

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA



OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DAS ESTUFAS DE SECAGEM DE UMA INDÚSTRIA DE CERÂMICA

Hugo Rafael de Oliveira Lacerda

Novembro 2010

Orientador: Simone Barreira Morais



OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DAS ESTUFAS DE SECAGEM DE UMA INDÚSTRIA DE CERÂMICA

Orientador na Fábrica: Henrique Barros

Orientador: Simone Barreira Morais

Co-orientadora: Anabela Maria Fonseca Moura Guedes

Trabalho realizado por:

Hugo Rafael de Oliveira Lacerda

Agradecimentos

Desde já agradeço todo o apoio disponibilizado por parte da Direcção e todos os colaboradores da Fabrica Cerâmica de Valadares, em especial ao **Eng. Henrique Barros** a orientação científica, a disponibilização dos recursos postos à disposição durante a execução prática desta dissertação, o incentivo, a atenção dedicada, a confiança depositada e todo apoio ao longo do trabalho.

Às minhas orientadoras, Engenheira Simone Morais e Engenheira Anabela Guedes, agradeço toda a ajuda dispensada.

Por fim, agradeço aos docentes e todas as pessoas que me acompanharam e apoiaram durante toda a minha vida Isepiana.

Resumo

A gestão de energia é um dos factores chave do sucesso de uma empresa e como qualquer outro factor de produção deve ser gerido continuamente e eficazmente.

A gestão correcta do consumo de energia assume-se como crucial nas empresas do sector cerâmico pois exigem grande consumo de gás natural. Também a tendência de aumento do custo do gás natural tem induzido a necessidade de minimização do consumo de combustível nas indústrias e favorecido o desenvolvimento de novas abordagens para a optimização deste recurso natural.

O trabalho apresentado nesta tese teve como objectivo a optimização da energia nas estufas de secagem na *Fábrica de Cerâmica de Valadares S.A.* A actividade desta empresa consiste na produção de louça sanitária envolvendo um consumo elevado de energia.

Realizou-se um levantamento das condições técnicas/operacionais dos equipamentos em estudo e elaborou-se uma ferramenta de simulação que foi aplicada para realizar um balanço energético detalhado e diagnóstico da situação existente. No seguimento, foi efectuada uma análise de mercado, para elaboração do estudo económico da implementação das medidas sugeridas, nomeadamente, a recuperação dos gases de combustão que saem das três estufas que secam os moldes para as estufas de louça cerâmica. Optou-se por esta medida uma vez que reduzirá significativamente, em cerca de 50%, o consumo de combustível (gás natural) nas estufas de secagem. O tempo de retorno do investimento necessário para adquirir o equipamento é de, aproximadamente, 10 meses.

Palavras-Chave: *Indústria de cerâmica; Energia; Secagem; Moldes.*

Abstract

Power management is one of the key factors of success of a company and, as other production factor, must be managed continuously in an efficient way.

The adequate management of energy consumption is crucial in the ceramic production sector since companies require large consumption of natural gas. Furthermore, the rising cost trend of natural gas has driven the need for minimization of fuel consumption in industries and favored the development of new methodologies for optimization of this natural resource.

The aim of this work was to optimize energy consumption in the drying ovens of *Fábrica de Cerâmica de Valadares S.A.* This company produces sanitary ceramics using plaster and water as raw materials which involve high energy consumption. This study was based on the analysis of the technical and operational conditions of *Fábrica de Cerâmica de Valadares S.A.* ovens. A simulation tool was also developed to perform a detailed energy diagnosis of the situation. The suggested actions to reduce natural gas consumption are related with the recovery and reutilization of the combustion gases (coming out of molds oven) to dry the ceramics. The economical study of implementation of the suggested actions indicated that the payback of the investment is ca. 10 months. The proposed suggestions will allow to attain 50% of reduction of natural gas consumption.

Keywords: Ceramic Industry; Energy; Drying; Mold.

Índice

1	Introdução	1
1.1	A Fábrica Cerâmica de Valadares.....	1
1.2	Processo de Fabrico da louça sanitária.....	3
1.3	Processo de Fabrico dos moldes	6
1.3.1	O gesso cerâmico	7
1.3.2	Qualidade de um Gesso Cerâmico.....	8
1.4	Secagem.....	10
1.4.1	Considerações gerais.....	10
1.4.2	Secagem das Peças Cerâmicas	13
1.4.3	Secagem dos moldes.....	15
1.5	Enquadramento do trabalho	16
2	Parte Experimental	17
2.1	Estufas de secagem.....	17
2.2	Dimensões das estufas	21
2.3	Programa de secagem dos moldes e das peças cerâmicas	22
3	Análise Energética das estufas.....	24
3.1	Estratégia utilizada na realização dos balanços energéticos.....	24
3.2	Dados recolhidos para os cálculos.....	28
3.3	Simulador elaborado	30
3.4	Balanço de Energia às estufas.....	32
3.4.1	Correntes de entrada da estufa.....	32
3.4.2	Correntes de saída da estufa	35
4	Resultados e Discussão	39
4.1	Perdas de calor nas estufas dos moldes	39
4.2	Balanço Energético às estufas dos moldes	40
4.3	Perdas de calor nas estufas das peças cerâmicas	41
4.4	Balanço Energético às estufas das peças cerâmicas	42

5	Optimização energética das estufas	44
6	Análise Económica	48
7	Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	50
8	Referências	51
	Anexos	A1
	Anexo A – Evolução da Temperatura e Humidade relativa fornecido pelo fabricante da estufa	A2
	Anexo B – Características do anemómetro utilizado para as medições da velocidade do ar	A3
	Anexo C – Características do Termo-Higrómetro e do Termómetro utilizado para as medições da Temperatura e humidade	A4
	Anexo D– Ficha de dados de segurança do combustível (gás natural) [2].....	A5
	Anexo E – Capacidades Caloríficas	A8
	Anexo F – Recolha dos dados para a medição do caudal de exaustão (Setembro de 2010)	A9
	Anexo G - Carta psicrométrica de baixas Temperaturas	A10
	Anexo H – Diagrama do processo de instalação optimizado	A11
	Anexo I- Exemplo de cálculo	A12
	Anexo J - Perdas de calor pelas superfícies da estufa	A20
	Anexo K – Propriedades físicas do ar à pressão de 101,325KPa [10].....	A22

Índice de Figuras

Figura 1 – Fábrica de Cerâmica de Valadares.....	1
Figura 2 – Processo de fabrico de louça sanitária	4
Figura 3 – Fluxograma do processo de produção de louça sanitária.	5
Figura 4 - Fases da secagem de uma argila [2] - CENTRAL DA CERÂMICA.....	14
Figura 5 - Madres com moldes no seu interior.....	15
Figura 6 – Estufa 1: a) vazia; b) carregada com moldes e pronta para a secagem.....	17
Figura 7 – Representação da estufa 1	18
Figura 8 – Ventilador.....	19
Figura 9 – Distribuidor	19
Figura 10 - Condução do ar de exaustão.....	19
Figura 11 - Moldes secos armazenados.	19
Figura 12 – Planta das estufas de secagem dos moldes e peças sanitárias.....	20
Figura 13 – Evolução da temperatura e da humidade no ciclo de secagem das peças cerâmicas.....	23
Figura 14 – Representação das correntes de entrada e de saída das estufas dos moldes e das peças cerâmicas.....	24
Figura 15 a) - Fracção da folha de cálculo do balanço energético da estufa 1 e 4.....	30
Figura 15 b) - Fracção da folha de cálculo com a optimização energética das estufas de secagem de peças	31
Figura 16 - Perdas de calor pelas superfícies da estufa 1.	39
Figura 17 – Perdas de calor pelas superfícies da estufa 4.....	41
Figura 18 – Diagrama do processo de secagem optimizado.....	45
Figura 19 - Valores das poupanças resultantes da implementação do recuperador de calor nas estufas das peças cerâmicas.....	47
Figura A 1 - Evolução de Temperatura e Humidade relativa do processo de secagem das estufas.....	A2
Figura E 1 – Valores das constantes empíricas utilizadas para o cálculo das capacidades caloríficas do ar, dos gases de combustão e da H_2O	A8
Figura F 1 – Dados da medição do caudal de exaustão.....	A9
Figura G 1 - Carta psicrométrica de baixas temperaturas.....	A10
Figura H 1 – Fluxograma do processo de instalação optimizado.....	A11
Figura J 1 - Evolução da temperatura das paredes do lado direito, esquerdo, do tecto, atrás, do chão á frente ao longo do comprimento da estufa 1.....	A21

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características do Gresanit.....	3
Tabela 2 – Dimensões da estufa 1.....	21
Tabela 3 – Representação e constituição dos componentes da estufa 1.....	21
Tabela 4 – Leituras da temperatura e da humidade relativa durante o ciclo de secagem dos moldes.....	22
Tabela 5 – Moldes seleccionados para a caracterização energética do processo de secagem da estufa 1	25
Tabela 6 – Valores usados para calcular a energia eléctrica consumida pela estufa	25
Tabela 7 – Consumo de gás natural durante um ciclo de secagem dos moldes	26
Tabela 8 – Valores experimentais da velocidade do ar dentro da estufa 1	26
Tabela 9 - Registo das temperaturas interior e exterior ao longo da estufa 1.....	27
Tabela 10 - Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados.....	28
Tabela 11 - Valores utilizados no balanço energético das estufas.....	29
Tabela 12 – Dados relativos á secagem das peças de louça na estufa 4.....	29
Tabela 13 - Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético realizado à estufa 1.....	40
Tabela 14 - Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético realizado na estufa 4.....	42
Tabela 15 – Custo do ciclo de secagem, energia de queima e do consumo específico da estufa das peças antes e depois da optimização do processo.....	46
Tabela 16 – Poupança de gás natural devido á recuperação de energia dissipada	48
Tabela B 1 – Características do anemómetro digital.....	A3
Tabela C 1 - Características do Termo-Higrómetro.....	A4
Tabela C 2 – Características do Termómetro laser	A4
Tabela D 1 – Dados sobre a composição do gás natural	A5
Tabela D 2 - Principais Características Físicas do Gás Natural	A5
Tabela D 3 - Registo dos valores da combustão estequiométrica do gás natural.....	A6
Tabela D 4 - Composição em massa e volume dos gases húmidos, para cada valor de excesso de ar.....	A7
Tabela J 1 - Valores calculados do coeficiente global de transferência de calor por convecção e radiação da estufa 1.....	A20
Tabela J 2 - Registo do calor perdido pelas superfícies da estufa.....	A21
Tabela K 1 – Propriedades físicas do ar.....	A22

