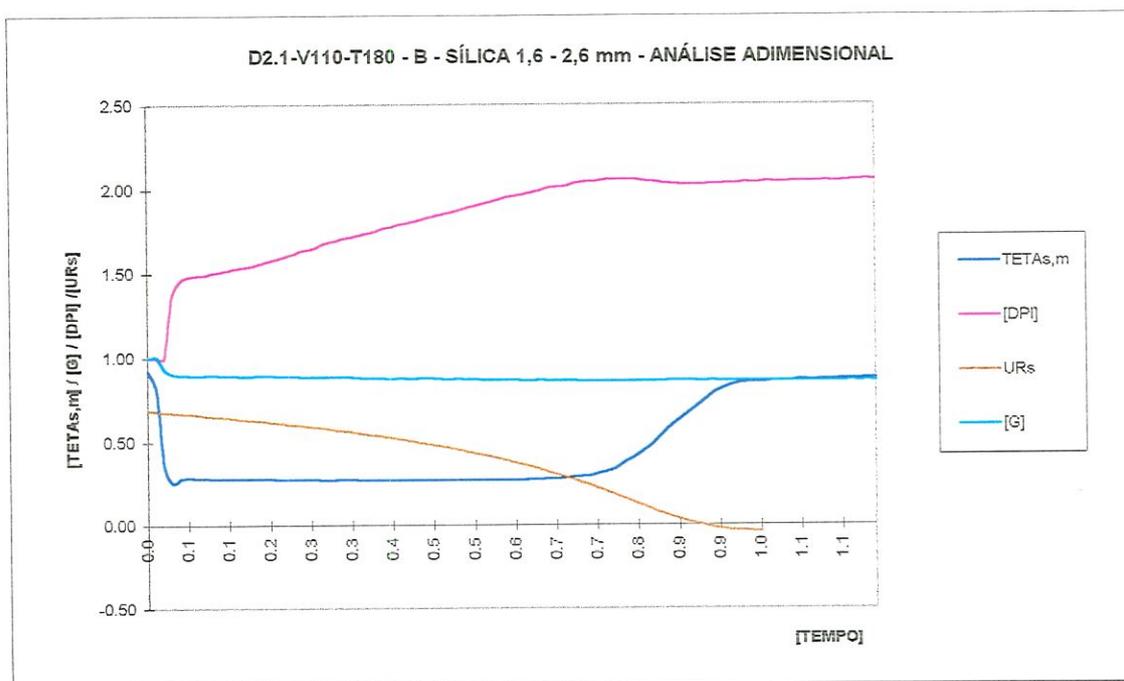
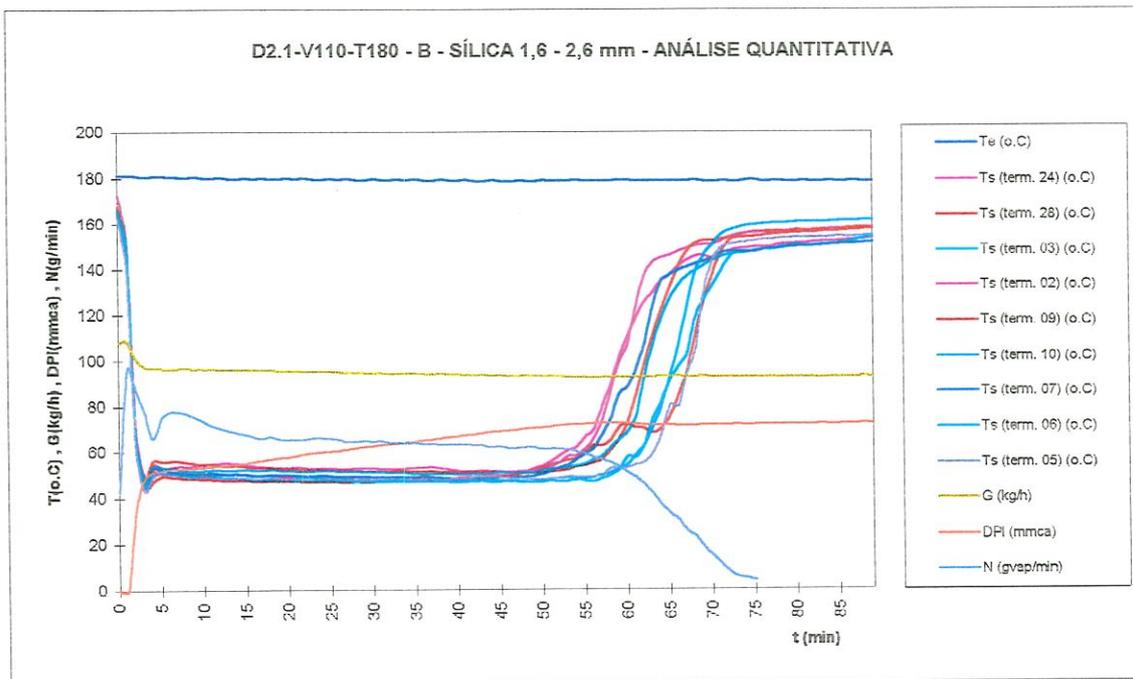


Figura A.2.27- Resultado do ensaio D2.1-V110-T160 -B

ENSAIO D2.1-V110-T180 - C dados da secagem

RU1110C

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.610$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,i} = 89$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{L,i} = 4.551$ kg água
 MASSA DE SILICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.049$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 26,7$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0,020$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,q} = 180,9$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0,3$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 6,2$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_r = 79$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_i = 53$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_i = 0,67$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 61,7$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 78,1$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(v,band)} = 110,2$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 102,0$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 38,6$ mmca

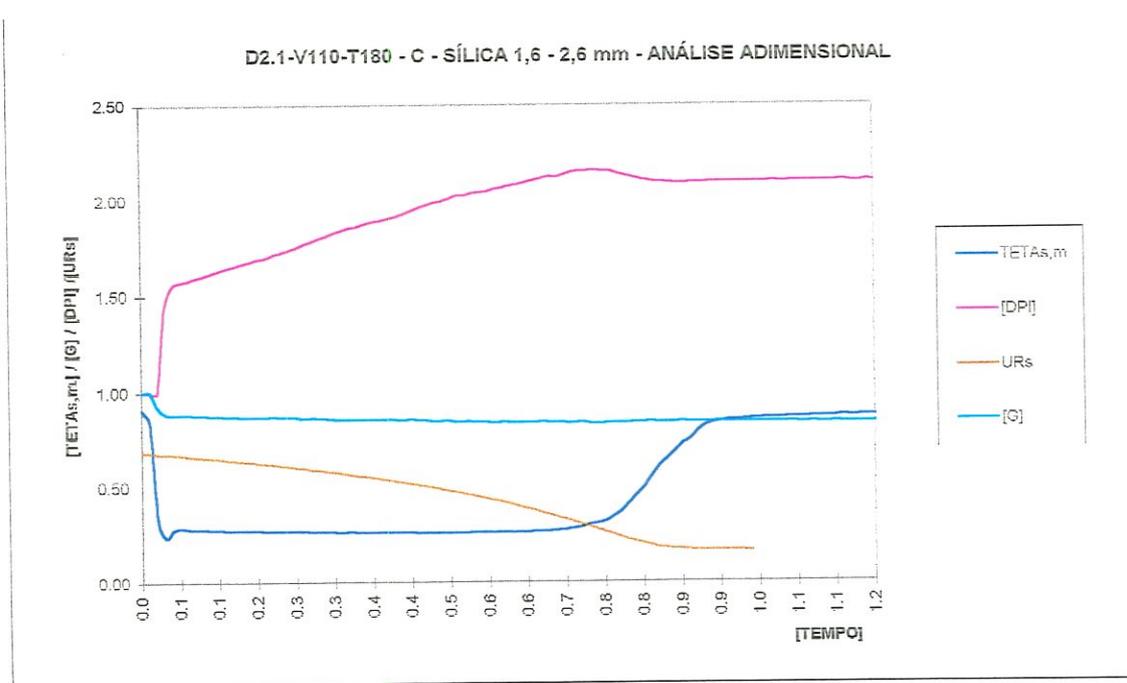
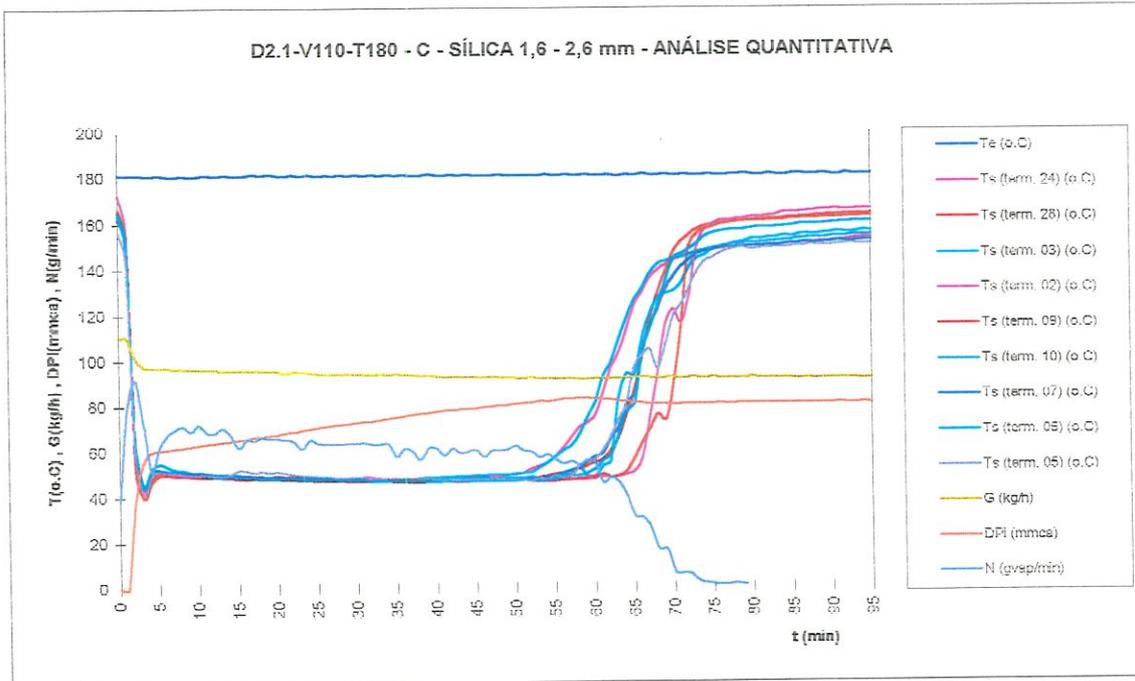


Figura A.2.28- Resultado do ensaio D2.1-V110-T180 - C

ENSAIO D4.4-V110-T180 - A dados da secagem

RU1108A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 28.4$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.9$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.022$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.547$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 179.6$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.053$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - medida	$UR_{L,f,med} = 0.2$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_F = 75$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - calcul.	$UR_{L,f,calc} = -3.1$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 48$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.64$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 75.1$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 110.4$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 77.9$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 106.3$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 25.4$ mmca

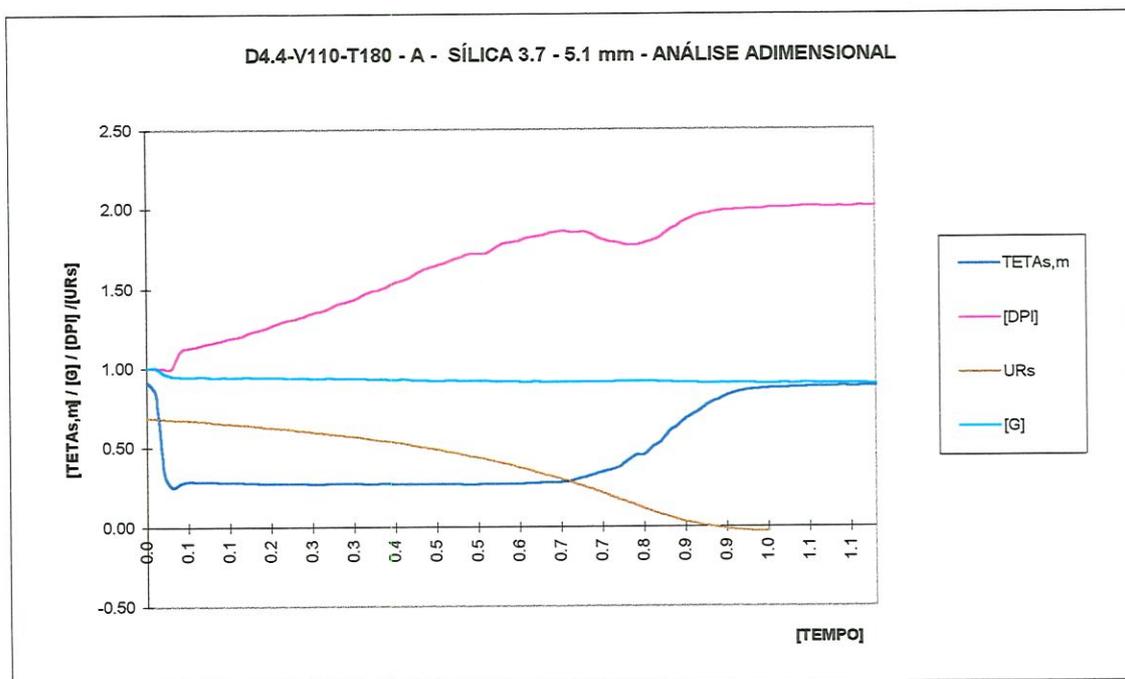
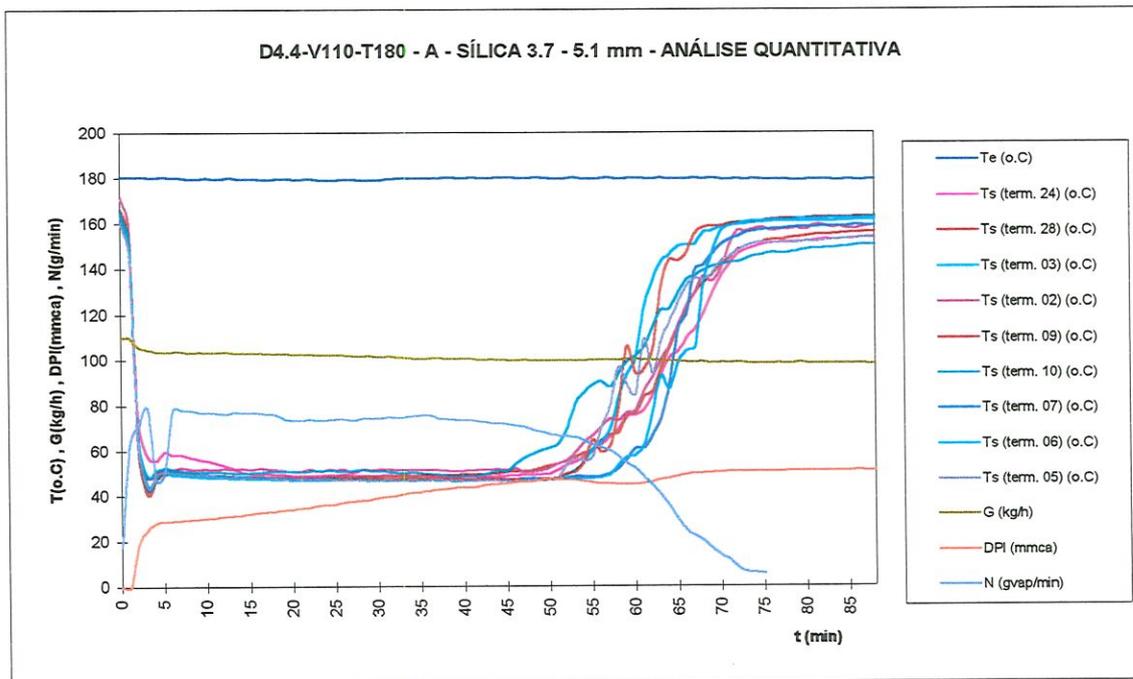


Figura A.2.29- Resultado do ensaio D4.4-V110-T180 -A

ENSAIO D4.4-V110-T180 - B dados da secagem

RU1109A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 69.3$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.567$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.023$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE

$T_{amb,m} = 30.9$ o.C
 $W_{amb,m} = 0.022$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 $T_{amb,m} = 180.0$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.4$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -4.3$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 78$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 46$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $t_r = 0.59$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 72.7$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 83.7$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 109.3$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 104.7$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 21.4$ mmca

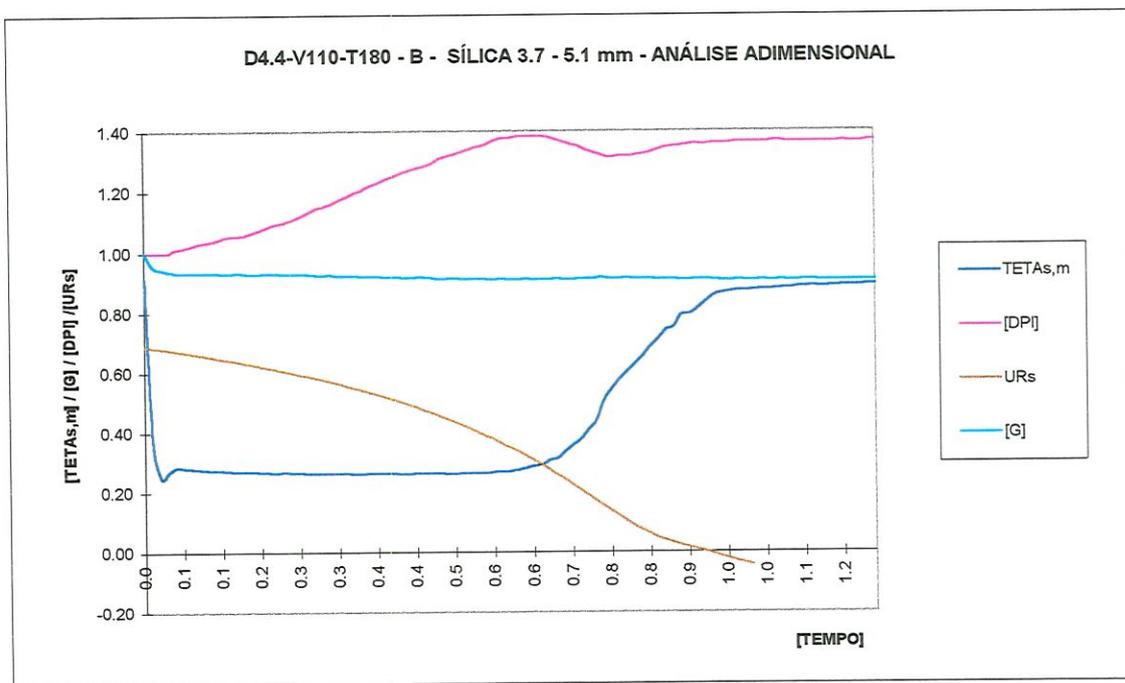
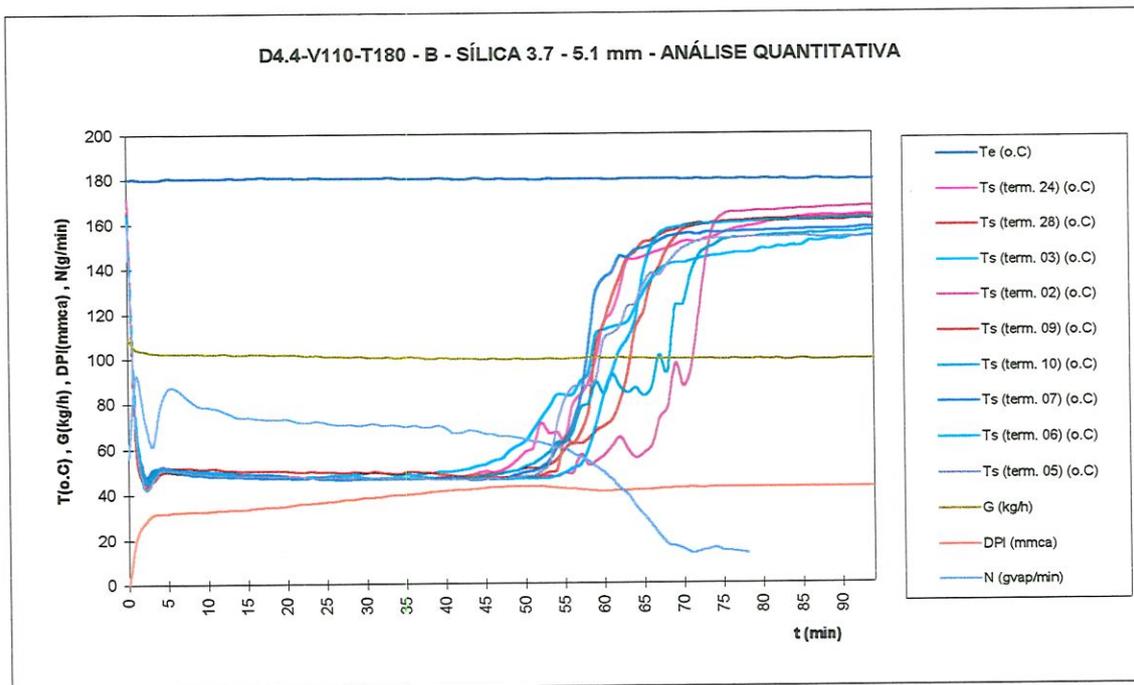


Figura A.2.30- Resultado do ensaio D4.4-V110-T180 - B

ENSAIO D2.1-V210-T80 -A dados da secagem

RU1117A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 24.5$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 69.1$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.018$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.561$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.2$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{sp} = 2.039$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 1.5$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 104$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 0.3$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 72$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_f = 0.69$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 53.6$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(c,band)} = 211.7$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 54.5$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 194.1$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 108.6$ mmca

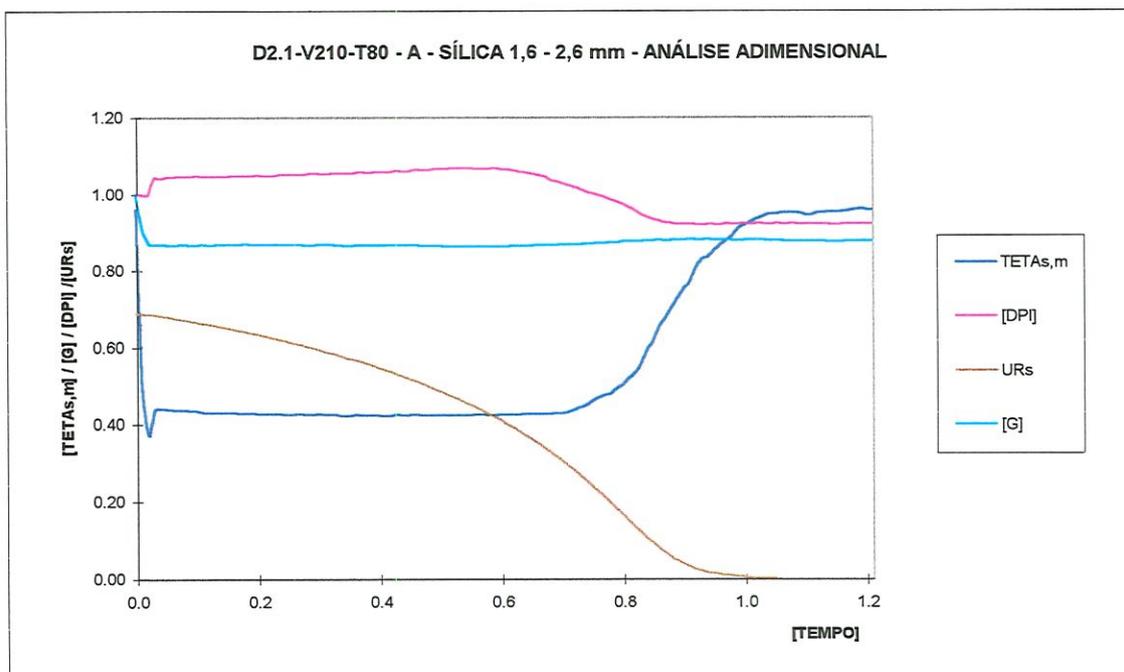
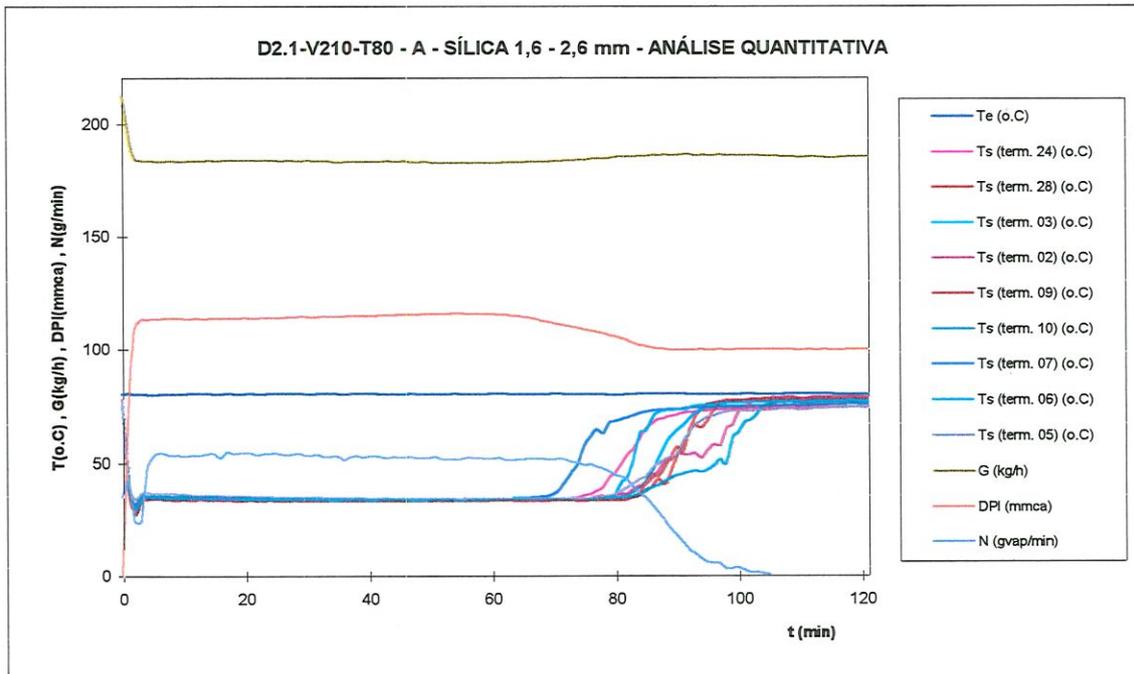


Figura A.2.31- Resultado do ensaio D2.1-V210-T80 -A

ENSAIO D2.1-V210-T80 - B dados da secagem

RU1117C

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.610$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 23.0$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.8$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.017$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.482$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.1$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{sp} = 2.128$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 2.3$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 104$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = 1.1$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 75$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.72$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 50.8$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 211.3$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 51.8$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 207.7$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 115.0$ mmca

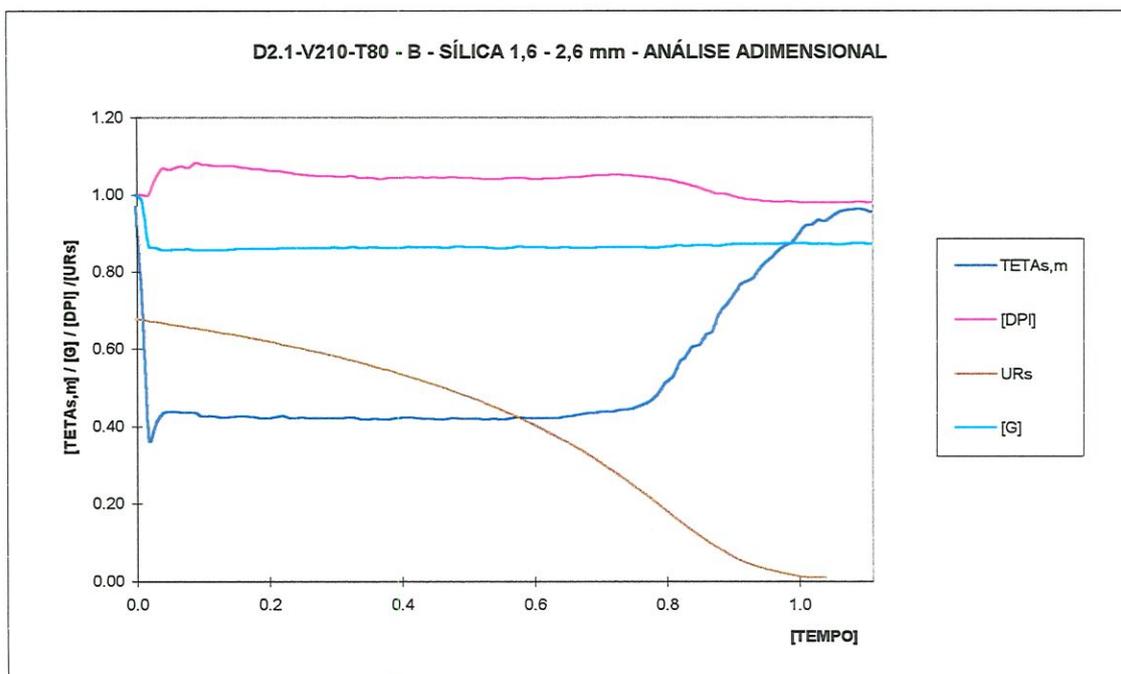
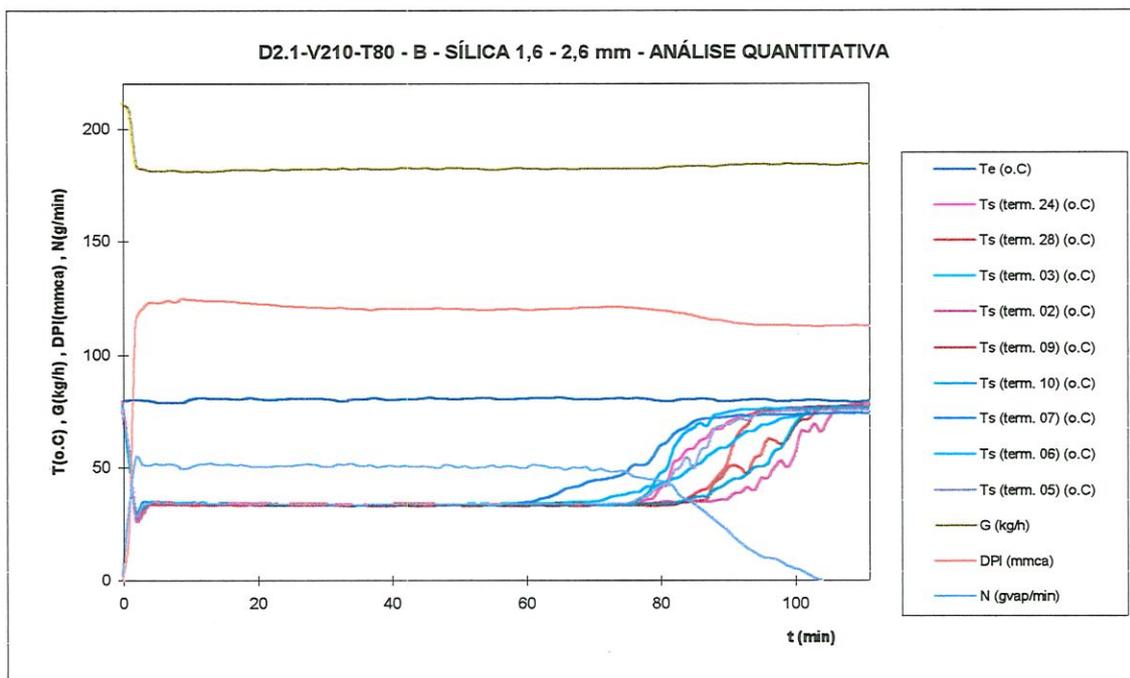