Lista de abreviaturas, siglas, símbolos

Nomenclatura	Descrição	Unidades
A	Área da estufa	m^2
A_{ext}	Área exterior	m^2
A_{pd}	Área da parede direita da estufa	m^2
C	Factor geométrico	
$\cos \alpha$	Factor potência	
$C_{p_{ar\ comb}}$	Capacidade calorífica do ar de combustão	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
$C_{p_{ar\ exaustão}}$	Capacidade calorífica do ar de exaustão	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
$C_{p_{gases\ comb}}$	Capacidade calorífica do ar de combustão	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
$C_{p_{gases\ exaustão}}$	Capacidade calorífica dos gases de exaustão	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
$C_{p_{gás\ natural}}$	Capacidade calorífica média do gás natural	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
$C_{p_{H_2O}}$	Capacidade calorífica da água	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
$C_{p_{molde}}$	Capacidade calorífica dos moldes	$\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$
$C_{p_{peças\ cerâmicas}}$	Capacidade calorífica das peças cerâmicas	$\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$
$C_{p_{vap\ H_2O}}$	Capacidade calorífica do vapor de água	$\text{kJ}/(\text{kgK})$
Con_{esp}	Consumo específico de energia da estufa	$\text{MJ}/\text{kg ciclo}$
d	diâmetro	m
EQ	Energia de queima	MJ
$Fluxcaixa_{líquido}$	Fluxo de caixa líquido	€
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
Gr	Número de Grashof	
h_{conv}	Coefficiente de transferência por convecção	$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \text{K})$
h_{rad}	Coefficiente de transferência de calor por radiação	$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \text{K})$
I	Intensidade de corrente	A
$\dot{m}_{ar\ comb}$	Caudal mássico de ar de combustão	kg/ciclo
$(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb})_{est}$	Razão de ar estequiométrico	$\text{kg ar}/\text{kg comb}$
$\dot{m}_{ar\ exaustão}$	Caudal mássico de ar exaustão	kg/ciclo
$\dot{m}_{ar\ ventilado}$	Caudal mássico de ar ventilado	kg/ciclo
$\dot{m}_{ar\ seco}$	Caudal mássico de ar seco	kg/h
$\dot{m}_{gás\ natural}$	Caudal mássico de gás natural	kg/ciclo
$\dot{m}_{gás\ consumido}$	Caudal mássico de gás natural consumido	kg/ciclo
$\dot{m}_{gás\ reduzido}$	Caudal mássico de gás natural reduzido	kg/ciclo

$\dot{m}_{\text{gases comb}}$	Caudal mássico dos gases de combustão	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{gases exaustão}}$	Caudal mássico dos gases de exaustão	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{gases secos}}$	Caudal mássico dos gases secos	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{gases ext}}$	Caudal mássico dos gases estequiométrico	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	Caudal mássico de água	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O evap}}$	Caudal mássico de água evaporada	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O comb}}$	Caudal mássico de água de combustão	kg/ciclo
\dot{m}_{moldes}	Caudal mássico de moldes	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{peças cerâmicas}}$	Caudal de peças cerâmicas	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{moldes secos}}$	Caudal mássico de moldes secos	kg/ciclo
$\dot{m}_{\text{moldes verdes}}$	Caudal mássico de moldes verdes	kg/ciclo
m	Factor geométrico	
M_{ar}	Massa molecular do ar	g/mol
$M_{\text{gás natural}}$	Massa molecular do gás natural	g/mol
Nu	Número de Nusselt	
PCI	Poder calorífico Inferior do gás natural	kJ/kg
P_e	Potência eléctrica	kW
P	Pressão do fluido	atm
$\text{poupança}_{\text{gás natural}}$	Poupança de gás natural	€/ciclo
$P_{\text{máx}}$	Pressão máxima	bar
P_{mont}	Pressão montante	atm
Pr	Número de Prandtl	
Q	Caudal térmico perdido	kJ/ciclo
$Q_{\text{ar comb}}$	Caudal térmico do ar de combustão	kJ/ciclo
$Q_{\text{ar exaustão}}$	Caudal térmico do ar de exaustão	kJ/ciclo
$Q_{\text{ar ventilado}}$	Caudal térmico do ar ventilado	kJ/ciclo
Q_e	Caudal térmico da energia eléctrica	kJ/ciclo
$Q_{\text{gases comb}}$	Caudal térmico associado aos gases de combustão	kJ/ciclo
$Q_{\text{gases exaustão}}$	Caudal térmico associado aos gases de exaustão	kJ/ciclo
$Q_{\text{gás natural}}$	Caudal térmico do gás natural	kJ/ciclo
$Q_{\text{H}_2\text{O evap}}$	Caudal térmico de água evaporada	kJ/ciclo
$Q_{\text{máx}}$	Caudal volumétrico máximo no queimador	m ³ /h
Q_{molde}	Caudal térmico associado aos moldes	kJ/ciclo
Q_{min}	Caudal volumétrico mínimo no queimador	m ³ /h
$Q_{\text{peças cerâmicas}}$	Caudal térmico associado às peças cerâmicas	kJ/ciclo

Q_{perdas}	Caudal térmico associado às paredes da estufa	KJ/ciclo
K	Condutividade térmica do fluido	W/(m ^o K)
R	Constante dos gases perfeitos	m ³ .atm/(K kmol)
Re	Número de Reynolds	
R_{eq}	Resistência térmica total equivalente	h K/kJ
R_{conv}	Resistência térmica por convec�o	h K/kJ
R_{rad}	Resistência térmica por radia�o	h K/kJ
t	Unidade de tempo	s
t_{ciclo}	tempo de ciclo	h
t_{retorno}	Tempo de retorno do investimento	meses
T_{amb}	Temperatura ambiente	�C
T_{ar}	Temperatura do ar nos gases de combustão	�C
$T_{\text{ar comb}}$	Temperatura do ar de combustão	�C
$T_{\text{ar ventilado}}$	Temperatura do ar ventilado	�C
T_{arq}	Temperatura do ar quente	�C
T_{ext}	Temperatura exterior da parede da estufa	�C
$T_{\text{exaustão}}$	Temperatura de exaustão ponderada	�C
$T_{\text{gases comb}}$	Temperatura dos gases de combustão	�C
$T_{\text{gases exaustão}}$	Temperatura dos gases de exaustão	�C
$T_{\text{gás natural}}$	Temperatura do gás natural	�C
T_{int}	Temperatura interior da parede da estufa	�C
T_{m}	Temperatura média	�C
T_{moldes}	Temperatura dos moldes	�C
T_{r}	Temperatura de referência	�C
T_{parede}	Temperatura da parede	�C
T_{parede}	Temperatura da parede exterior	�C
$T_{\text{pd med}}$	Temperatura média da parede direita da estufa	�C
$T_{\text{peças cerâmicas}}$	Temperatura das peças cerâmicas	�C
$T_{\text{vap H2O}}$	Temperatura da água em vapor	�C
TIR	Taxa interna de rentabilidade	%
U_{global}	Coefficiente global de transferência de calor	KJ/(h.m ² K)
v	Velocidade	m/s
Volt	Voltagem	V
VAL	Valor actual líquido	�
W_{ar}	Humidade do ar na estufa	kg _{vaporH2O} /kg _{ar}
$W_{\text{ar comb}}$	Humidade do ar de combustão na estufa	kg _{vaporH2O} /kg _{ar}

$W_{\text{ar exaustão}}$	Humidade dos ar de exaustão na estufa	$\text{kg}_{\text{vaporH}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar}}$
$W_{\text{gases exaustão}}$	Humidade dos gases de exaustão na estufa	$\text{kg}_{\text{vaporH}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar}}$
$W_{\text{ar ventilado}}$	Humidade do ar ventilado	$\text{kg}_{\text{vaporH}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar}}$
$W_{\text{gases comb}}$	Humidade dos gases de combustão da estufa	$\text{kg}_{\text{vaporH}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar}}$
$\lambda_{\text{vap H}_2\text{O}}$	Calor latente de vaporização da água	kJ/kg
ρ_f	Massa volúmica do fluido	kg/m^3
Δm	Varição da massa dos moldes durante a secagem	kg
ΔP	Diferencial de pressão	atm
ΔT	Diferença de temperatura entre o fluido e a parede	$^{\circ}\text{C}$
μ	Viscosidade cinemática do fluido	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ε	Emissividade	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
β	Coefficiente de dilatação volumétrica do fluido	$^{\circ}\text{C}^{-1}$

1 Introdução

1.1 A Fábrica Cerâmica de Valadares

A Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A. (FCV), é uma unidade industrial de produção cerâmica, situada na vila de Valadares, no concelho de Vila Nova de Gaia. A fábrica situa-se junto da actual linha de caminho-de-ferro de Valadares, estando a ocupar uma superfície total de 176.000 m², sendo 72.000 m² de construção, e emprega actualmente cerca de 500 funcionários (figura 1) [1].



Figura 1 – Fábrica de Cerâmica de Valadares

A FCV tornou-se numa das principais unidades fabris da cintura industrial da zona oriental do Porto, e o seu sucesso foi tal que conduziu ao aumento vertiginoso da população de Valadares. Iniciou a sua actividade com o fabrico de tijolo e telha, passando mais tarde a fabricar peças de grés cerâmico, louça decorativa, azulejos, mosaico, louça sanitária e acessórios cerâmicos para quartos de banho.

Desde a década de 90 que, a FCV centrou a sua actividade na concepção e produção de artigos sanitários de elevada qualidade, apostando na inovação e experiência tecnológica em cerâmica, para atingir uma postura de liderança no mercado [1].