Figura A.2.32- Resultado do ensaio D2.1-V210-T80 -B

ENSAIO D2.1-V210-T80 - C dados da secagem

RU1118A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.620$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 23.3$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.2$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.018$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.515$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.4$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{so} = 2.105$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 1.8$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_T = 105$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -1.6$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_f = 77$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_f = 0.73$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 50.2$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 212.8$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 52$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 187.2$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 120.0$ mmca

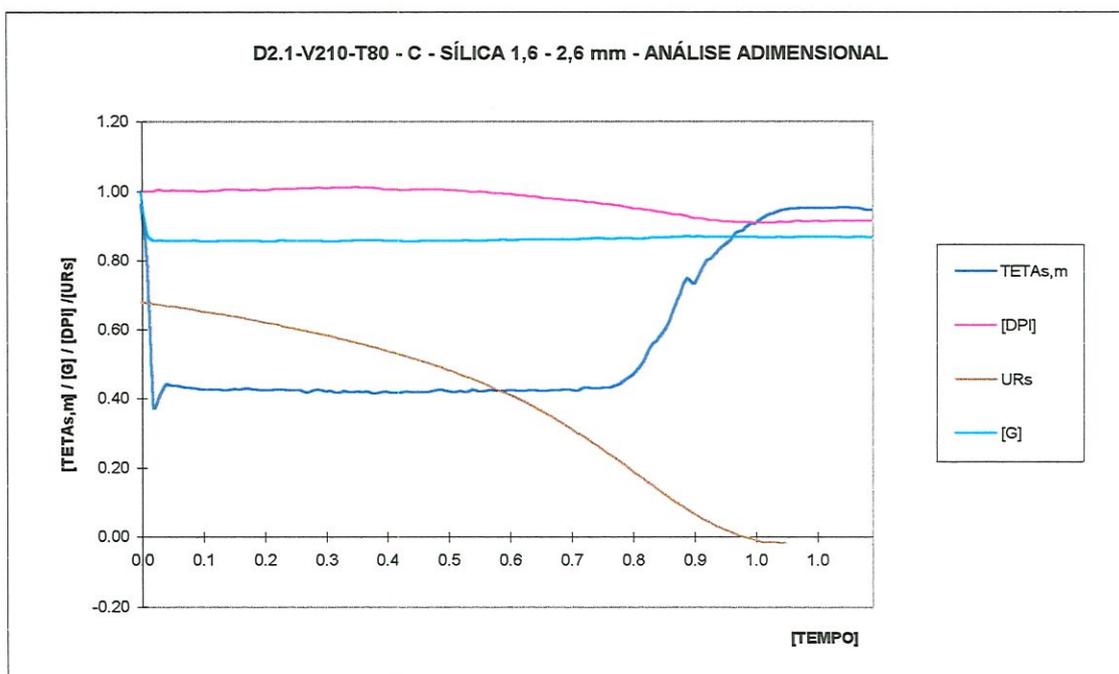
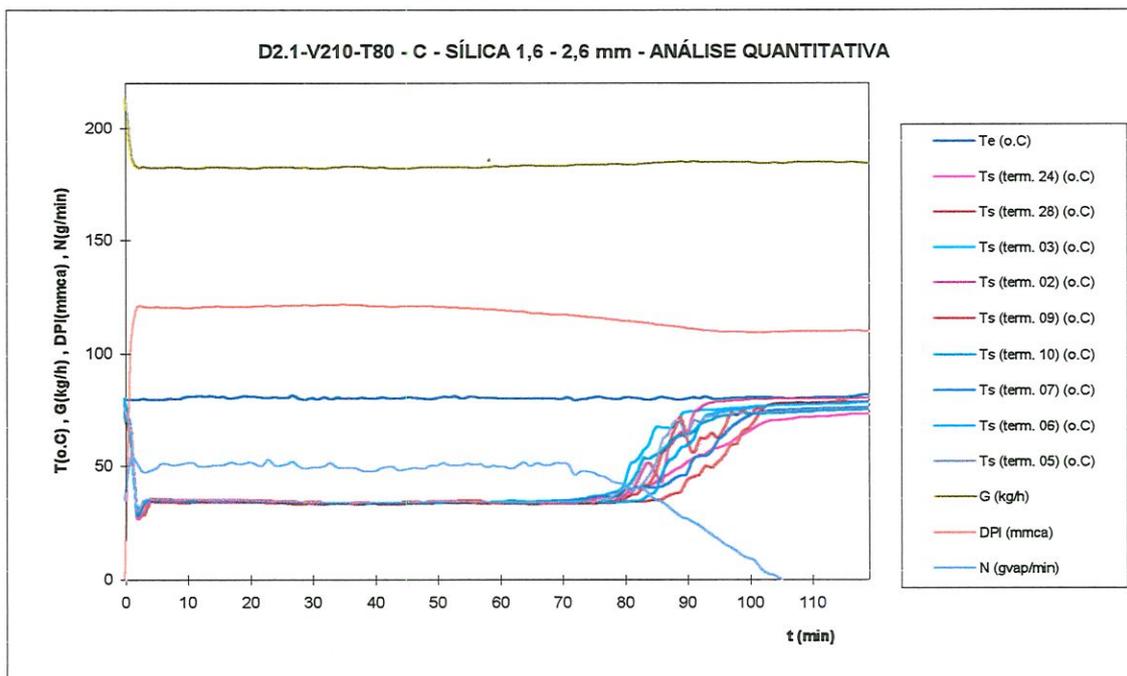


Figura A.2.33- Resultado do ensaio D2.1-V210-T80 -C



ENSAIO D4.4-V210-T80 -A dados da secagem

RU1116A

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.610$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 24.0$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.6$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.017$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.534$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.5$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.076$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 1.9$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 106$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -4.2$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 66$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$t_r = 0.62$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 54.0$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 211.0$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 55.3$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 212.2$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 59.0$ mmca

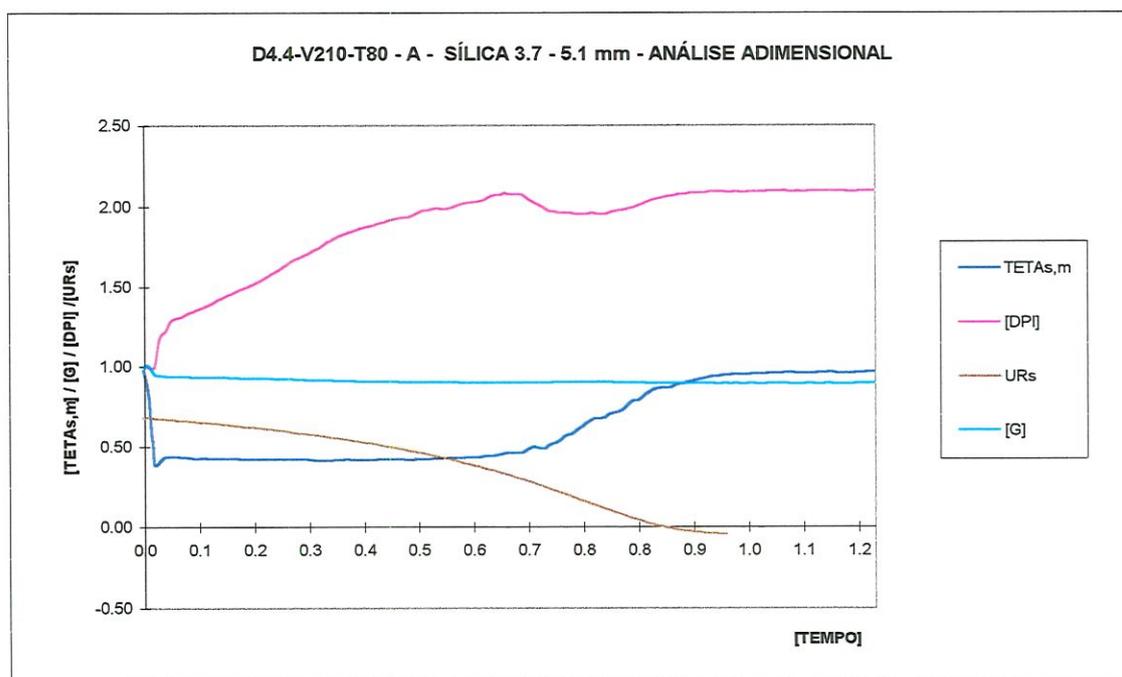
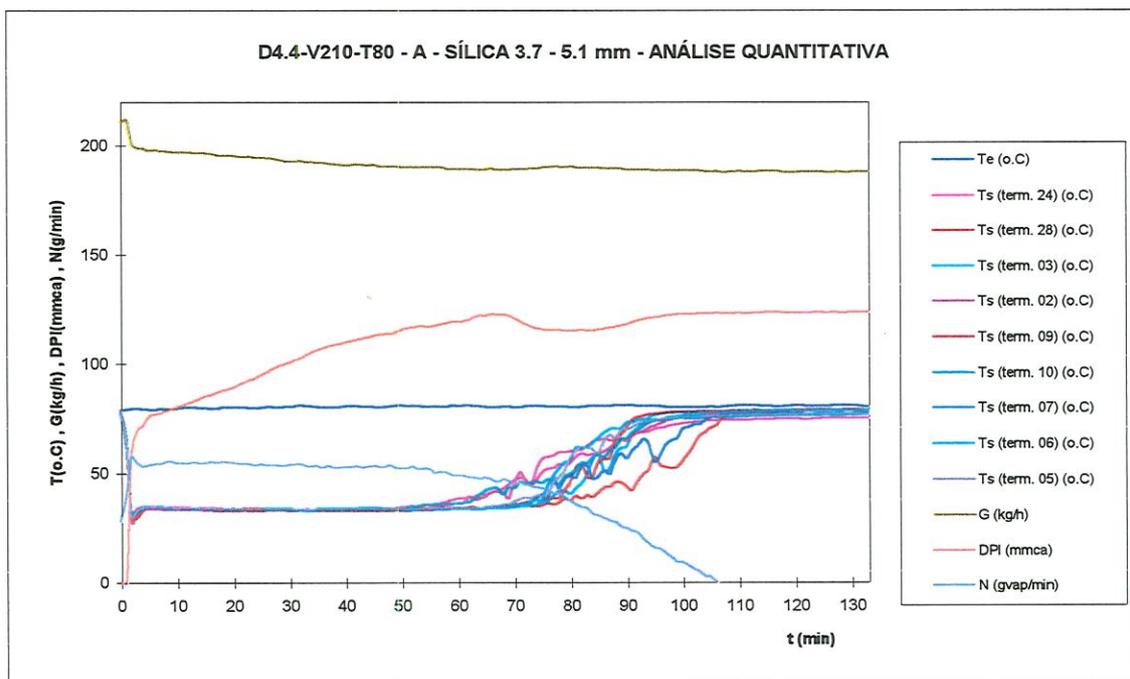


Figura A.2.34- Resultado do ensaio D4.4-V210-T80 A

ENSAIO D4.4-V210-T80 - B dados da secagem

RU1116B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6\,600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 26.7$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.8$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.019$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.475$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.6$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.125$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - medida	$UR_{L,f,med} = 1.8$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_F = 91$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - calcul.	$UR_{L,f,calc} = 4.7$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 62$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.68$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 55.4$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 210.2$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 56.5$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 205.0$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 50.1$ mmca

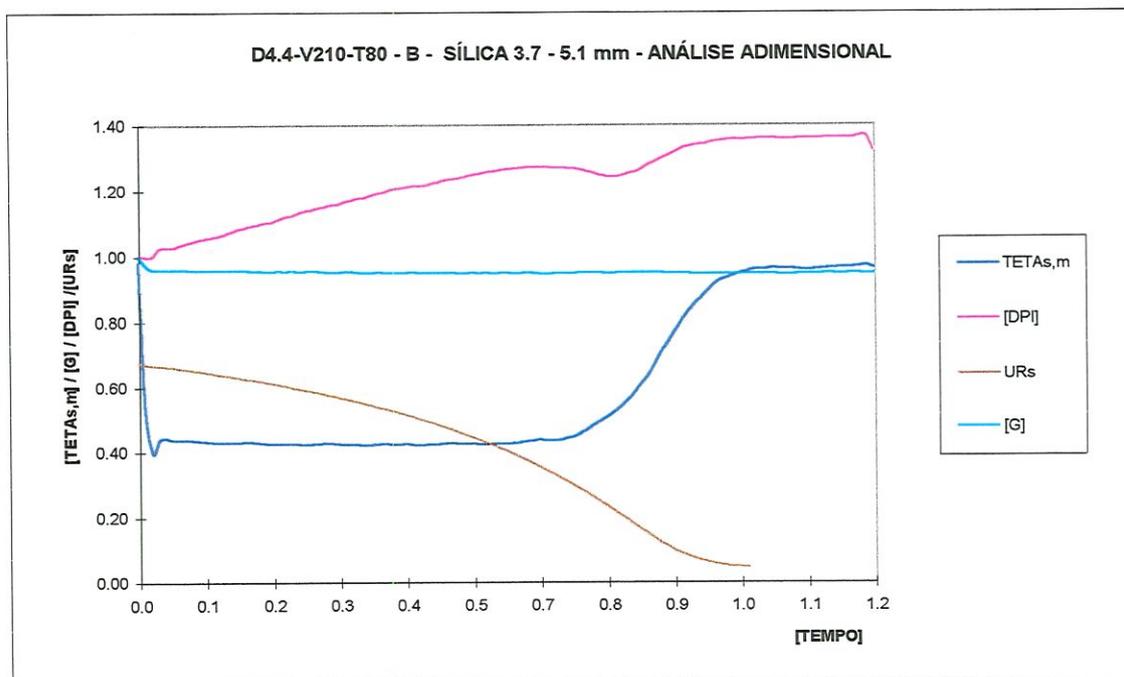
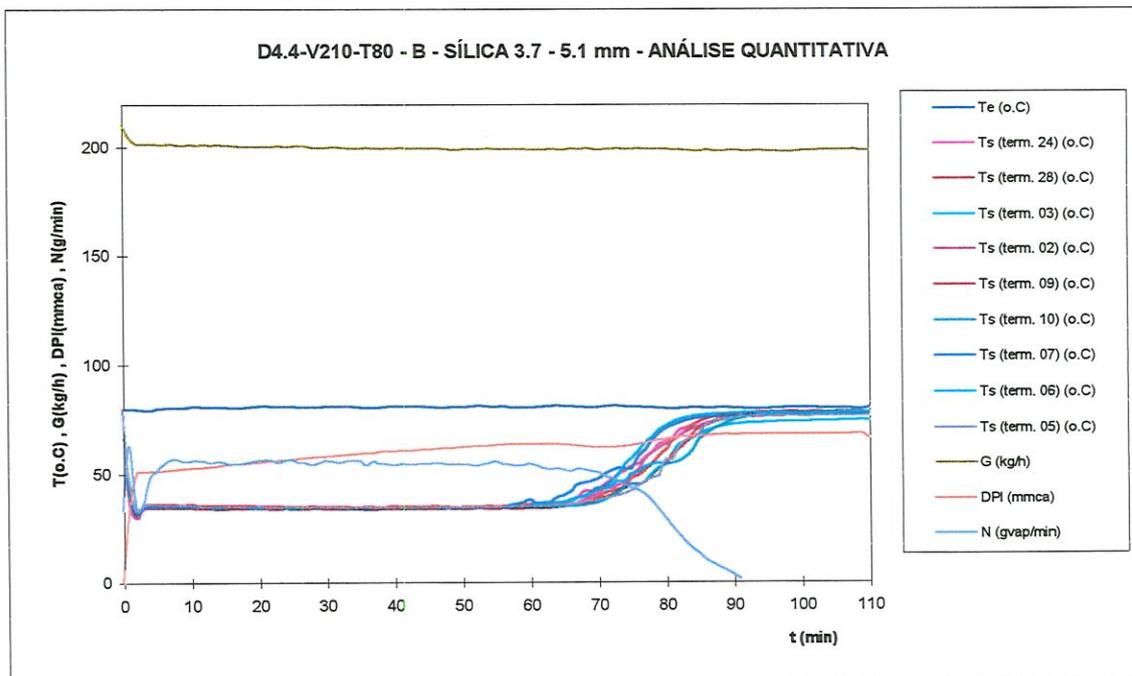


Figura A.2.35- Resultado do ensaio D4.4-V210-T80 -B

ENSAIO D4.4-V210-T80 - C dados da secagem

RU1116C

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 23.5$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.7$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.017$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.468$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 80.9$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{ss} = 2.132$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - medida	$UR_{L,f,med} = 2.4$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_T = 94$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM - calcul.	$UR_{L,f,calc} = -1.4$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 64$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_1 = 0.68$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 56.2$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 211.4$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 56.8$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 203.9$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 56.3$ mmca

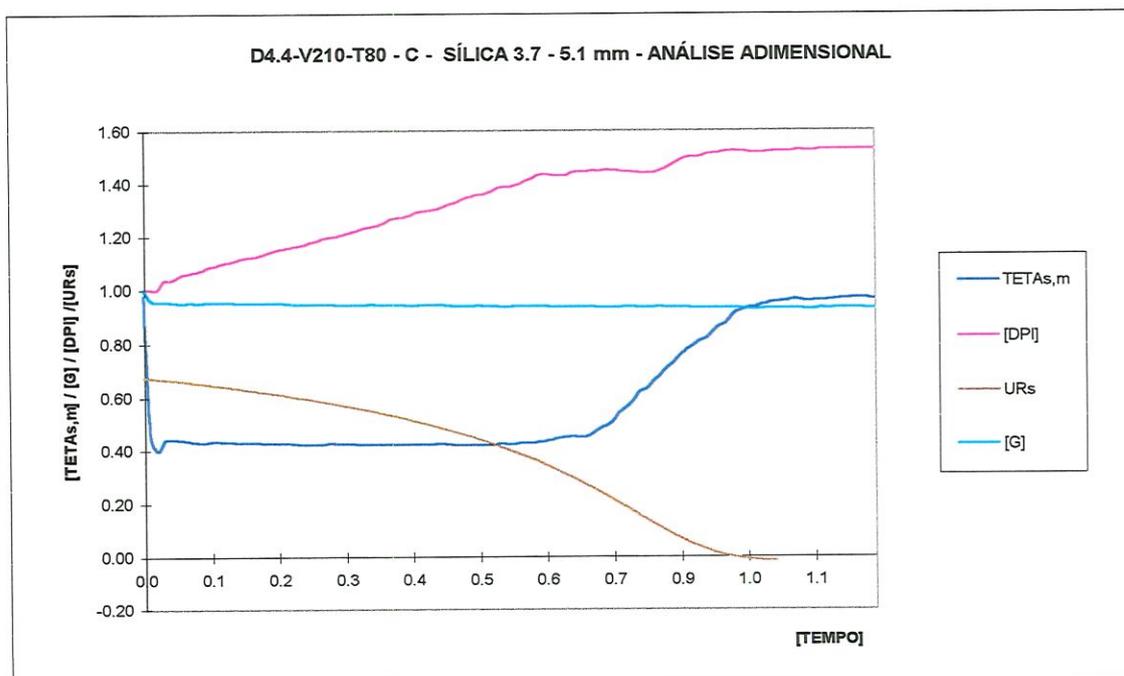
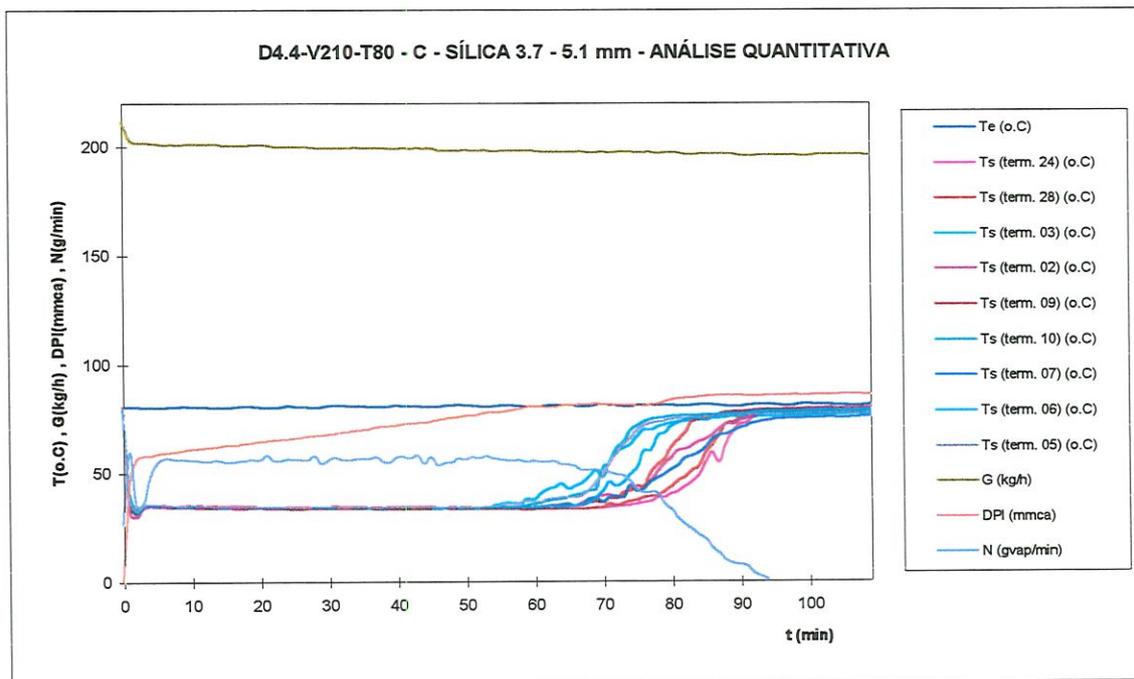


Figura A.2.36- Resultado do ensaio D4.4-V210-T80 C

ENSAIO D2.1-V210-T120 -A dados da secagem

RU1119A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.610$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 68.4$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{s,0} = 4.521$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.089$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 24.8$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.016$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 120.0$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.8$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -0.7$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 64$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 44$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $t_r = 0.69$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 85.9$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 86.8$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(c,band)} = 211.3$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 184.5$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 113.1$ mmca

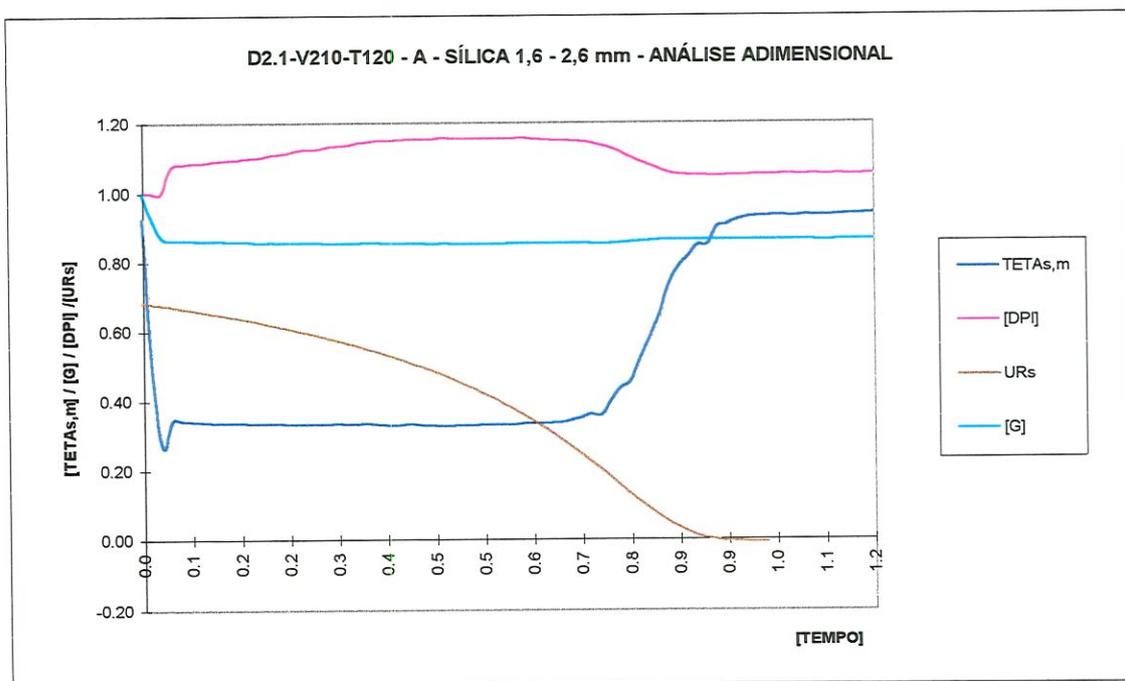
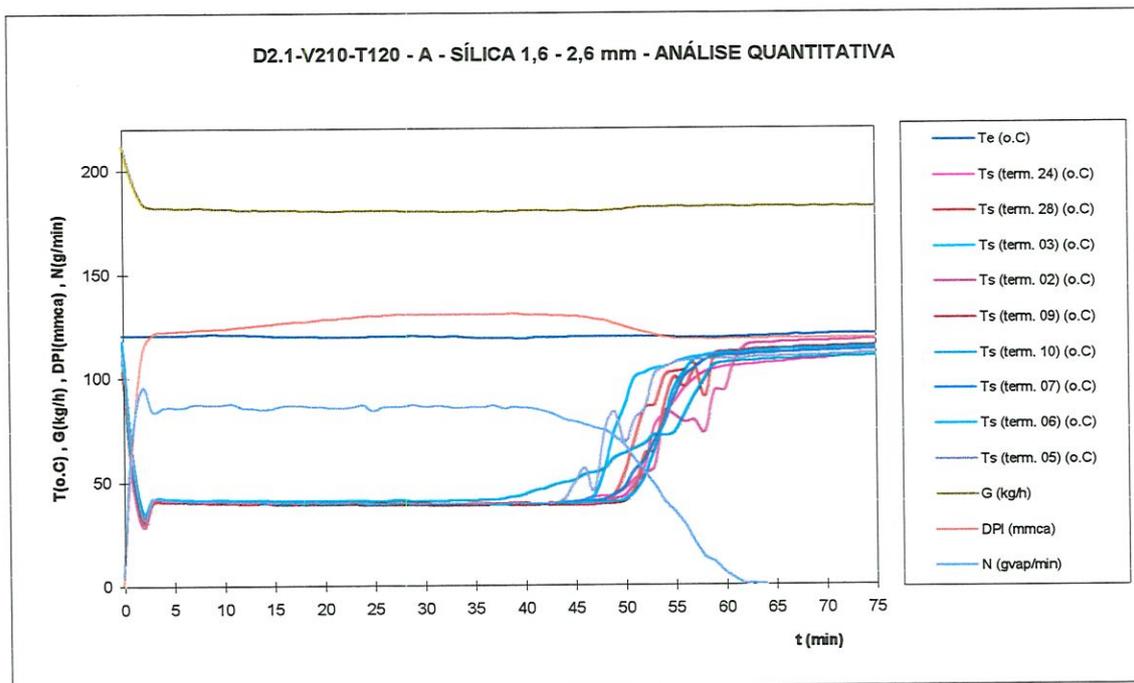


Figura A.2.37- Resultado do ensaio D2.1-V210-T120 -A

ENSAIO D2.1-V210-T120 - B dados da secagem

RU1119B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 25.3$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67.5$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.017$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.455$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 120.5$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.145$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.6$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 61$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -5.3$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 41$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.67$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 87.5$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 210.2$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 94.3$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 205.5$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 91.3$ mmca

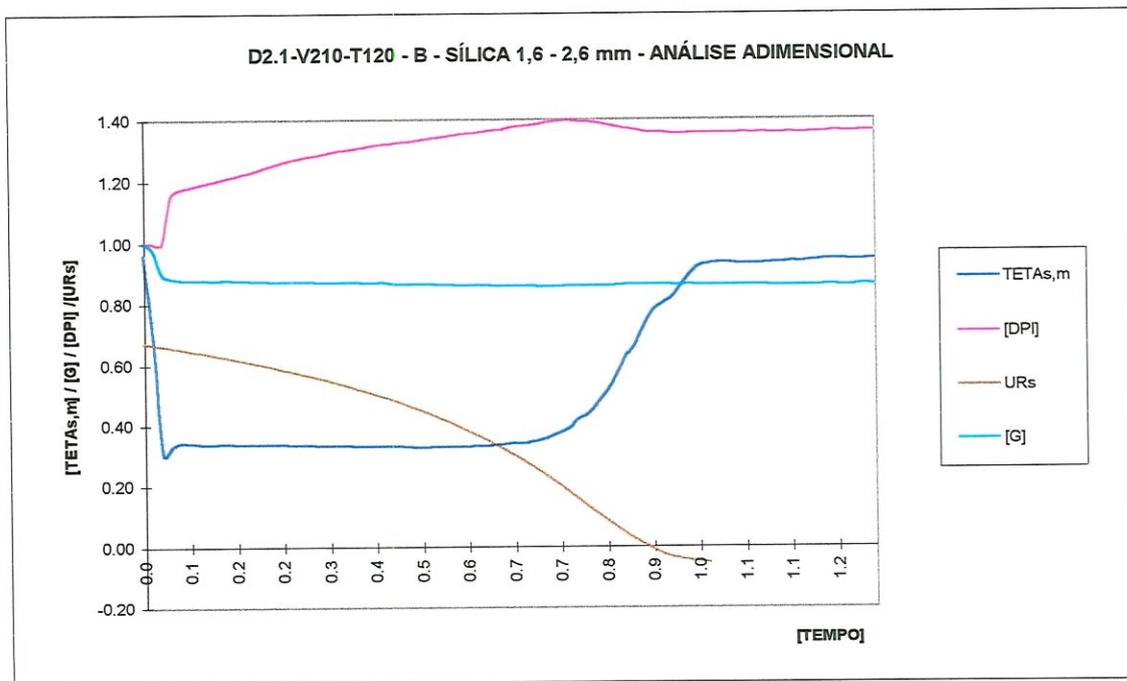
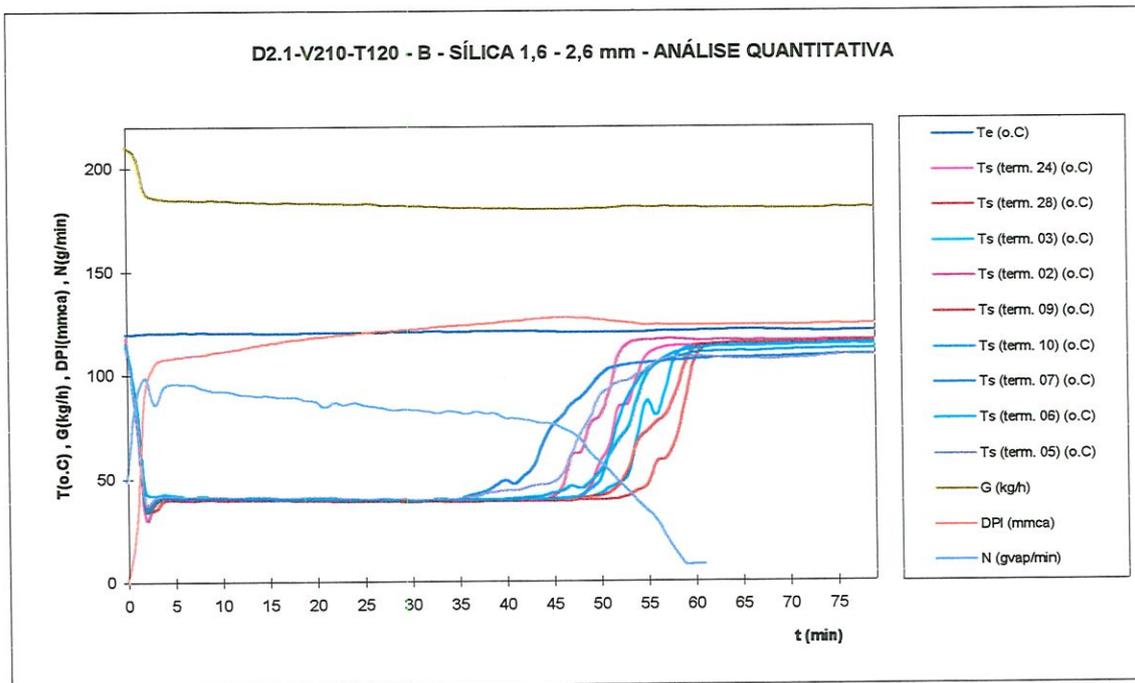