Quanto aos materiais cerâmicos, dado o crescente interesse do mercado por produtos inovadores, diferentes e de alguma forma associados a práticas "verdes" (em especial no caso do Norte da Europa para onde a FCV exporta), a FCV decidiu investir parte do seu conhecimento e experiência no desenvolvimento de produtos de *design* em grés.

Desta forma surgiu uma nova Pasta, a Gresanit, com características únicas do ponto de vista da qualidade e fiabilidade que permite abrir novos mercados e fundamentalmente disponibilizar uma alternativa simultaneamente segura do ponto de vista de utilização do produto e com o tão procurado *design* [1].

A FCV disputa a liderança do mercado nacional, bem como exporta mais de 60% das peças produzidas para os mais diversos países do mundo. As actuais exportações da FCV estendem-se a todo mundo (com excepção do continente americano atendendo às cotas de ligação de produto), sendo a Europa o destino privilegiado dos seus produtos. A FCV tem, no entanto, aberto novos mercados, no leste europeu, Dubai, Arábia Saudita, Austrália e Coreia entre outros.

Na louça sanitária, além dos 15 conjuntos disponíveis, a oferta estende-se a 33 tipos diferentes de lavatórios de embutir/encastrar/pousar e, ainda, às diferentes peças “técnicas”, tais como, urinóis, pias hospitalares, louça sanitária para deficientes, bacias turcas, bases de chuveiro, etc. Nos últimos anos, e de modo a ir ao encontro das solicitações dos clientes, são comercializados, também, produtos que não sendo de fabrico próprio, têm a marca, controlo e garantia “Valadares”, tais como, torneiras, banheiras acrílicas sem e com hidromassagem (sendo estas últimas instaladas e testadas nas instalações da empresa), banheiras de chapa esmaltada, bases de chuveiro acrílicas, de chapa esmaltada e grés cerâmico, resguardos de chuveiro e lava-roupas de grés cerâmico, torneiras, etc. [1].

As questões ambientais estão presentes em todas as áreas da empresa e são tidas em atenção em todos os novos projectos quer ao nível da investigação e desenvolvimento quer na implementação das melhores práticas. Assim e para além das questões intrínsecas do produto, as práticas ambientais estão em constante desenvolvimento e ajuste, designadamente: a reincorporação dos resíduos no processo produtivo; a diminuição dos impactes ambientais gerados e a promoção de uma produção cada vez mais limpa, mais eficiente e eficaz [1].

1.2 Processo de Fabrico da louça sanitária

O trabalho desenvolvido nesta tese relaciona-se com a cerâmica branca, nomeadamente com a louça sanitária que é o produto final da empresa. A louça sanitária é produzida principalmente com um dos seguintes três materiais:

- ✓ porcelana sanitária (*Vitreous china*);
- ✓ grés (*Fire clay*);
- ✓ grês fino (*Fine fire clay*).

O grés é um material feito a partir de argila de grão fino, plástica, sedimentária e refractária, que suporta altas temperaturas, como a cerâmica. O grés vitrifica entre 1150 °C e 1300 °C, sendo que neste intervalo de temperaturas o feldspato actua como material fundente. As argilas utilizadas na composição do grês não são tão brancas ou puras quanto as de porcelana o que possibilita uma gama de cores. Após a queima tornam-se impermeáveis. A sua resistência mecânica e química é baixa, limitando a sua utilização.

O grés fino é uma mistura de grés ou caulino, chamote, argilas magras, quartzo e material sinterizado que é processada para formar o corpo para aplicação. É particularmente adequado para produtos tais como bacias, onde as características deste material são importantes para conseguir uma base plana, mantendo o acabamento associado com louças sanitárias.

A FCV criou recentemente um outro material, o Gresanit®, cujas características o colocam entre a porcelana sanitária e o grés fino.

Em todos os testes efectuados, o novo material Gresanit, demonstrou ter uma elevada qualidade e ser adequado ao fabrico de artigos sanitários (tabela1). Pelo facto de ser utilizado o mesmo vidro em ambas as pastas cerâmicas (Gresanit e *Vitreous China*), assegura-se um compromisso entre o vidro e a pasta que permite que a maioria dos defeitos seja prevenida. Após vários estudos, concluiu-se que o Gresanit® é adequado para o fabrico de artigos sanitários de grandes dimensões [1].

Tabela 1 - Características do Gresanit.

Absorção de água	Inferior a 5%
Módulo de ruptura	Superior a 500 kgf/cm ²
Resistência à fendilhagem	Superior a 20 anos
Comportamento ao ataque químico	Resistente

Cada um dos distintos tipos de materiais referidos anteriormente pode ser elaborados em variadas formas e tamanhos. Os tipos de louça sanitária mais produzidos nesta indústria são, entre outros, bacias, lavatórios, bidés, bases de chuveiro e os tanques.

A Cerâmica de Valadares desenvolve e produz integralmente os seus artigos, não recorrendo a servidores terceiros ou a subcontratação de qualquer processo fabril, pelo que o seu *layout* fabril é extenso e complexo [6].

O processo de fabrico de Sanitário encontra-se esquematizado nas figuras 2 e 3.

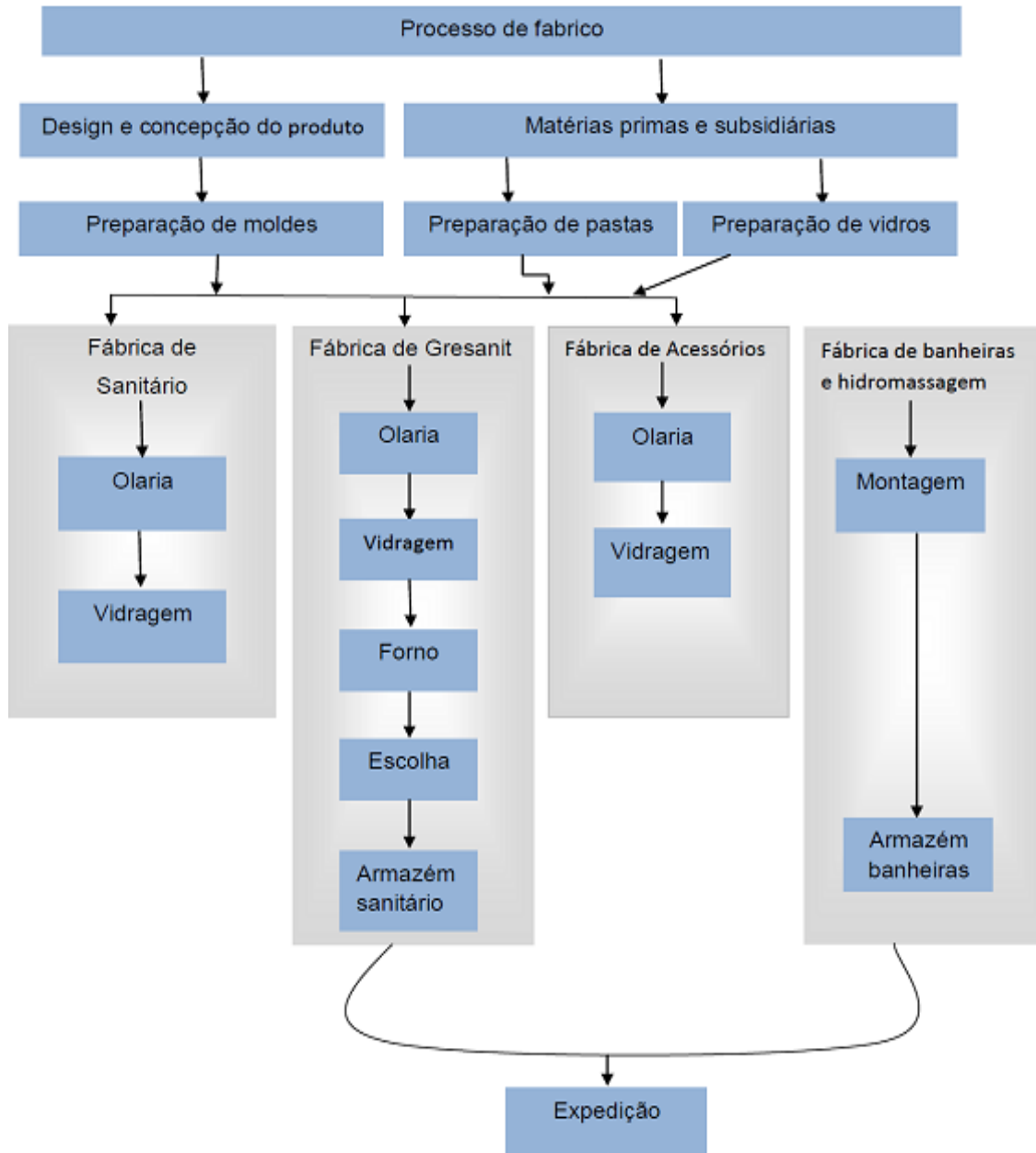


Figura 2 – Processo de fabrico de louça sanitária.