Figura A.2.38- Resultado do ensaio D2.1-V210-T120 -B

ENSAIO D2.1-V210-T120 - C dados da secagem

RU1119C

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.610$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 66.5$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.396$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.214$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 21.7$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.014$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 121.3$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.6$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -7.5$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 60$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 44$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.73$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 90.7$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 93.6$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 211.5$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 206.6$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 105.0$ mmca

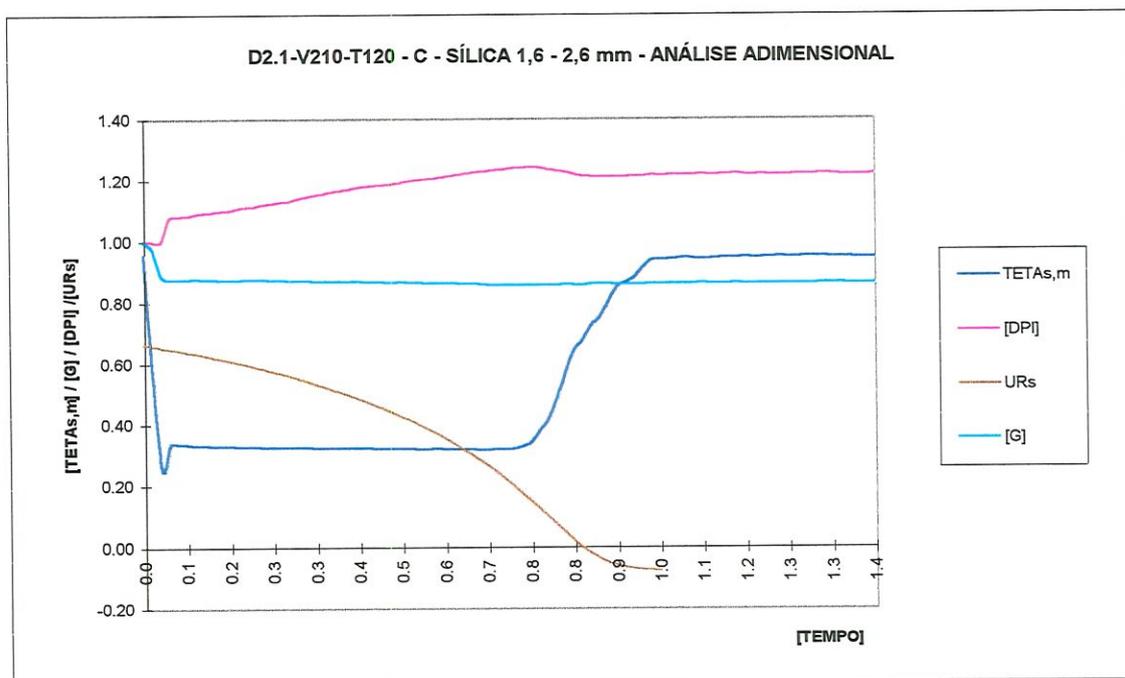
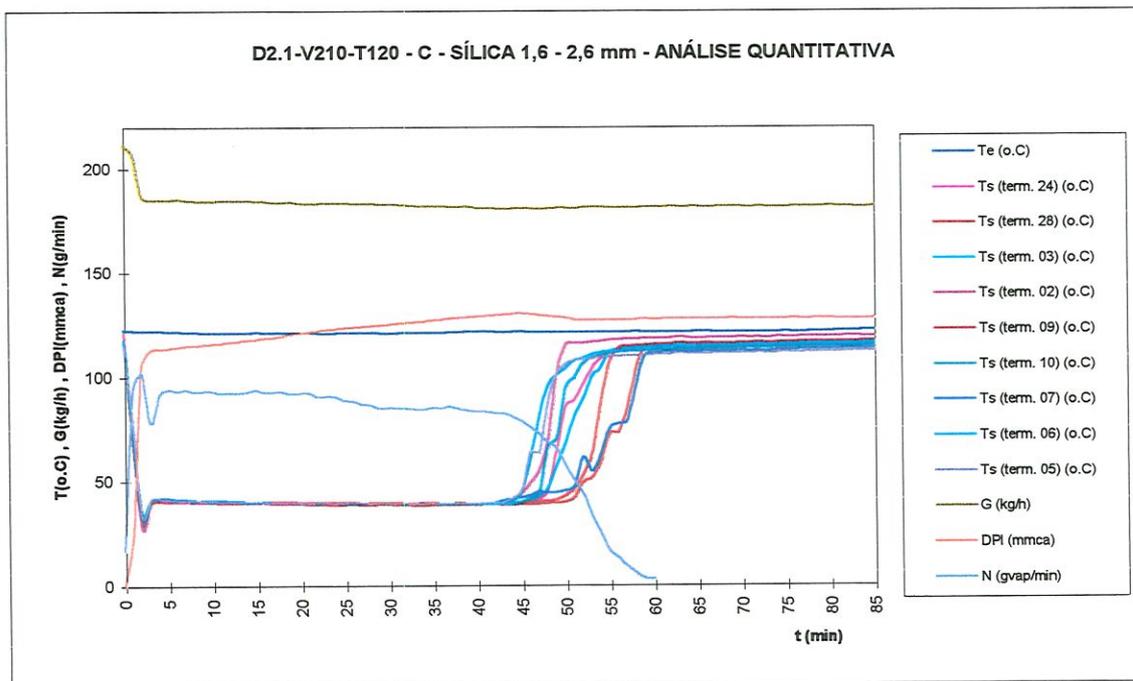


Figura A.2.39- Resultado do ensaio D2.1-V210-T120 -C

ENSAIO D4.4-V210-T120 -A dados da secagem

RU1118B

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.620$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 68$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.502$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{ss} = 2.118$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE

$T_{amb,m} = 25.8$ o.C
 $W_{amb,m} = 0.019$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 $T_{amb,m} = 119.2$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.9$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 0.0$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 63$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 37$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_f = 0.59$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 99.8$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 96.26$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s.band)} = 211.2$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 203.1$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 69.8$ mmca

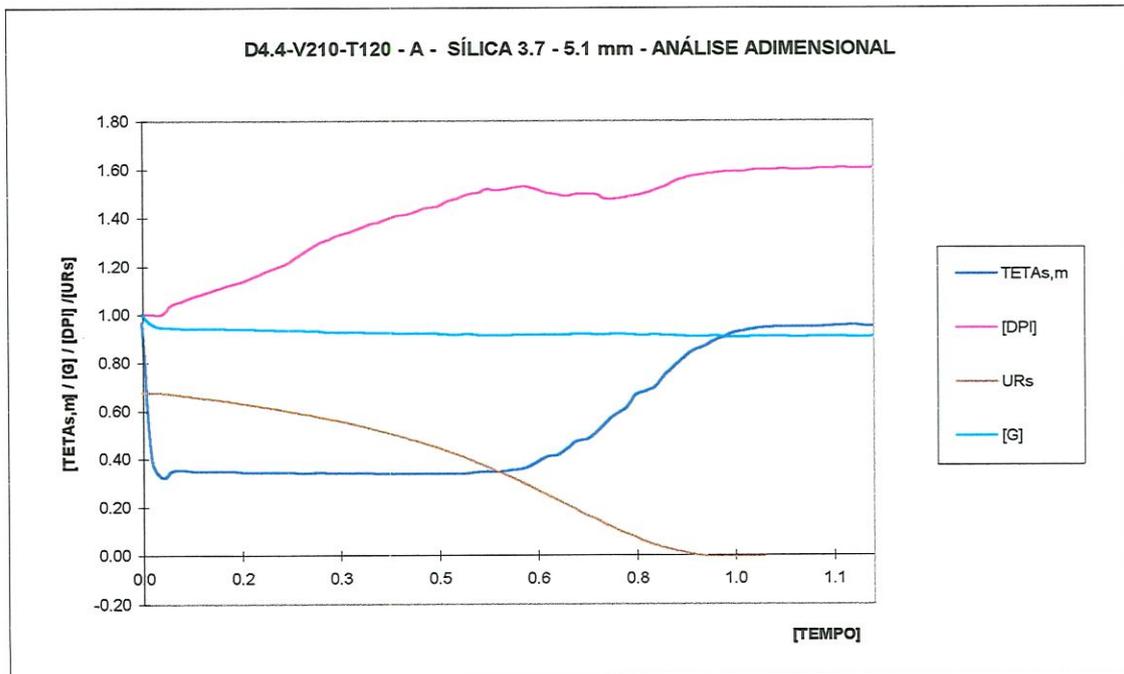
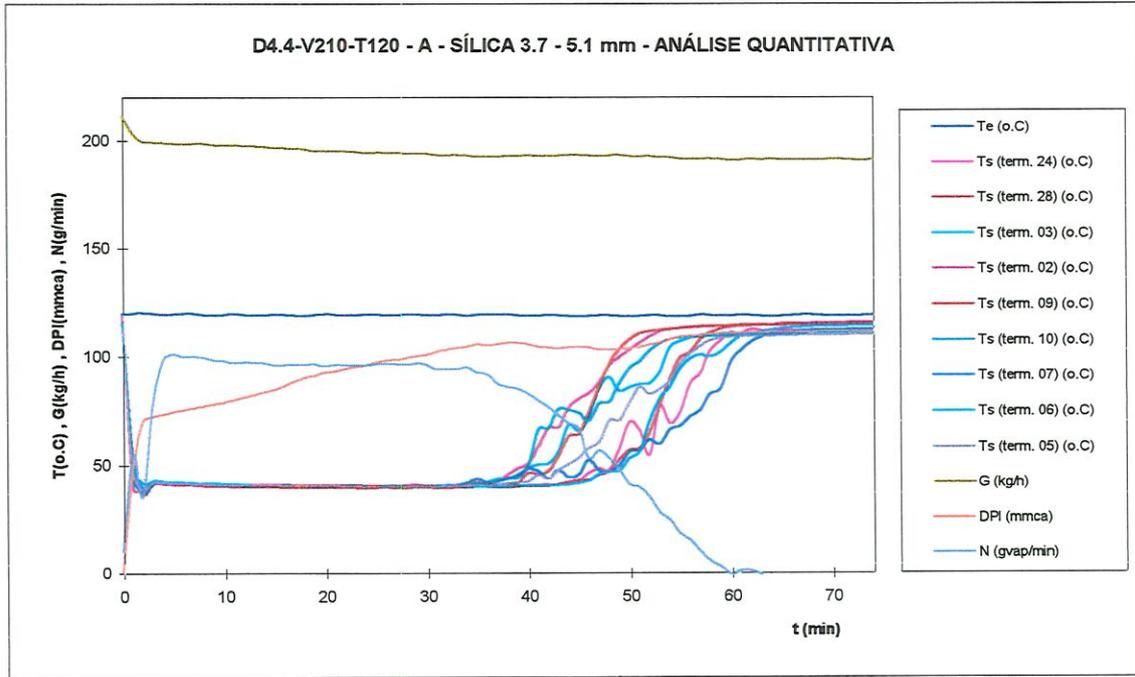


Figura A.2.40- Resultado do ensaio D4.4-V210-T120 -A

ENSAIO D4.4-V210-T120 -B dados da secagem

RU1118C

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.630$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.8$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.495$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{se} = 2.135$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 24.1$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.018$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 120.8$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.8$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = 6.2$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 59$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 38$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.64$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 96.7$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 98.3$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(c,band)} = 211.1$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 212.1$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 52.3$ mmca

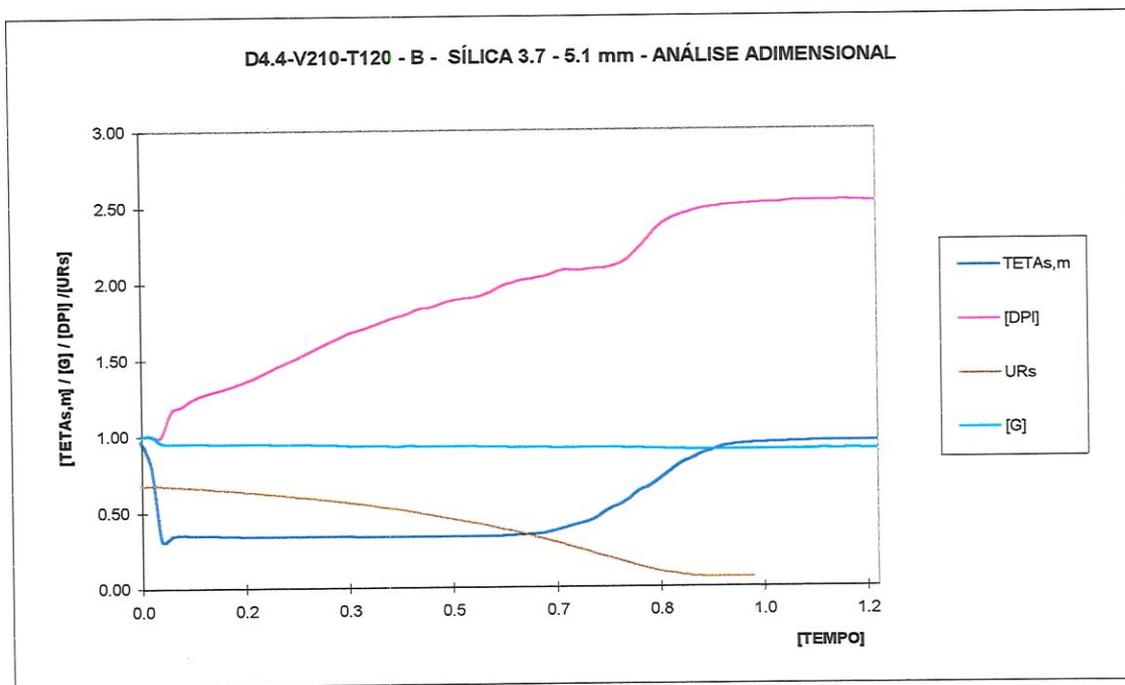
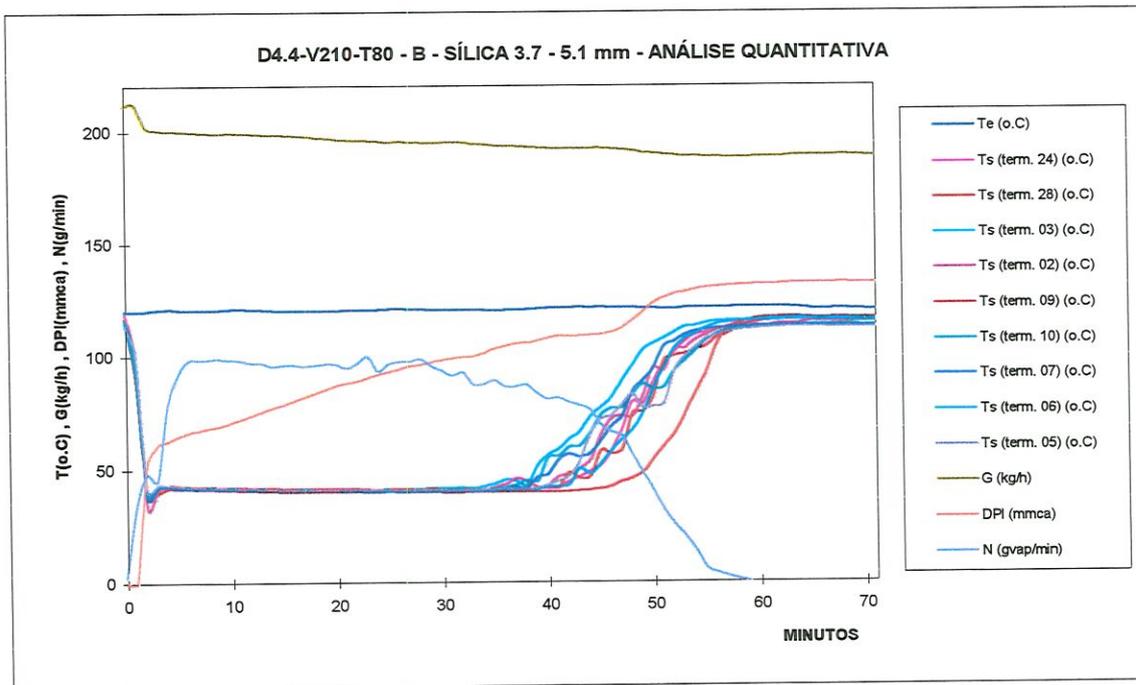


Figura A.2.41- Resultado do ensaio D4.4-V210-T120 -B

ENSAIO D4.4-V210-T120 -C dados da secagem

RU1118D

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.630$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.8$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.495$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{s0} = 2.135$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 22.5$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.017$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 121.4$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.8$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -2.8$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 60$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 38$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.63$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{med} = 98.5$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{max} = 103.7$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 212.1$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 199.8$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 70.0$ mmca

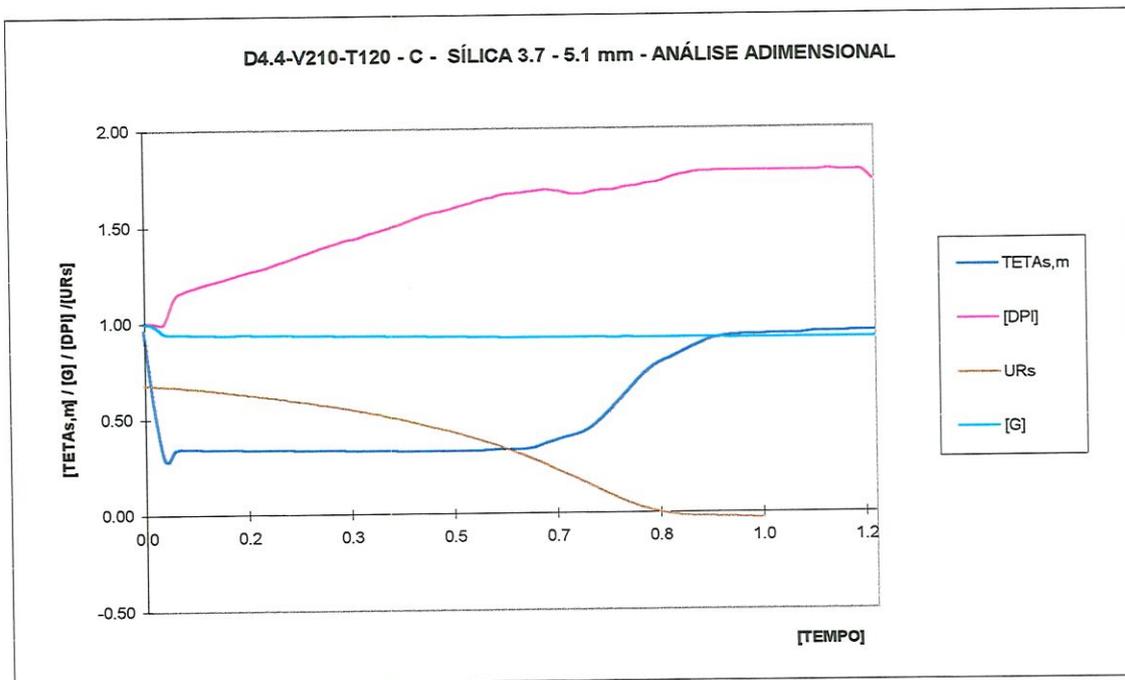
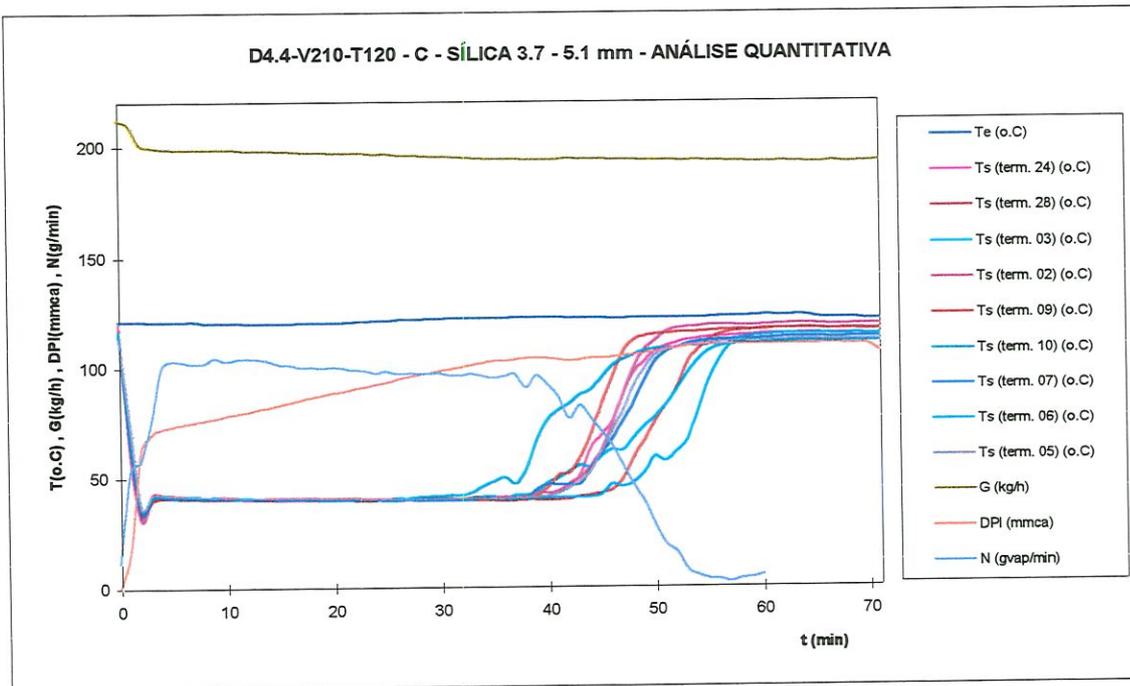


Figura A.2.42- Resultado do ensaio D4.4-V210-T120-C

ENSAIO D2.1-V210-T180 -A dados da secagem

RU1121A

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 68.1$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.488$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{ss} = 2.102$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 30.1$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.021$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 180.6$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.4$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -12.5$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_f = 40$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $t_r = 29$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.73$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 136.7$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 166.5$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 210.3$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 191.3$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 126.7$ mmca

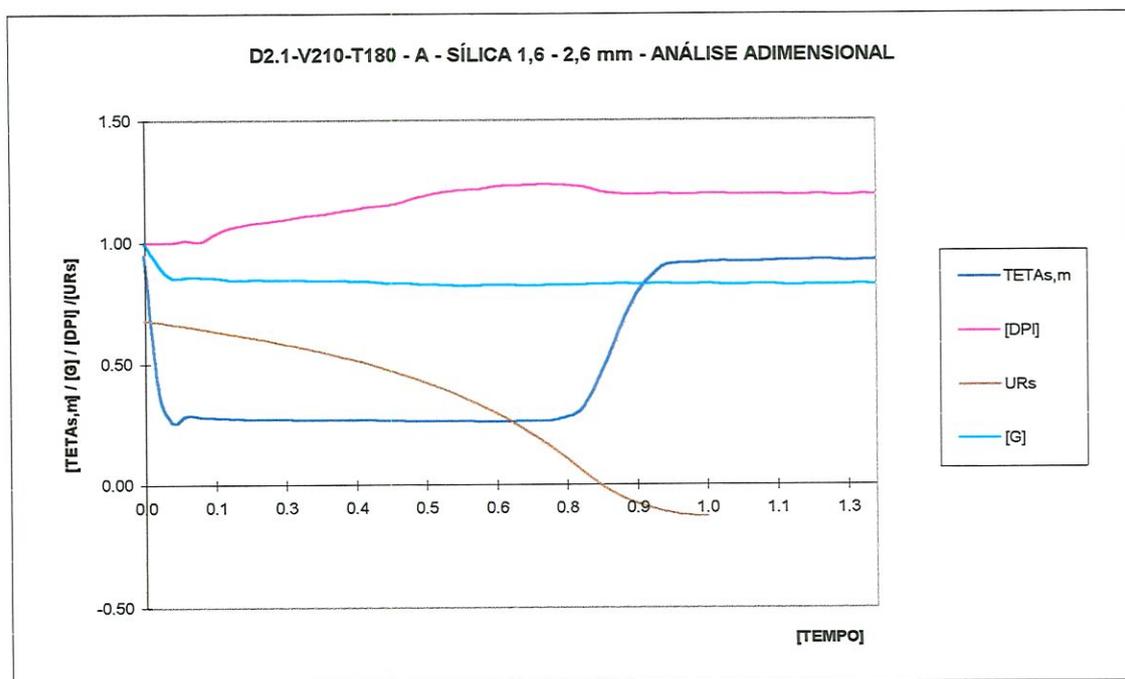
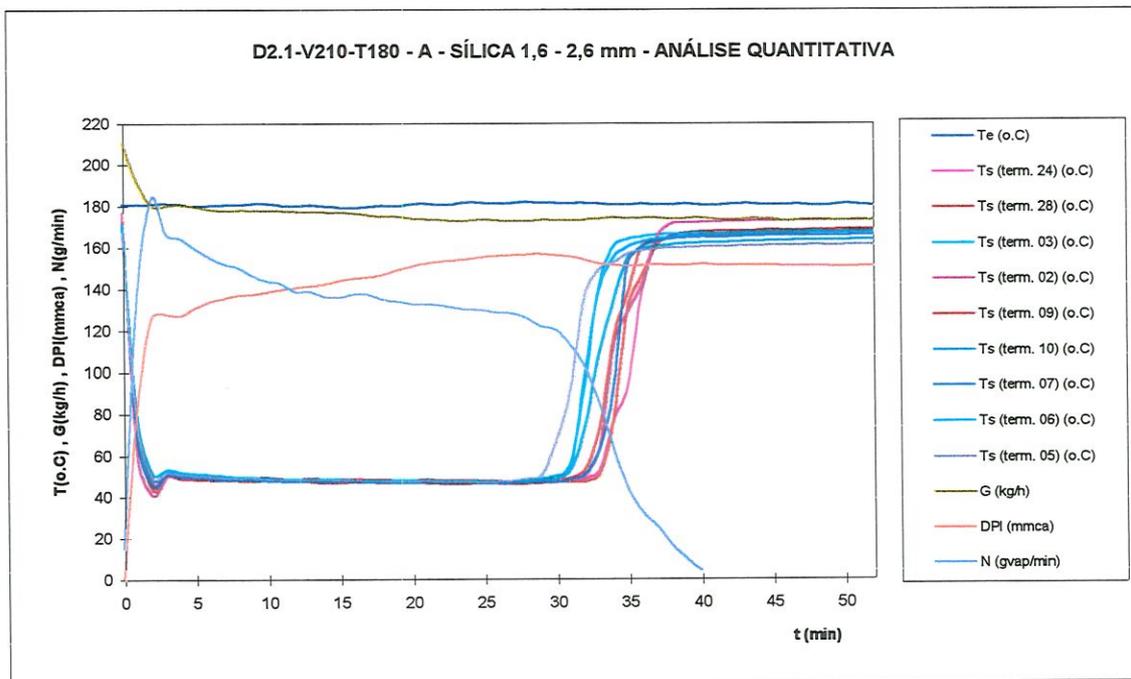


Figura A.2.43- Resultado do ensaio D2.1-V210-T180 -A

ENSAIO D2.1-V210-T180 - B dados da secagem

RU1121B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 31.7$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.021$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.422$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 180.4$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.178$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.4$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_T = 40$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -29.8$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 27$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_r = 0.68$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{méd} = 135.0$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 209.0$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{máx} = 179$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 209.8$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 116.1$ mmca

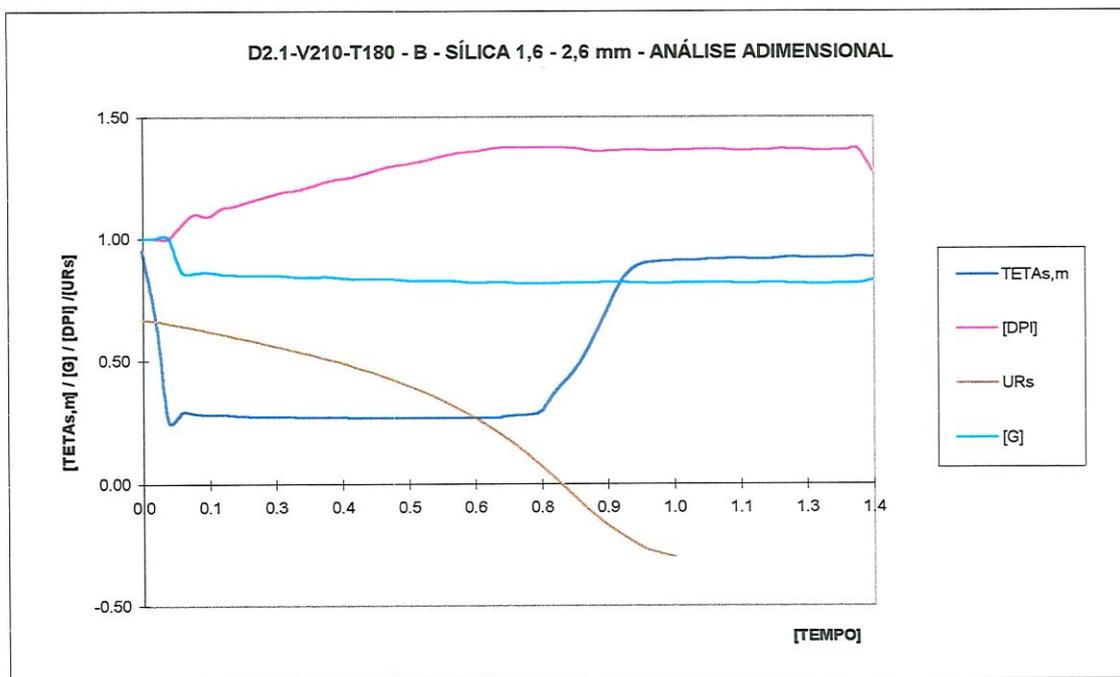
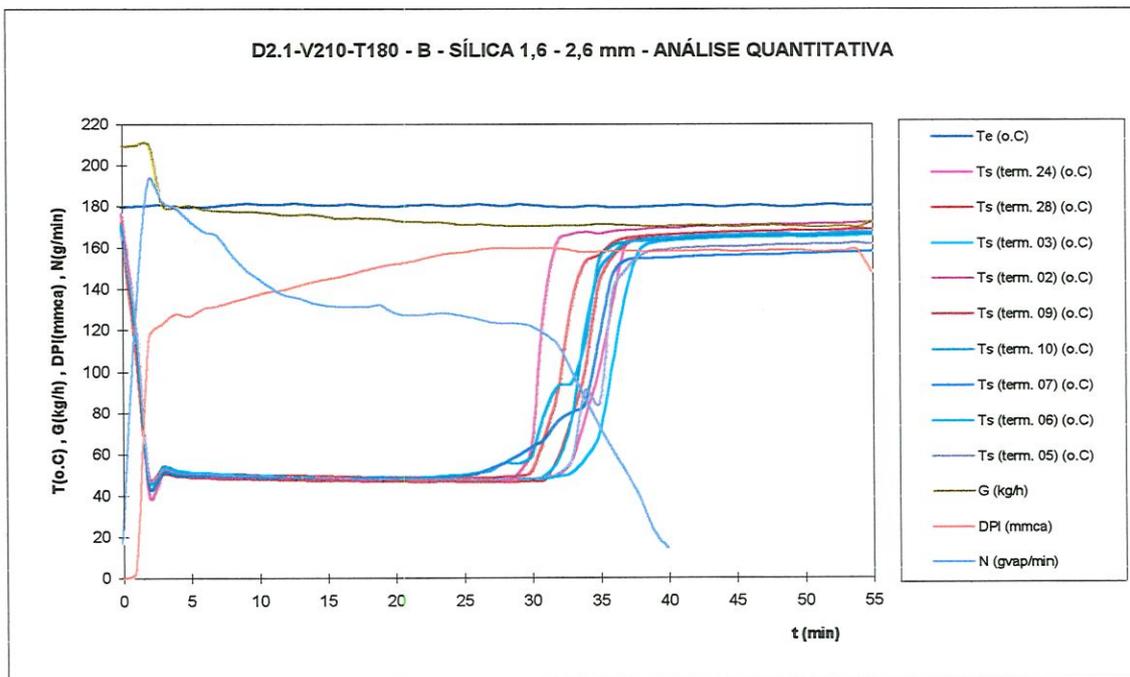