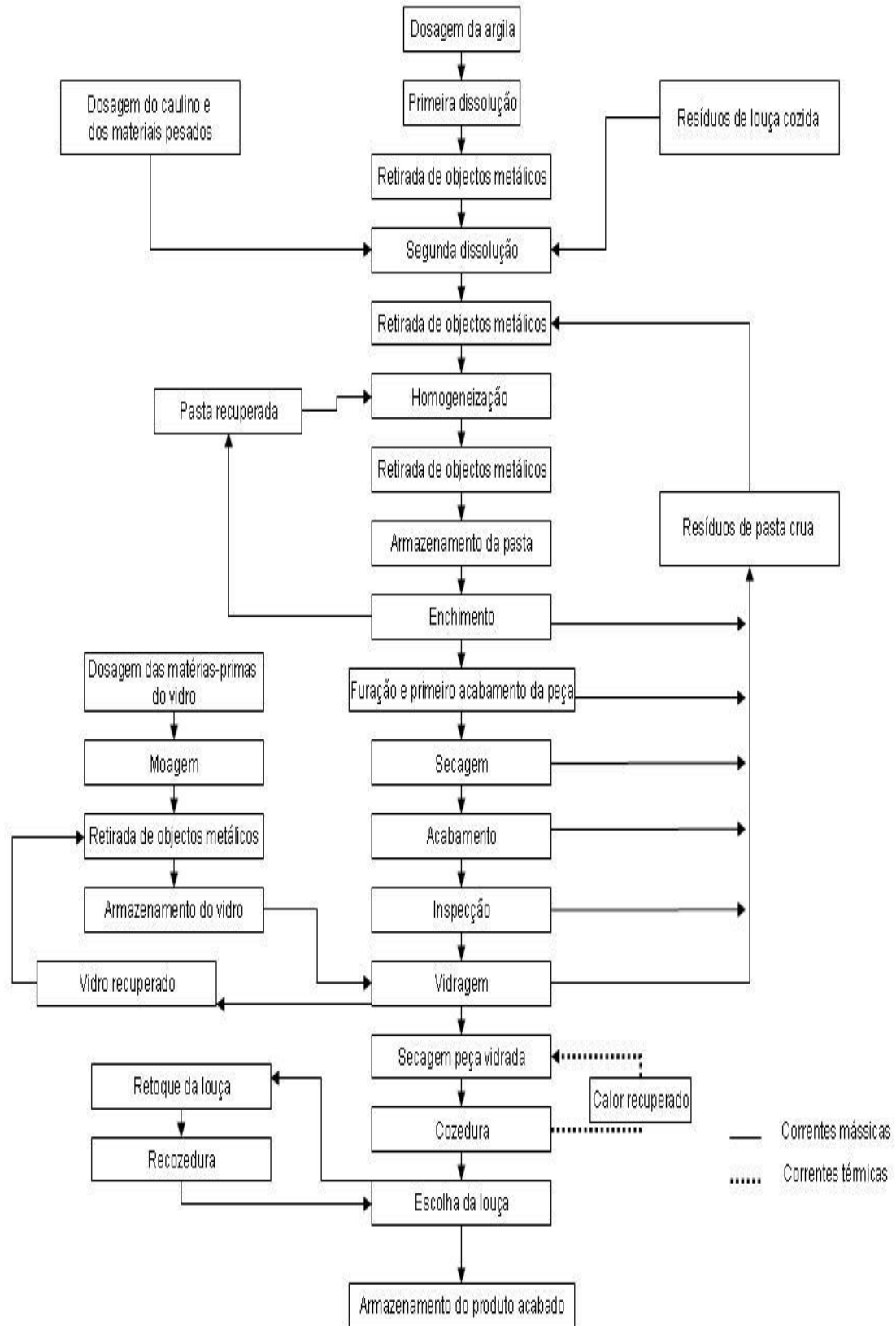


Figura 3 – Fluxograma do processo de produção de louça sanitária.

1.3 Processo de Fabrico dos moldes

O Gesso Cerâmico é a principal matéria-prima no fabrico de modelos, moldes e madres devido à boa capacidade de absorção de água; à sua capacidade de transmitir às peças finos pormenores; à existência de uma superfície durável e, conseqüentemente, à reprodutibilidade das propriedades físicas; ao baixo custo e fácil manuseamento.

O Gesso Cerâmico é um produto de cor branco ou bege claro, produzido a partir do mineral de gesso natural [6].

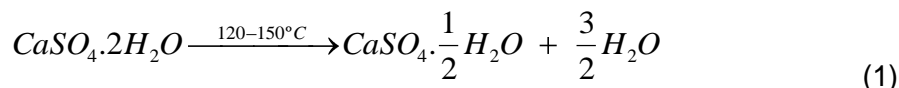
Algumas das actuais utilizações do gesso no quotidiano são:

- Fabrico de moldes para a indústria da cerâmica;
- Construção civil – Rebocos interiores, blocos par divisórias, placas para tectos falsos, isolamento térmico e acústico, agentes niveladores para pisos, incorporação nos cimentos;
- Indústria química – Fabrico de sulfureto de cálcio, enxofre, ácido sulfúrico, sulfato de amónio;
- Indústria do vidro;
- Medicina Dentária e ortopédica;
- Carga ou enchimento em diversas indústrias – Tintas, insecticida em pó, fabrico de certos tecidos [6].

1.3.1 O gesso cerâmico

Os gessos semi-hidratados resultam da 1ª etapa de processo de desidratação do gesso natural. Teoricamente o produto obtido tem a fórmula química $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$. Contudo na prática, o seu teor de água combinada pode variar entre 0,15 e 0,66 [5].

A reacção química que descreve este processo é a seguinte:



Existem dois tipos de gessos semi-hidratados: α e β . Estes diferem entre si no estado de cristalização, determinado pelas condições de calcinação.

- Calcinação por via húmida: obtenção de gesso semi-hidratado α

Neste caso a desidratação do gesso natural é feita em autoclaves, a pressões de vapor superiores a 1 bar (podendo ir até 10 bar), sendo a formação do gesso semi-hidrato regida por um mecanismo de "dissolução-recristalização" em meio líquido. Obtêm-se cristais alongados, de forma aproximadamente paralelepípedica, com uma superfície bastante lisa e cristalina [6].

- Calcinação por via seca: obtenção de gesso semi-hidratado β

A desidratação dá-se a uma pressão próxima da pressão atmosférica e a água é eliminada no estado de vapor seco. Obtêm-se cristais opacos, de forma irregular e com uma superfície microporosa, devido à libertação rápida e brusca das moléculas de água.

Do ponto de vista prático, o gesso semi-hidratado α necessita de menos água para ser re-hidratado que o gesso semi-hidratado β ou, é possível afirmar que, para a mesma fluidez, o gesso semi-hidratado α permite preparar caldas com uma relação gesso/água muito superior às do gesso semi-hidratado β [6].

1.3.2 Qualidade de um Gesso Cerâmico

Quando uma empresa necessita de seleccionar um tipo de gesso cerâmico, tem normalmente uma grande variedade de escolha. A relação preço/qualidade será determinante.

➤ Relação gesso/água

Esta relação terá de ser adequada ao fim a que se destinam os moldes. Por ordem crescente do processo de fabrico existem: o enchimento, o *roller* ou *jaule* e a prensa. A proporção dos semi-hidratados α e β que entram na sua composição é recomendada pelo fabricante.

➤ Fluidez

Este parâmetro está directamente relacionado com a relação gesso/água. Para dois gessos diferentes com a mesma relação gesso/água, normalmente prefere-se o de melhor fluidez, dentro de determinados limites:

* *Molde de Enchimento* – se for demasiado fluido pode originar problemas de bolhas de ar na calda, com conseqüente diminuição da resistência mecânica e aumento do trabalho de acabamento das peças.

* *Moldes de Roller* – é necessário estabelecer um compromisso entre fluidez e sedimentação, pois o gesso para estes moldes deve apresentar semi-hidratados α e β .

➤ Tempos de presa

Os gessos utilizados na indústria cerâmica devem permanecer fluidos durante um tempo suficientemente longo para permitir o seu vazamento nas madres, mas depois devem endurecer rapidamente, a fim de evitar a passagem excessiva de água para as madres e não afectar o rendimento da secção de fabricação de moldes [5].

➤ Resistências mecânicas

Nos moldes de gesso cerâmico há a considerar 4 tipos de resistência que são importantes para o seu desempenho na produção de peças: a resistência á flexão, compressão, dureza superficial e abrasão. Os seus valores são máximos depois da hidratação estar completa. [6].

Os factores que influenciam os valores das resistências mecânicas do gesso endurecido são: a pureza do gesso (matéria reactiva) e a relação gesso/água (porosidade).

É muito importante estabelecer um compromisso entre porosidade e resistência mecânica, pois são ambas propriedades fundamentais no desempenho dos moldes, mas que variam de forma antagónica. O ideal seria elevada porosidade com elevada resistência mecânica, sendo que a porosidade tem relação directa com a quantidade de água adicionada e evaporada durante a secagem.

1.4 Secagem

1.4.1 Considerações gerais

A humidade de um sólido (X), é definida como sendo a razão entre a massa de líquido pela massa de sólido seco. Num sólido húmido existem dois tipos de humidade:

- A *humidade superficial* que se comporta como um líquido puro, exercendo para cada temperatura, uma pressão de vapor igual á deste e não sendo influenciado pela presença de sólido.
- A *humidade interior* que se comporta como um componente de uma mistura, sendo afectada pelas interacções com o sólido e exercendo uma pressão de vapor inferior á do líquido puro, á mesma temperatura.

A humidade que o sólido possui quando é atingido o ponto de saturação designa-se por *humidade de equilíbrio* (X_e) e depende das condições da temperatura e do gás em que foi atingida. Fixando a temperatura e a velocidade do gás de secagem, e realizando-se a secagem para diversos valores de humidade do sólido, obter-se-á vários valores de X_e .

Define-se *humidade crítica* (X_c) como sendo a humidade contida pelo sólido no momento em que sua superfície deixa de estar completamente molhada.

A secagem consiste na remoção de água ou outros líquidos voláteis de uma mistura que contem um produto sólido. A maior parte dos materiais sólidos necessitam de uma secagem nalguma das fases da sua produção.

O controlo do processo de secagem do gesso após a adição da água é uma das etapas mais importantes para que se possam produzir componentes de gesso que mantenham todas as suas características, por um período máximo de tempo.

Para prolongar o tempo de vida útil do gesso, deve-se de ter-se em atenção que quanto maior for o corpo em gesso, maior será o tempo necessário para a sua secagem. Por outro lado com a libertação da água, durante a secagem o corpo de gesso pode empenar se não estiver bem apoiado em superfícies planas que possibilitem, tanto quanto possível, a livre circulação de ar.

Durante a secagem, o corpo do gesso pode ser submetido até cerca de 45°C, não devendo esta temperatura ser ultrapassada sob o risco de desidratar o gesso. O local de secagem do gesso deve ter um sistema de ventilação que possibilite a secagem uniforme de toda a sua superfície para que fique, depois de seco, com a mesma resistência mecânica e grau de porosidade em toda a sua superfície.

A secagem é um processo intensivo relativamente ao uso de energia. A remoção da água por secagem térmica é mais cara do que por técnicas de separação mecânica, mas claramente mais eficiente [5].

Existem dois tipos de fenómenos de transferência que dominam a operação de secagem:

- A transferência de calor, já que é necessário fornecer calor ao sólido para fazer evaporar o líquido nele contido.
- A transferência de massa que consiste no movimento do líquido no interior do sólido, na sua vaporização e passagem para o exterior.

Estes dois fenómenos ocorrem em sentidos opostos, quando o calor é fornecido por convecção ou por radiação, e no mesmo sentido quando é transmitido por condução [5].

➤ **Velocidade de secagem**

A velocidade de secagem (R), é definida como a massa de líquido evaporada por unidade de tempo e por unidade de área do sólido exposto à secagem. É representada matematicamente pela equação (2):

$$R = -\frac{m}{A} \times \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

Em que:

X – humidade do sólido a cada instante t

t - Tempo

m – massa de sólido seco dentro da câmara de secagem

A – área do sólido exposta à secagem

Os factores que afectam a velocidade de secagem relacionam-se com três aspectos fundamentais:

- Quantidade de calor cedida por unidade de tempo à zona de secagem

- Quanto maior for a diferença de temperaturas entre a fonte de aquecimento e o sólido, maior será a transferência de calor e consequentemente a velocidade de secagem;
- Quanto maior for a velocidade do gás de secagem, maior é o coeficiente de transferência de calor. Além disso, a transferência de calor é mais eficaz nos casos em que o gás de secagem atravessa o sólido do que quando o fluxo do gás é paralelo à superfície do material;
- Se a transferência de calor se der por condução, obter-se-á um maior aquecimento do sólido e evaporação do líquido, do que no caso de aquecimento por convecção [5].

- Movimento da humidade no sólido e no gás

- *Humidade do gás*: para uma dada temperatura, quanto menor for esta humidade maior será a rapidez de difusão do vapor no gás e consequentemente a velocidade de secagem;
- *Estrutura do sólido*: num sólido poroso ou granular a humidade movimenta-se com maior facilidade do que num sólido fibroso ou gelatinoso, permitindo manter por mais tempo a superfície do sólido húmido, pelo que a velocidade de secagem média será superior;
- *Espessura do sólido*: quanto menor for a espessura mais fácil será trazer o líquido à superfície do sólido húmido, pelo que a velocidade de secagem média será maior;
- *Dimensões das partículas nos sólidos*: quanto menores forem estas dimensões, mais depressa a humidade atinge a superfície do sólido húmido, pelo que a velocidade de secagem média será maior;
- *Velocidade do gás de secagem*: para a generalidade dos materiais, quanto maior for o caudal do gás, mais rapidamente é removido o vapor formado.

- Área por onde ocorre a secagem

- Para uma dada área de secagem, a evaporação será tanto maior quanto mais uniforme for a distribuição do líquido por essa área;
- A dispersão do sólido em partículas aumenta a área de secagem, aumentando assim a velocidade da mesma [5].

1.4.2 Secagem das Peças Cerâmicas

A secagem é uma etapa delicada e complexa no processo de produção de cerâmica. Nesta etapa, é comum ocorrerem defeitos de secagem nas peças que são perceptíveis somente após a queima. A compreensão dos mecanismos envolvidos na secagem permite uma melhor compreensão da causa dos defeitos e da forma de evitá-los.

O objectivo da secagem é a eliminação da água, utilizada na etapa de conformação, necessária para a obtenção de uma massa plástica. Esta fase ocorre por evaporação através do fornecimento de calor, efectuado mediante uma corrente de ar. Sabe-se que quando se mistura uma argila com uma certa quantidade de água, obtém-se uma massa coesa que pode ser moldada com facilidade. Esta propriedade é característica dos minerais argilosos e denomina-se plasticidade. Por sua vez, esta água, denominada de água de conformação, pode ser classificada em água intersticial e em água livre ou água de plasticidade. A água intersticial está relacionada com a água necessária para preencher os poros das partículas. A água de plasticidade localiza-se entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando o processo de conformação. Esta é a responsável pela retracção que as peças de cerâmica sofrem durante a etapa de secagem e é um parâmetro de grande importância tecnológica. Durante a secagem são geradas tensões que podem levar ao aparecimento de defeitos que comprometem a qualidade das peças [2].

Normalmente, quando uma peça cerâmica é conformada usando massas plásticas, quer em torno ou por modelagem, e ainda por fundição, trabalha-se com pastas que, habitualmente, contém entre 25 a 50% de água. Toda a água deverá ser retirada da peça antes da queima, caso contrário, a peça vai rebentar dentro da estufa.

Na secagem, o ar actua como elemento condutor de calor e transportador de vapor de água produzido. Para a água evaporar, ela consome calor para passar do estado líquido para o estado de vapor. Este consumo de energia faz com que a temperatura na superfície do corpo cerâmico diminua. O ar nas proximidades fica saturado de vapor de água, interrompendo-se o processo. Para a secagem continuar é necessário fornecer calor à peça e remover a humidade ao seu redor [2].

Logo após a conformação da peça cerâmica, a água está distribuída quase homogeneamente entre as partículas de argila e os outros componentes da massa cerâmica. A saída da água faz com que as partículas se aproximem, diminuindo o tamanho da peça. Se essa diminuição não for igual poderá provocar trincas ou, em casos extremos, a quebra da peça.

No início da secagem, quando a água está na superfície ou próximo dela, a velocidade de secagem é constante. No momento em que água é eliminada, a velocidade vai diminuindo, pois ela, antes de evaporar, tem que atingir a superfície. Neste ponto, a peça muda de cor, passando do aspecto húmido para o aspecto seco. Portanto até o ponto onde a velocidade de secagem começa a diminuir, há sobre a superfície da peça uma película contínua de água, que funciona como água livre. Abaixo desse ponto, porém, a água encontra-se cada vez mais no interior dos poros de forma que a velocidade de secagem é cada vez menor. Quanto mais espessa for a peça, mais demorado e difícil é o seu processo de secagem. O início de secagem deve ser feito com a peça coberta por plástico, para impedir uma saída muito rápida da água que está mais próxima da superfície, causando uma retracção localizada que pode originar rachas [2].

Na figura 4, são apresentadas as fases de secagem de uma argila húmida numa secção transversal à superfície:

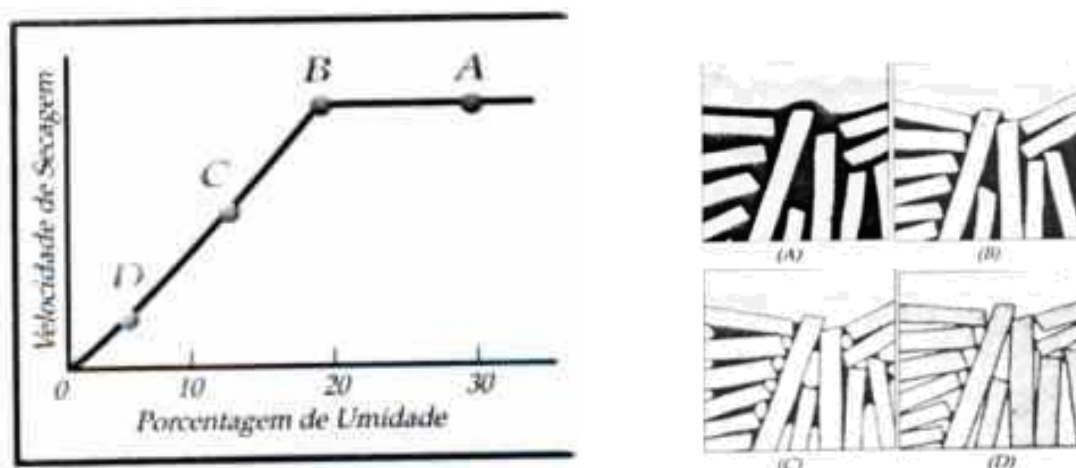


Figura 4 - Fases da secagem de uma argila [2] - CENTRAL DA CERÂMICA

As condições climáticas do local onde é realizada a secagem é de elevada relevância, nomeadamente a temperatura do ambiente, a humidade relativa do ar e a ventilação têm que ser levadas em consideração, obrigatoriamente.

Quanto maior for a peça, mais pesada e mais irregular, maiores serão as possibilidades de acontecerem problemas durante a secagem.

1.4.3 Secagem dos moldes

A secagem dos moldes é uma fase fundamental da produção. Durante esta fase decorre uma boa parte da contracção dimensional, e assim o tempo total de secagem pode ser determinado por pesagem inicial dos moldes e depois controlando o seu peso até este ser constante, ou automaticamente, usando sistemas com programas otimizados e completos. É de salientar que esta fase de produção é a que representa maior consumo de energia (cerca de 25% do total), depois do processo de cozedura. A construção da madre é a etapa conclusiva do desenvolvimento de uma nova série de louça sanitária. Dependendo da complexidade da forma a ser desenvolvida, as madres são constituídas por um número variável de partes de plástico, resina ou borracha. A escolha do material é condicionada por razões técnicas e económicas. Posteriormente, utilizando as madres são produzidos os moldes, é nestes que será feito o enchimento das peças, como podemos observar na figura 5. Durante muitos anos, os moldes de enchimento para a louça sanitária eram feitos exclusivamente de gesso. Foram desenvolvidos moldes de plástico especial e de resina para serem usados à pressão média, e apenas de resina para altas pressões [6].