Figura A.2.44- Resultado do ensaio D2.1-V210-T180 -B

ENSAIO D2.1-V210-T180 - C dados da secagem

RU1121C

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 24.0$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 67$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.018$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.422$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 181.2$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{sp} = 2.178$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.4$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 41$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -14.7$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$t_r = 26$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$t_r = 0.63$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 126.9$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(c,band)} = 210.5$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 157.6$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 192.7$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 127.5$ mmca

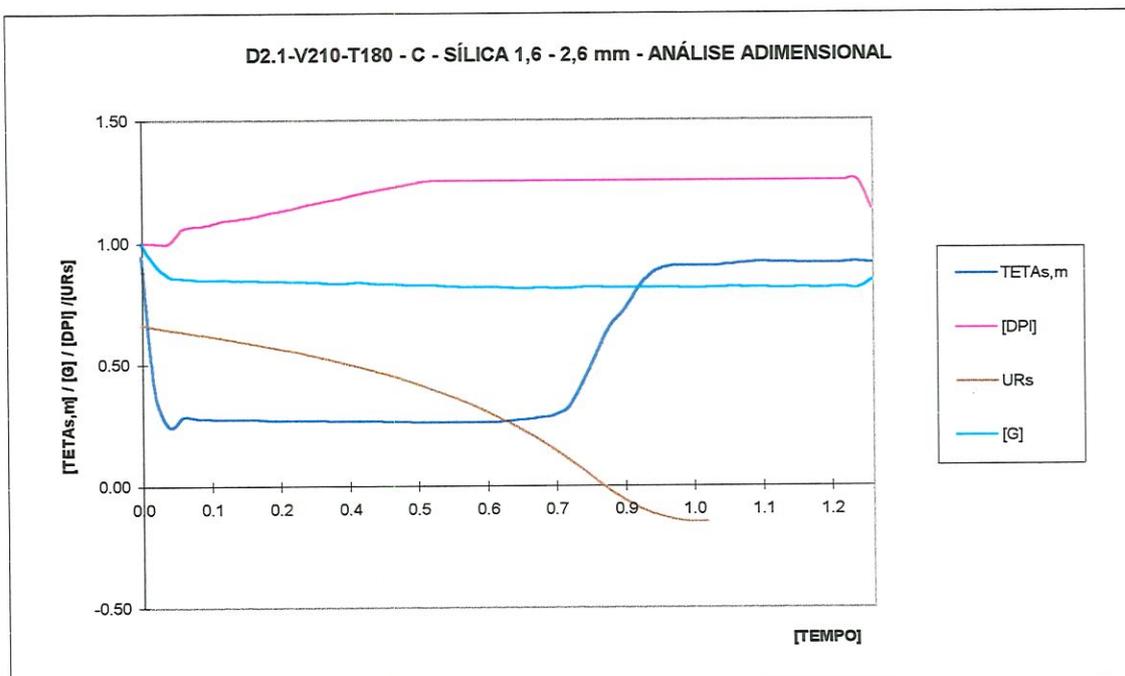
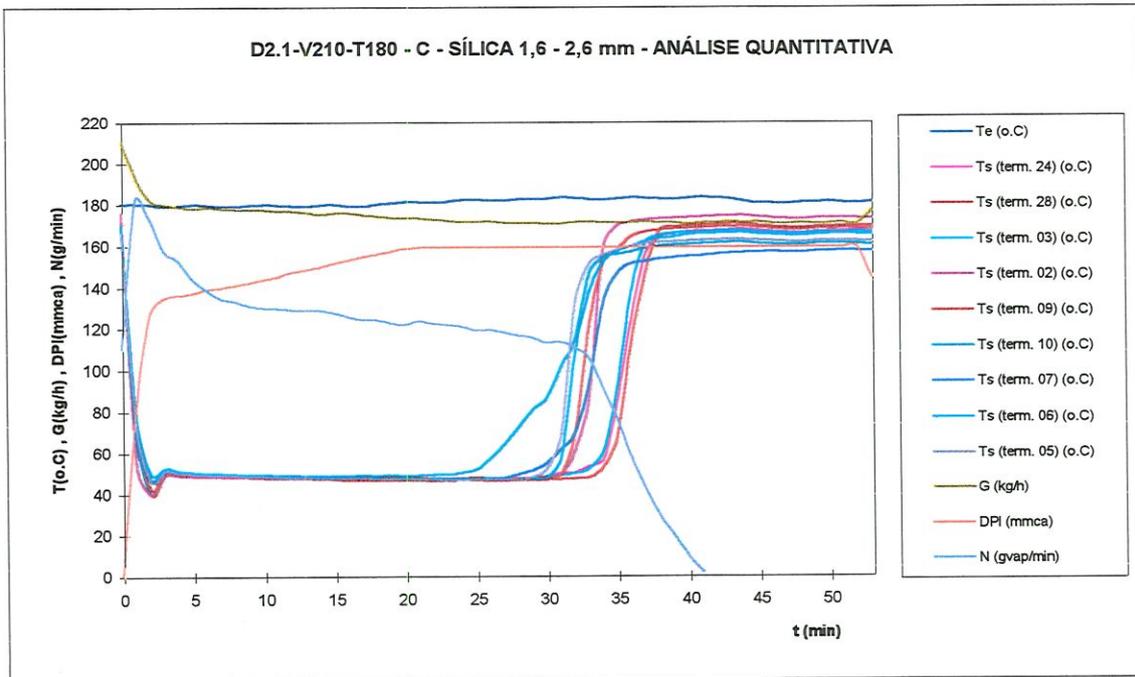


Figura A.2.45- Resultado do ensaio D2.1-V210-T80 -C

ENSAIO D4.4-V210-T180 -B dados da secagem

RU1120B

MASSA INICIAL NO LEITO	$m_L = 6.600$ kg	TEMP. AMBIENTE MÉDIA	$T_{amb,m} = 29.5$ o.C
UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO	$UR_{L,0} = 68.3$ %	UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE	$W_{amb,m} = 0.018$ (kg _{vap} /kg _{ar})
MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO	$W_{a,0} = 4.508$ kg água	TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE	$T_{amb,m} = 180.4$ o.C
MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO	$m_{se} = 2.092$ kg sílica		
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida	$UR_{L,f,med} = 0.3$ %	TEMPO TÉRMINO SECAGEM	$t_f = 41$ min
UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul.	$UR_{L,f,calc} = -12.3$ %	TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC.	$\tau = 21$ min
		TEMP ADMENSIONAL PONTO	$\tau_1 = 0.51$
		TAXA SECAGEM DECRESCENTE	
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{med} = 133.9$ g/min	DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA	$G_{(s,band)} = 208.9$ kg/h
TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE	$N_{max} = 195.3$ g/min	DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM	$G = 210.5$ kg/h
		VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM	$DPI = 77.6$ mmca

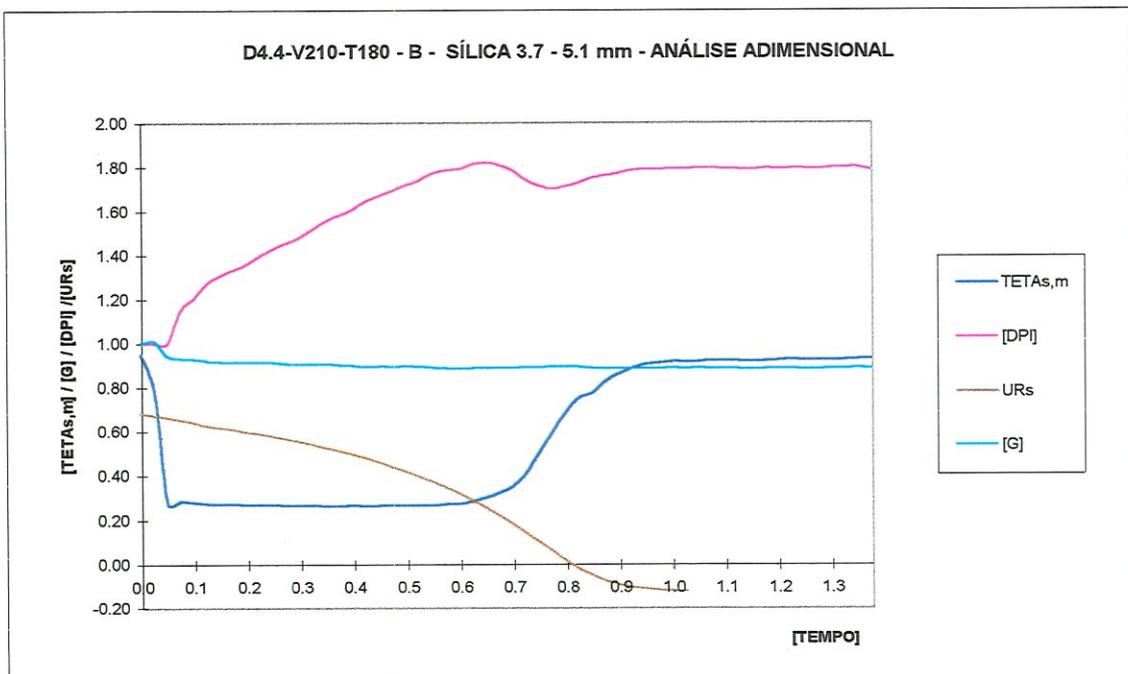
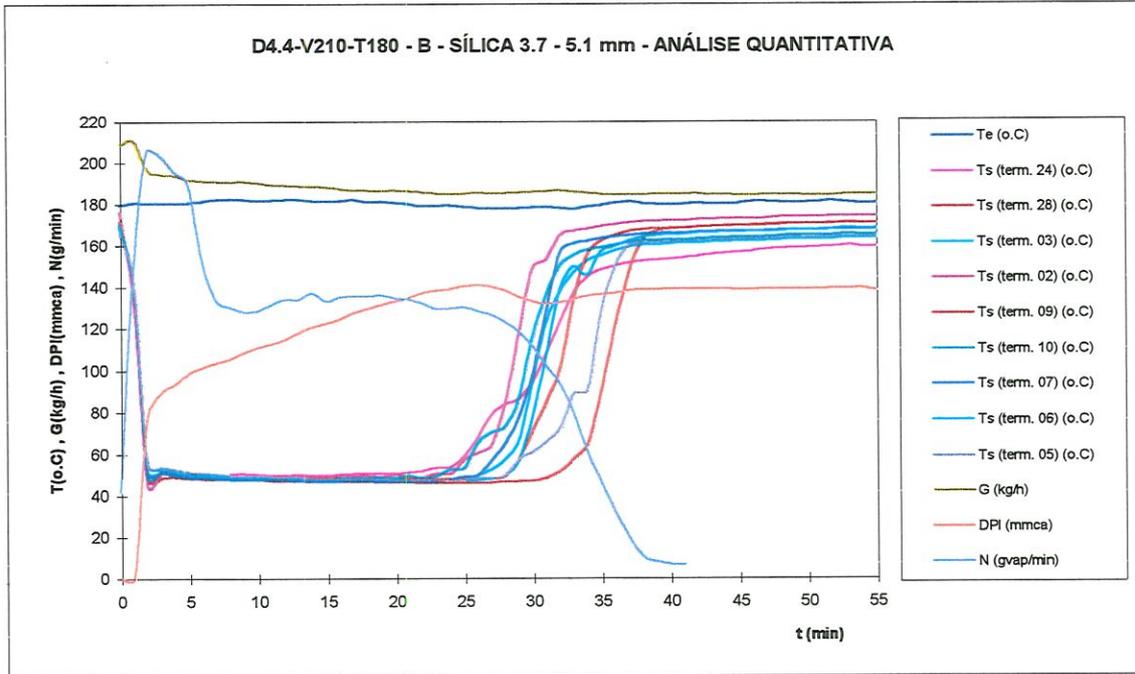


Figura A.2.46- Resultado do ensaio D4.4-V210-T180 -B

ENSAIO D4.4-V210-T180 - C dados da secagem

RU1120C

MASSA INICIAL NO LEITO $m_L = 6.590$ kg
 UMID. RELATIVA INICIAL DO LEITO $UR_{L,0} = 67.8$ %
 MASSA INICIAL DE ÁGUA NO LEITO $W_{a,0} = 4.468$ kg água
 MASSA DE SÍLICA SECA NO LEITO $m_{sp} = 2.122$ kg sílica

TEMP. AMBIENTE MÉDIA $T_{amb,m} = 26.8$ o.C
 UMID. ABS. MÉDIA DO AMBIENTE $W_{amb,m} = 0.018$ (kg_{vap}/kg_{ar})
 TEMP. MÉDIA DO AR QUENTE $T_{amb,m} = 180.6$ o.C

UMID. RELAT. FIM SECAGEM -medida $UR_{L,f,med} = 0.4$ %
 UMID. RELAT. FIM SECAGEM -calcul. $UR_{L,f,calc} = -10.1$ %

TEMPO TÉRMINO SECAGEM $t_T = 37$ min
 TEMPO PTO TAXA SEC. DECRESC. $\tau = 25$ min
 TEMP ADMENSIONAL PONTO $\tau_r = 0.68$

TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{méd} = 145.1$ g/min
 TAXA SECAGEM - P. CONSTANTE $N_{máx} = 198.3$ g/min

TAXA SECAGEM DECRESCENTE
 DESCARGA FLUXO SEM BANDEJA $G_{(s,band)} = 209.9$ kg/h
 DESCARGA NO INÍCIO SECAGEM $G = 206.3$ kg/h
 VAR. DA PRESSÃO INÍCIO SECAGEM $DPI = 70.1$ mmca