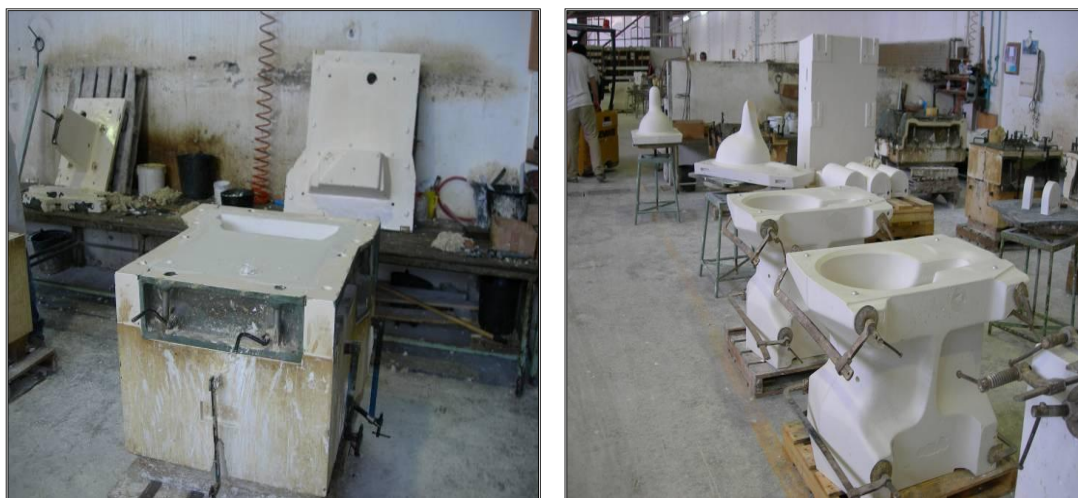


Figura 5 - Madres com moldes no seu interior

Os moldes são transportados com o auxílio de empilhadores para as estufas de secagem de moldes. Estas iniciam o seu ciclo de secagem quando estiverem devidamente preenchidas. É muito importante evitar que os moldes sofram choques térmicos á saídos da estufa, pois isso poderá provocar fissuras na sua estrutura, com conseqüente aumento das quebras. Após a secagem, é ainda aconselhável que estejam pelo menos 2 ou 3 dias em repouso, a fim de homogeneizar a sua temperatura e alguma humidade do ar. Note-se que os moldes trabalham melhor se tiverem cerca de 4 a 5% de humidade na altura de entrada em produção [6].

1.5 Enquadramento do trabalho

A gestão de energia é um dos factores chave do sucesso de uma empresa e como qualquer outro factor de produção deve ser gerido contínua e eficazmente. As empresas optimizam os processos produtivos com o intuito de reduzir o consumo energético.

A gestão correcta do consumo de energia assume-se como crucial nas empresas do sector cerâmico pois exigem grande consumo de gás natural. Também a tendência de aumento do custo do gás natural tem induzido a necessidade de minimização do consumo de combustível nas indústrias e favorecido o desenvolvimento de novas metodologias para a optimização deste recurso natural.

Na FCV, a energia tem um custo significativo nas operações de moagem das matérias-primas, secagem, climatização e no processo de cozedura das peças. Os maiores desenvolvimentos devem ser feitos na melhoria da eficiência energética das estufas, pois estes representam o maior consumo de energia no processo de produção.

A eficiência térmica da estufa é avaliada pela relação entre a energia necessária para secar o material e a energia térmica que é fornecida à estufa. A eficiência energética depende de factores técnicos e processuais que devem ser devidamente estudados e controlados. Estes factores são os seguintes: a massa de moldes utilizada, a taxa de utilização do potencial de secagem da estufa, o controlo do aquecimento e ventilação, a taxa de recuperação de calor e as condições do isolamento térmico;

O estudo sugerido pela empresa consistiu na optimização energética associada ao reaproveitamento do ar de exaustão das estufas dos moldes para as estufas de secagem das peças cerâmicas. Neste âmbito, é proposta a identificação das possibilidades de redução de quebras e fissuras nas peças e moldes, e a avaliação do impacto no desempenho energético da estufa e da respectiva redução de custos de operação.

O diagnóstico energético à FCV, é oportuno tendo em conta que a empresa nunca avaliou os consumos de energia das estufas e identificou possíveis oportunidades de melhoria.

2 Parte Experimental

2.1 Estufas de secagem

Na Fábrica Cerâmica de Valadares existem cinco estufas para secar os moldes e peças cerâmicas, (estufa 1, 2 e 3 para moldes e estufa 4 e 5 para peças cerâmicas).

Verificou-se ainda que as primeiras 3 estufas são utilizadas para secar moldes de gesso com ciclos de secagem de 168 horas, enquanto as restantes duas são utilizadas para secar peças de louça sanitária com ciclos de secagem de 12 horas.

Neste trabalho, apenas foi estudada a estufa 1, uma vez que o funcionamento desta é muito semelhante ao das restantes (figura 6).



Figura 6 – Estufa 1: a) vazia; b) carregada com moldes e pronta para a secagem

As estufas funcionam todas em regime descontínuo; a sua função essencial é secar moldes e seus componentes em gesso para olarias. A estufa é carregada através de uma porta metálica de grandes dimensões que permite a introdução de moldes dispostos em níveis sobrepostos para optimização do volume útil do equipamento. Terminando o ciclo de secagem, os moldes são transportados para as olarias onde continuará o processo de fabrico até ser obtido o produto final.

A secagem decorre com auxílio do sistema de produção de ar quente, através de um queimador a gás natural acoplado a um ventilador centrífugo de insuflação de ar.

Dado que o ar de queima é adicionado ao ar de ventilação, uma relação ar/gás muito elevada possibilita a incorporação dos gases de exaustão na corrente de ar quente, com aproveitamento integral do calor gerado pela queima do gás natural.

Na estufa existem dois ventiladores axiais que promovem a convecção forçada no interior da estufa durante todo o ciclo de secagem. A extracção de ar húmido é garantida por uma conduta de exaustão que está equipada com um ventilador centrífugo.

Na figura 7 é possível observar um esquema da disposição dos diferentes equipamentos na Estufa.

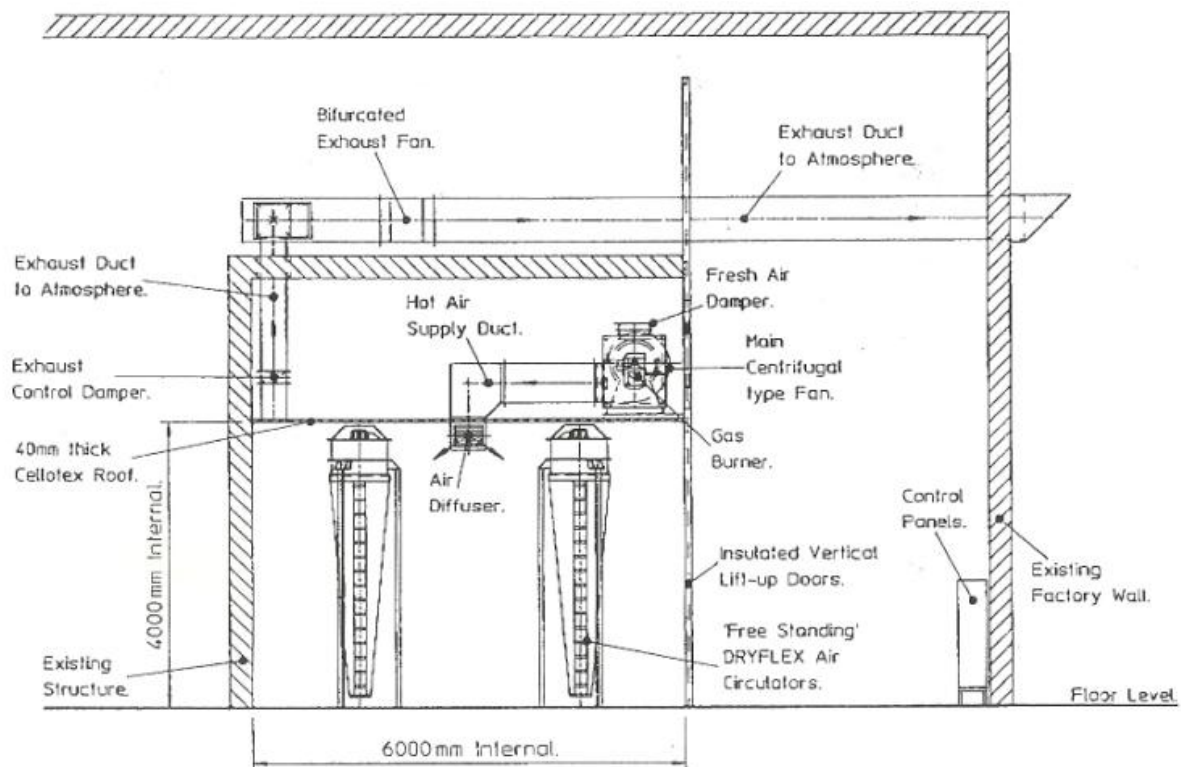


Figura 7 – Representação da estufa 1

Nas figuras 8, 9, 10 e 11 pode-se observar mais detalhadamente cada equipamento presente no interior de cada estufa, nomeadamente o ventilador, o distribuidor e a conduta de exaustão respectivamente.



Figura 8 – Ventilador.



Figura 9 – Distribuidor



Figura 10 - Condução do ar de exaustão.



Figura 11 - Moldes secos armazenados.

A disposição das estufas na FCV está ilustrada na figura 12, como já foi referenciado, sendo as primeiras três estufas destinadas a secar moldes e as restantes duas a secar peças cerâmicas.

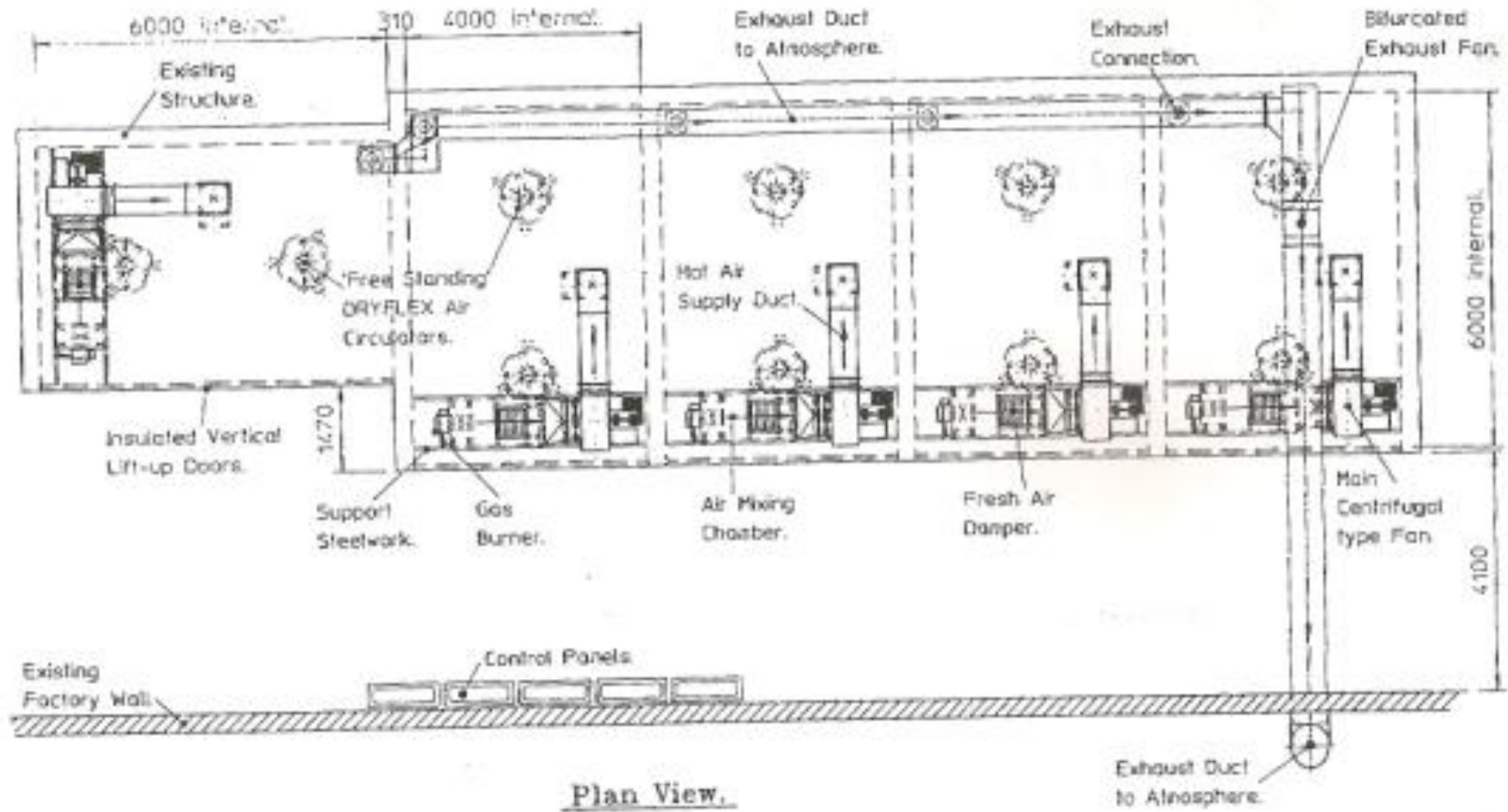


Figura 12 – Planta das estufas de secagem dos moldes e peças sanitárias.

2.2 Dimensões das estufas


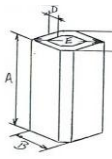
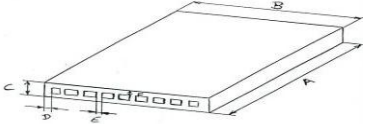
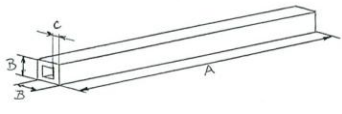
Na tabela 2, estão registados os valores das dimensões da estufa 1. As restantes cinco estufas têm as mesmas dimensões.

Tabela 2 – Dimensões da estufa 1

Dimensões	Estufa 1
Comprimento (m)	6,3
Largura (m)	4,5
Altura (m)	4,4
Espessura (m)	0,3
Área lateral (m ²)	28,0
Área do tecto (m ²)	28,0
Volume interno da estufa (m ³)	124,0

Na tabela 3 encontram-se os constituintes da estufa 1, bem como o material de que são feitos. De referir, que todas as paredes, o tecto falso e o portão estão devidamente revestidos com um material isolante.

Tabela 3 – Representação e constituição dos componentes da estufa 1.

Componente	Material	Figura	Descrição
Paredes laterais	Betão		Tijolo 20 cm
			Cimento 5 cm
Tubos	Ferro		D=10 cm
Tecto	Placas fibro-térmicas		Altura 20 cm
			Isolante 4 cm
Portão	Aço de ferro		Altura 3 m
			Espessura 4 cm

2.3 Programa de secagem dos moldes e das peças cerâmicas

Para caracterizar efectivamente a secagem dos moldes, foram registados os valores de temperatura e de humidade do ar durante todo o ciclo de secagem (tabela 4), através do painel de controlo, que se encontra no lado exterior da estufa 1. O programa de secagem dos moldes aplicados às estufas é apresentado no anexo A.

O local de secagem do gesso deve ter um sistema de ventilação que possibilite a secagem uniforme de toda a sua superfície para que fique, depois de seco, com a mesma resistência mecânica e grau de porosidade em toda a sua superfície.

A humidade do gesso deve ser o menor possível para que este tenha um manuseamento facilitado e uma elevada resistência. A temperatura do gesso não deve exceder os 65°C pois pode desidratar o próprio gesso.

Tabela 4 – Leituras da temperatura e da humidade relativa do ar no interior da estufa durante o ciclo de secagem dos moldes.

Leitura	Temperatura no interior da estufa (°C)	Humidade relativa (%)	Duração (horas)
1	17	91	0,0
2	60	50	16,5
3	61	45	24,0
4	55	40	40,5
5	55	40	48,0
6	50	36	64,5
7	50	32	72,0
8	50	28	88,5
9	50	28	96,0
10	50	25	112,5
11	50	23	120,0
12	50	23	136,5
13	50	23	144,0
14	50	20	150,0
15	50	20	168,0

Foi também caracterizado o processo de secagem das peças cerâmicas, registando também os valores de temperatura e de humidade do ar durante todo o ciclo de secagem (figura 13), através do painel de controlo, que se encontra no lado exterior das estufas 4 e 5.

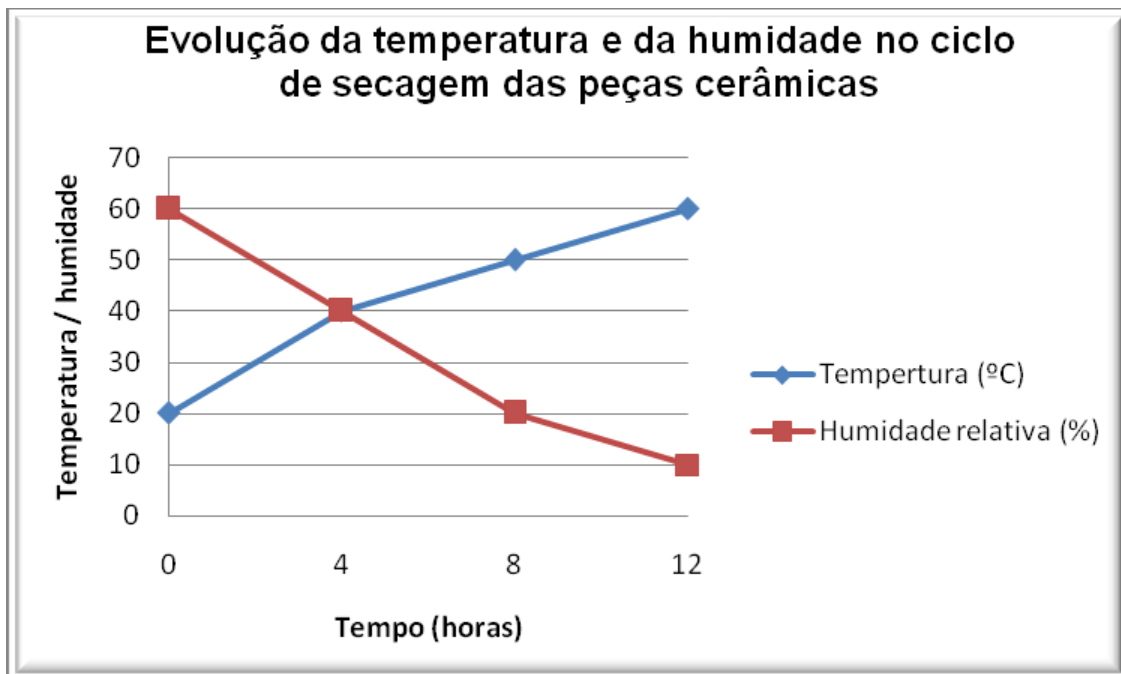


Figura 13 – Evolução da temperatura e da humidade do ar no interior da estufa no ciclo de secagem das peças cerâmicas.

3 Análise Energética das estufas

3.1 Estratégia utilizada na realização dos balanços energéticos

Na figura 14 estão representadas todas as correntes de entrada e saída das estufas 1 e 4.

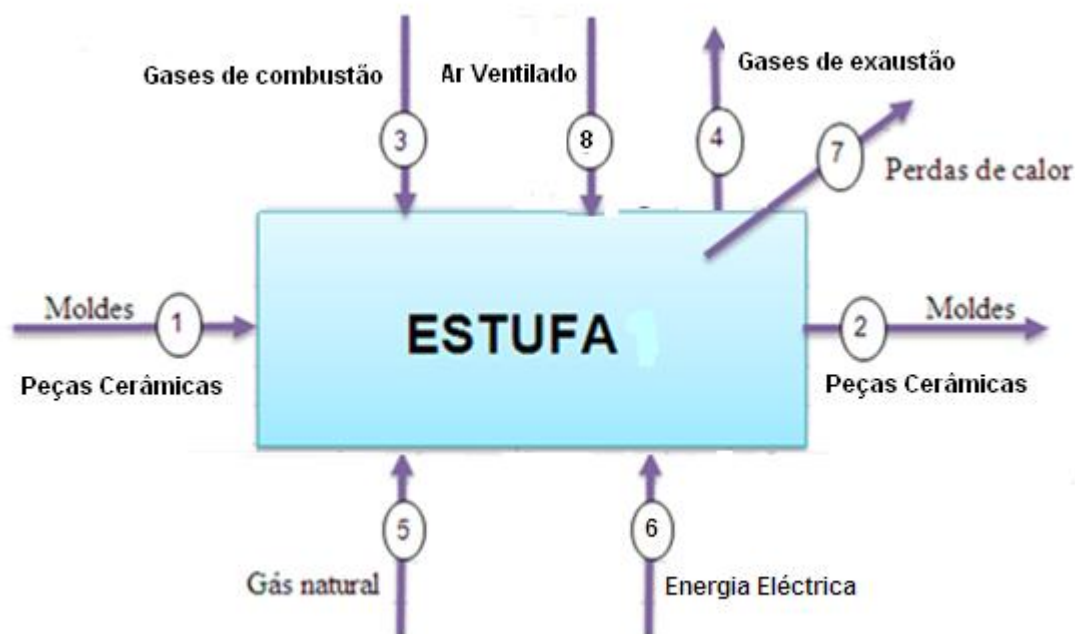


Figura 14 – Representação das correntes de entrada e de saída das estufas dos moldes e das peças cerâmicas.