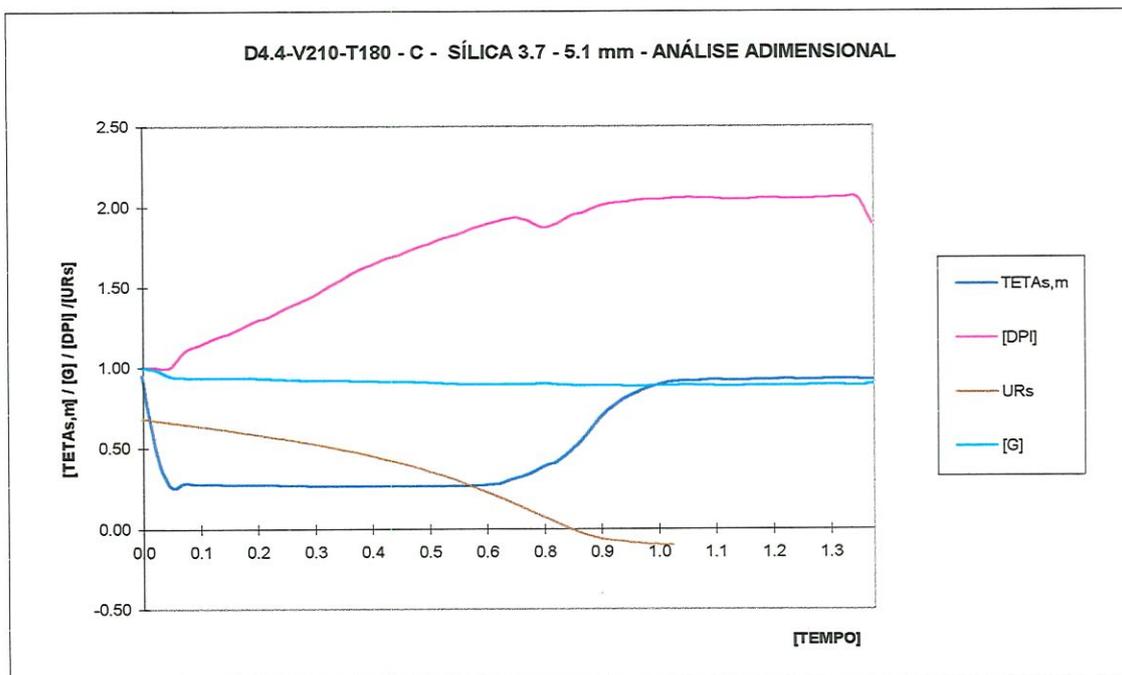
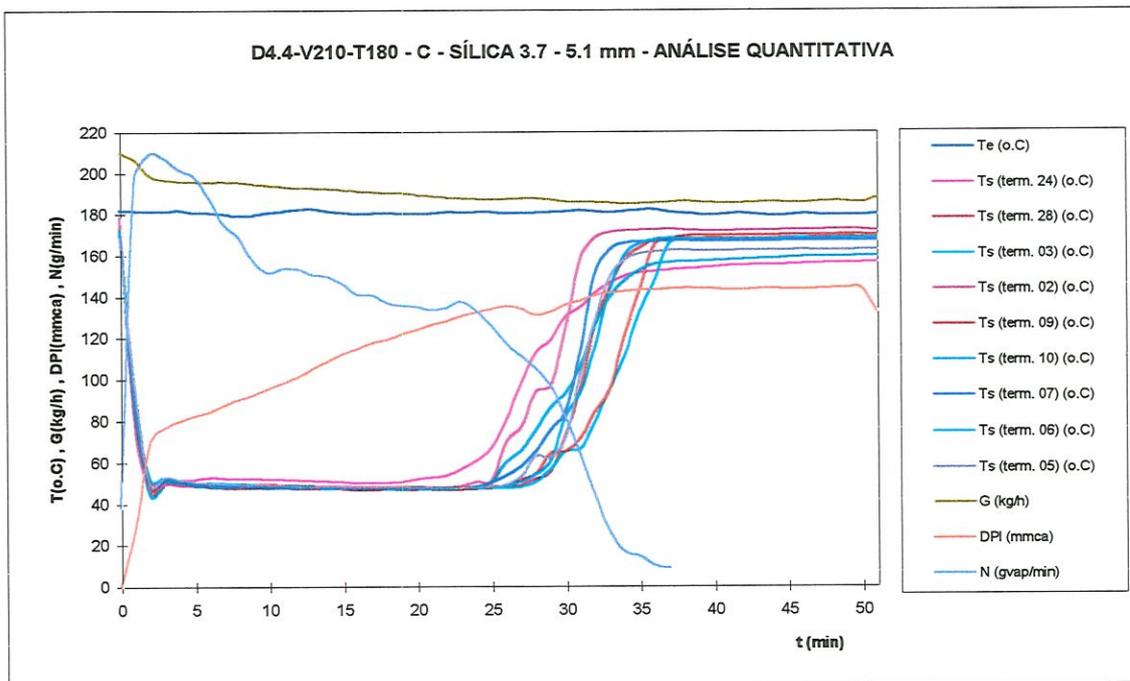


Figura A.2.47- Resultado do ensaio D4.4-V210-T180 -C

7.3- DIFUSÃO EM MEIO POROSO

7.3- DIFUSÃO EM MEIO POROSO

Pesaram & Mills (1987a)

Difusão ordinária, como descrita pela lei de Fick ocorre quando as moléculas do gás colidem entre si mais freqüentemente do que com as paredes dos poros de um meio poroso. Para misturas vapor d'água e ar, uma fórmula útil para o coeficiente de difusão ordinário, $D_{H_2O,ar}$ [m^2/s] é :

$$D_{H_2O,ar} = \frac{1,725 \times 10^{-9} \times (T+273,15)^{1,685}}{P} \quad (A3.1)$$

onde:

T = temperatura; [°C]

P = pressão total. [atm]

Para valores grandes do número Knudsen ($K_n = \lambda/r$, onde λ é o meio caminho livre e r é o raio do poro), as moléculas do gás colidem mais freqüentemente com as paredes do poro que entre si, e a difusão das moléculas é descrita pela equação do livre fluxo de molécula. Uma expressão tipo Lei de Fick pode ser obtida para este fluxo se for definido um coeficiente de difusão Knudsen, D_K . Para difusão de vapor d'água e ar em poros cilíndricos retilíneos de raio a , a equação dimensional para D_K [m^2/s] é dada por:

$$D_K = 22,86 r (T+273,15)^{1/2} \quad (A3.2)$$

onde:

r = raio do poro [m]

A tabela A3.1 compara coeficientes de difusão ordinário e Knudsen em misturas de vapor d'água e ar para diferentes valores do raio de poro. A combinação destes dois coeficientes de difusão pode ser representada assumindo a soma de resistências:

$$1/D_1 = 1/D_{H_2O,ar} + 1/D_K \quad (A3.3)$$

Vê-se da tabela A3.1 que a difusão Knudsen é dominante para tamanhos de poros menores que aprox. 200 °A. Desde que a maioria dos poros de sílica gel são menores que 100 °A, está claro que a difusão ordinária pode ser ignorada em aplicações usuais de sílica gel.

TABELA A3.1 - Comparação dos coeficientes de difusão ordinário e Knudsen em misturas de vapor d'água e ar para diferentes valores do raio de poro ($T = 40\text{ °C}$ e $P = 1\text{ atm}$)

r (°A)	D_{K,H_2O} (m^2/s)	$D_{H_2O,ar}$ (m^2/s)	$\frac{D_{K,H_2O}}{D_{H_2O,ar}}$
11	$4,45 \times 10^{-7}$	$2,79 \times 10^{-7}$	0,0159
68	$2,75 \times 10^{-6}$	$2,79 \times 10^{-7}$	0,099
100	$4,04 \times 10^{-6}$	$2,79 \times 10^{-7}$	0,145
200	$8,08 \times 10^{-6}$	$2,79 \times 10^{-7}$	0,290
1000	$4,04 \times 10^{-5}$	$2,79 \times 10^{-7}$	1,45

A equação (A3.2) é válida somente para capilares de raio uniforme, e longos. Ela pode ser modificada para aplicação em meio poroso real, definindo-se um coeficiente de difusão Knudsen efetivo dado por:

$$D_{K,eff} = \frac{\varepsilon_p D_K}{\tau_g} \quad (A3.4)$$

onde:

ε = porosidade do leito (fração do espaço livre em volume);

τ_g = fator de tortuosidade do gás, que considera o aumento no caminho difusional devido aos caminhos não retilíneos dos poros reais.

A difusão de superfície é o transporte de moléculas adsorvidas na superfície do poro. Existem vários mecanismos diferentes para expressar a movimentação das moléculas adsorvidas na superfície. A difusão de superfície, D_s , [m^2/s], pode ser determinada em termos da Lei de Fick.

havendo um equacionamento teórico para este cálculo proposto por Kruckels. Extrapolando a equação de Kruckels para vários valores de temperatura temos:

$$D_s = 1,287 \times 10^{-8} \exp\left(-811,30 \frac{W}{(T+273,15)}\right) \times (1 + 3112 X \tanh(0,265 \times 10^{-2}(X/r))) \quad (\text{A3.5})$$

Vemos que D_s diminui com o aumento do teor de umidade do material, X .

Sladek propôs uma fórmula mais simples que é válida tanto para camadas de superfície altas como baixas. A seguinte expressão para o coeficiente de difusão de superfície foi escrita:

$$D_s = D_0 \exp(-0,974 \times 10^{-3} \times (H_{ads}/(T+273,15))) \quad (\text{A3.6})$$

onde:

$D_0 = 1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, ou pode ser obtido igualando-se os resultados experimental e teórico.

(este coeficiente é válido para superfícies lisas)

Desde que a difusão de superfície é um fenômeno de superfície, a redução da área normal a direção de fluxo devido a presença da fase sólida não tem papel na difusividade efetiva da superfície, que leva em conta basicamente a rugosidade da parede do meio poroso:

$$D_{s,eff} = \frac{1}{\tau_g} D_s = D_{0,eff} \exp(-0,974 \times 10^{-3} \times (H_{ads}/(T+273,15))) \quad (\text{A3.7})$$

A taxa de difusão de vapor devido a difusão Knudsen é dada por:

$$m_K = \pi r^2 \left(-D_K \rho \frac{m_1}{z} \right) \quad (\text{A3.8})$$

A taxa de difusão na superfície, por sua vez, é dada por:

$$m_s = 2\pi r \left(-D_s \frac{C_s}{z} \right) \quad (\text{A3.9})$$

Como a concentração de superfície, C_s , está relacionada ao teor de umidade no gel, X , e a área de superfície específica, a , através da equação $C_s = X/a$, a razão das taxas de difusão Knudsen e de superfície é:

$$\frac{m_K}{m_s} = \frac{r D_K}{2 D_s} a \rho \frac{m_1}{X} \quad (\text{A3.10})$$

Assumindo-se que as taxas de adsorção e dessorção das moléculas são grandes comparadas com as taxas de migração da superfície, a superfície C_s , e as concentrações dos poros, m_1 , estarão quase em equilíbrio, e conseqüentemente, estarão relacionadas pela isoterma de adsorção de equilíbrio, ou: $m_1 = g(X, T, P)$

A razão das taxas podem ser calculadas sabendo-se as propriedades do gel. A tabela A3.2 contem as propriedades para as sílicas de densidade regular e intermediária e mostra os resultados dos cálculos das razões das taxas. Vê-se que a difusão de superfície domina nos poros da sílica com densidade regular, enquanto ambos os mecanismos são importantes para gel de densidade intermediária.

Tabela A3.2- Comparação entre as taxas de difusão de superfície e Knudsen para poro de sílica gel a 30 °C e 1atm

	Densidade regular	Densidade intermediária
relação de equilíbrio	A11	A12
calor de adsorção	equação 43	equação 44
difusividade de superfície	equação A3.7	equação A3.7
difusividade Knudsen	equação A3.2	equação A3.2
ρ_p	1129 kg/m ³	620 kg/m ³
$\tau_s = \tau_g$	2,8	2,0
Área da superfície do poro	$S_g = 7,8 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$	$S_g = 3,4 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$
raio médio do poro	$a = 11 \text{ \AA}$	$a = 68 \text{ \AA}$
faixa de teor de umidade X	0,01 - 0,3 kg/kg	0,005 - 0,15 kg/kg
razão taxa difusão. Knudsen e superfície	0,023 - 0,060	0,6 - 2,0

$$UR = 0,0078 - 0,05759X + 24,1655X^2 - 124,478X^3 + 204,226X^4 \quad (\text{A3.11})$$

$$\begin{array}{l} | UR = 1,235X + 267,99X^2 - 3170,7X^3 + 1'0087,16X^4 \quad X \leq 0,07 \\ | \\ | UR = 0.3316 + 3,18X \quad X > 0,07 \end{array} \quad (\text{A3.12})$$

$$\begin{array}{l} | Hads = -12400X + 3500 \quad X \leq 0,05 \\ | \\ | Hads = -1400X + 2950 \quad X > 0,05 \end{array} \quad (\text{A3.13})$$

$$\begin{array}{l} | Hads = -300X + 2095 \quad X \leq 0,15 \\ | \\ | Hads = 2050 \quad X > 0,15 \end{array} \quad (\text{A3.14})$$

8- BIBLIOGRAFIA

- ALLERTON, J., BROWNELL, L.E., KATZ, D.L., Through-drying of porous media, *Chemical Engineering Progress*, v45 n10 Oct 1949
- ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, Nova York, NY, 1982
- ASME, Fluid meters. Their theory and application, ASME NY 1959
- CAIMCROSS, R.A. et al, Pore evolution and solvent transport during drying of gelled sol-gel coatings: Predicting 'springback', *Drying Technology*, v15 n6-8 1997
- CHEN, P., SCHMIDT, P.S., A model for drying of flow-through beds of granular products with dielectric heating , in *Transport Phenomena in Materials Processing - 1990*, ASME, Heat Transfer Division, v146
- DAVIS et al, Pore structure evolution in silica gel during aging/drying I. Temporal and thermal aging, *Journal of Non-Crystalline Solids*, v142 1992
- DAVIS et al., Pore structure evolution in silica gel during aging/drying. II. Effect of pore fluid, *Journal of Non-Crystalline Solids*, v142 1992
- DAVIS et al, Pore structure evolution in silica gel during aging/drying. IV. Varying pore fluid pH., *Journal of Non-Crystalline Solids*, v167 1994
- DELMÉE, G.J., *Manual de Medição de Vazão*, São Paulo, SP, Edgard Blücher, 1983
- DESHPANDE et al, Pore structure evolution in silica gel during aging/drying. III. Effect of surface tension, *Journal of Non-Crystalline Solids*, v144 1992
- DULLIEN, F.A.L., *Porous media. Fluid transport and pore structure*, New York, NY, Academic Press, 1979
- HOWARD, J.R., Fluidized bed technology. Principles and applications, New York, Adam Hilger, 1989
- INCROPERA, F.P., de WITT, D.P., *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1992
- KIRANOUDIS, C.T. et al, Drying Kinetics of onion and green pepper, *Drying Technology*, v10 n4 1992

- LANGRISH, T.A.G. *et al*, Drying kinetics of particles from thin layer drying experiments, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v69A Sept 1991
- MARSHALL Jr, W.R., HOUGEN, O. A., Drying of solids by through circulation, *American Institute of Chemical Engineers*, 1942
- PESARAN, A.A., MILLS, A.F., Moisture transport in silica gel packed beds - I. Theoretical study, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v30 n6 1987
- PESARAN, A.A., MILLS, A.F., Moisture transport in silica gel packed beds - I. Experimental study, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v30 n6 1987
- PIKON, J., Drying of granular materials at forced flow of drying agent through the bed, in Mujumdar, A.S., *Drying '84*, 1984
- POLAT, O. *et al*, Transport phenomena analysis of through drying paper, *Ind. Eng. Chem. Res.*, v31 n3 1992
- POLAT, O. *et al*, Experimental study of through drying of paper, in Mujumdar, A.S., *Drying '87*, 1987
- RAJAN, T.S., IBRAHIN, S.H., On drying of materials in through circulation system, in Mujumdar, A.S., *Drying '84*, 1984
- RATTI, C., Shrinkage during drying of foodstuffs, *Journal of Food Engineering*, v23 1994
- RATTI, C., MUJUMDAR, A.S., Fixed-bed batch drying of shrinking particles with time varying drying air conditions, *Drying Technology*, v11 n6 1993
- SAN, J-Y., JIANG, G-D, Modeling and testing of a silica gel packed-bed system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v37 n8 1994
- SCHERER, G.W. *et al*, Shrinkage of silica gels aged in TEOS, *Journal of Non-Crystalline Solids*, v202 1996
- SIMPKINS, P.G. *et al*, Drying behavior of colloidal silica gels, *Journal of American Ceramic Society*, v72 n10 1989
- SOININEN, M., Through-Drying Theory, *Drying '87*, 1987
- TREYBAL, R.E., Mass-transfer operations, New York, McGraw-Hill, 1980
- WAANANEN, K.M. *et al*, Classification of drying models for porous solids, *Drying Technology*, v11 n1 1993