Na secagem, é introduzido na estufa o molde/peças cerâmicas “verdes” (1); realiza-se a secagem durante 168 (moldes) a 12 (peças cerâmicas) horas, retirando-se seguidamente o molde/peças cerâmicas secos (2). Durante este processo são introduzidos gases quentes (3) provenientes do queimador do gás natural (5) e ar ventilado (8) vindo da atmosfera, que dão origem aos gases de exaustão (4). Existem perdas de calor através das paredes que constituem a estufa (7).

Para realizar o balanço energético detalhado, foi definida a seguinte estratégia:

1º Foi recolhida uma lista completa dos moldes secos e da sua massa antes e após a secagem. Foi determinada a variação de massa dos moldes (tabela 5).

Tabela 5 – Moldes seleccionados para a caracterização energética do processo de secagem da estufa 1

Código do molde	Molde	Número de moldes	Massa verde (kg)	Massa seca (kg)	Δm (kg)	Perda de massa (%)
18717	Lavatório Boston	10	146	102	44	30,1
38330	Lavatório durius médio	4	153	103	50	32,7
12330	Lavatórios médios Europa	6	177	108	69	38,9
37051	Bacia opus	10	305	224	81	26,6
38001	Bacia suspensa durius	20	258	177	81	31,4
18001	Bacia suspensa Europa	2	222	152	70	31,5
34182	Tanque nautilus	20	188	125	63	33,5
	TOTAL	72	15548	10664	4884	31,4%

2º Foram lidas as intensidades de corrente eléctrica dos vários equipamentos que compõem a estufa, para posteriormente calcular a potência e a energias consumidas por cada um deles (tabela 6). No que diz respeito aos valores da voltagem, frequência e $\cos \Phi$ são 380 V, 50 Hz 0,98 respectivamente.

Tabela 6 – Valores usados para calcular a energia eléctrica consumida pela estufa

Intensidade corrente absorvida (A)	35
Potência absorvida por ciclo (kW)	23
Energia absorvida por ciclo (kW/ciclo)	$1,63 \times 10^4$

3º Foi feita a contagem do consumo de gás natural na estufa 1 durante um ciclo de secagem (tabela 7). Foi também lida a pressão a montante do contador de gás, para a normalização do volume de gás natural. Com esse volume foram calculadas posteriormente a energia de queima e o consumo específico das estufas. Estes valores foram normalizados para uma temperatura e pressão de referência de 273 K e de 1 atm, respectivamente. De referir que foram efectuadas várias leituras e que os valores apresentados correspondem a valores médios.

Tabela 7 – Consumo de gás natural durante um ciclo de secagem dos moldes

CICLO DE SECAGEM	Pressão (bar)	Contador de gás	P _{máx} (bar)	Q _{min} (m ³ /h)	Q _{máx} (m ³ /h)
Início	2,65	308060	4	3,3	65
Fim	-	371313	-	-	-

4º Para determinar os caudais de ar que circulam na estufa foram feitas medições da velocidade do ar, no interior e no exterior da estufa, utilizando um anemómetro (LCD 8903 da AirFlow, cujas características são apresentadas no anexo B). Segundo o manual de instruções da estufa fornecido pelo fabricante, esta zona deverá ter uma velocidade do ar, provocada pelos dois ventiladores existentes, entre 1,0 e 1,5 m/s. Na tabela 8, apresentam-se os valores experimentais determinados no interior da estufa 1.

Tabela 8 – Valores experimentais da velocidade do ar dentro da estufa 1

Ensaio	v (m/s)	T (°C)
1	1,05	30,3
2	0,99	33,2
3	1,12	37,2
4	1,32	34,2
5	1,14	36,2
Média	1,12	34,2

5º Foram feitas leituras, em vários pontos, da temperatura interior usando um Termo-Higrómetro (as características encontram-se no anexo C, tabela C.1) e da temperatura exterior através de um termómetro laser (as características encontram-se no anexo C, tabela C.2) das paredes da estufa (tabela 9). A espessura de cada uma das paredes da estufa também foi medida, para posteriormente calcular as perdas de calor.

Tabela 9 - Registo das temperaturas interior e exterior ao longo da estufa 1.

Parede	Comprimento (m)	Humidade real no interior (%)	T _{int} (°C)	T _{ext} (°C)	Espessura (m)
Lado este	0,00	18,0	44,4	22,4	0,30
	1,58	14,8	45,1	22,8	
	3,15	9,2	48,4	22,8	
	4,73	7,2	50,1	23,0	
	6,30	5,3	52,7	23,6	
Lado oeste	0,00	21,2	40,9	22,4	0,30
	1,58	17,7	43,4	22,8	
	3,15	14,5	48,3	22,9	
	4,73	11,4	50,7	22,4	
	6,30	3,5	54,5	22,5	
Tecto	0,00	16,0	43,7	22,1	0,24
	1,58	9,8	51,4	22,2	
	3,15	5,2	52,6	22,2	
	4,73	4,4	53,2	22,3	
	6,30	3,5	52,3	22,1	
Lado norte	0,00	12,5	48,6	22,3	0,30
	1,12	6,0	52,4	22,5	
	2,23	5,2	52,3	22,3	
	3,35	4,1	53,1	22,1	
	4,46	3,2	53,7	23,1	
Lado sul	0	21,2	51,7	31,4	0,04
	1,12	17,2	53,7	32,4	
	2,23	16,0	53,3	31,1	
	3,35	16,8	54,1	30,9	
	4,46	18,0	53,7	32,2	
Chão	0,00	11,0	45,7	20,2	*
	1,58	9,8	49,7	21,9	
	3,15	7,4	52,6	22,2	
	4,73	6,3	51,3	21,6	
	6,30	5,5	50,5	20,4	

* Não foi medido.

3.2 Dados recolhidos para os cálculos

Os dados necessários para os cálculos realizados são apresentados das tabelas 10, 11 e 12. A razão estequiométrica de ar foi com base na combustão estequiométrica do gás natural. Os cálculos foram realizados para a composição volumétrica que consta na tabela D1 do anexo D e encontram-se sintetizados na tabela D3 do anexo D.

Tabela 10 - Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados.

Razão estequiométrica de ar ($\text{kg}_{\text{Ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$)	16,9
Poder calorífico Inferior do gás natural (kJ/kg) (273K)	44454
Temperatura ambiente (K)	293
Calor latente de vaporização da água (kJ/kg)	2480
Temperatura de referência (K)	273
Emissividade das paredes da estufa	0,85

Os valores do poder calorífico inferior e da capacidade calorífica do gás natural foram retirados de uma ficha de dados de segurança do combustível da empresa fornecedora (anexo D).

Os valores dos calores específicos das correntes dos gases de combustão foram calculados (ver Anexo E), através da composição mássica dos gases para um intervalo de temperaturas entre os 273 K e a temperatura média da corrente de 298 K.

As temperaturas dos moldes, à entrada e à saída, bem como das paredes das estufas foram medidas com um termómetro de infra-vermelhos (anexo C).

As percentagens de humidade das correntes do ar de queima e do ar de exaustão foram determinadas através dos dados temperatura e da humidade relativa do ar presente no interior da estufa referidos anteriormente, utilizando como auxílio a carta psicrométrica (anexo F). Relativamente à humidade média do ar exterior, este valor foi obtido através da consulta de uma carta psicrométrica (anexo G) considerando que o ar tem uma humidade relativa de 60% e uma temperatura seca de 20°C, pois nos encontramos em condições de Inverno. Os valores são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Valores utilizados no balanço energético das estufas.

Capacidade calorífica média do ar de queima (kJ/kgK) (273K-298K)	0,99
$T_{\text{gás natural}}=T_{\text{arq}}(^{\circ}\text{K})$	298
$w_{\text{ar}}(T=20^{\circ}\text{C e Hr}=60\%)(\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}})$	0,008
$w_{\text{ar de exaustão}}(T=45^{\circ}\text{C e Hr}=20\%)(\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}})$	0,011
Gás natural (273-298 K)	2,00
Água (273-298 K)	1,84
Ar estequiométrico (273-298 K)	0,99
Moldes	1,50
Peças	1,90

De salientar, que a secagem dos moldes é feita com ciclos de secagem de 168 horas, enquanto a das peças cerâmicas necessitam apenas de períodos de 12 horas pois estes contêm muito menos água.

Os dados relativos às peças foram medidos pela empresa, indicando uma humidade específica média de 10 %. Na tabela 12 encontram-se as características das peças de louça, e o número de peças a secar por ciclo de secagem, típico das estufas das peças (estufa 4 e 5).

Tabela 12 – Dados relativos à secagem das peças de louça na estufa 4.

Tempo de secagem (h)	12
Caudal mássico de gás natural (kg/h)	1
Número de peças por carga	40
Número de peças secas por dia	240
Massa média das peças secas (kg)	25
Humidade final (%)	1

O caudal mássico de gás natural foi determinada através da contagem do gás como foi referido anteriormente no processo de secagem dos moldes.

3.3 Simulador elaborado

Com o levantamento das condições técnicas e operacionais dos equipamentos em estudo, descritas anteriormente, foi elaborada uma ferramenta de simulação em Excel, para a realização do balanço energético detalhado. Esta simulação serviu como base deste trabalho, para o diagnóstico da situação existente no processo de secagem dos moldes. Seguidamente, apresentam-se algumas fracções do simulador usado (Figura 15 a) e 15 b)).

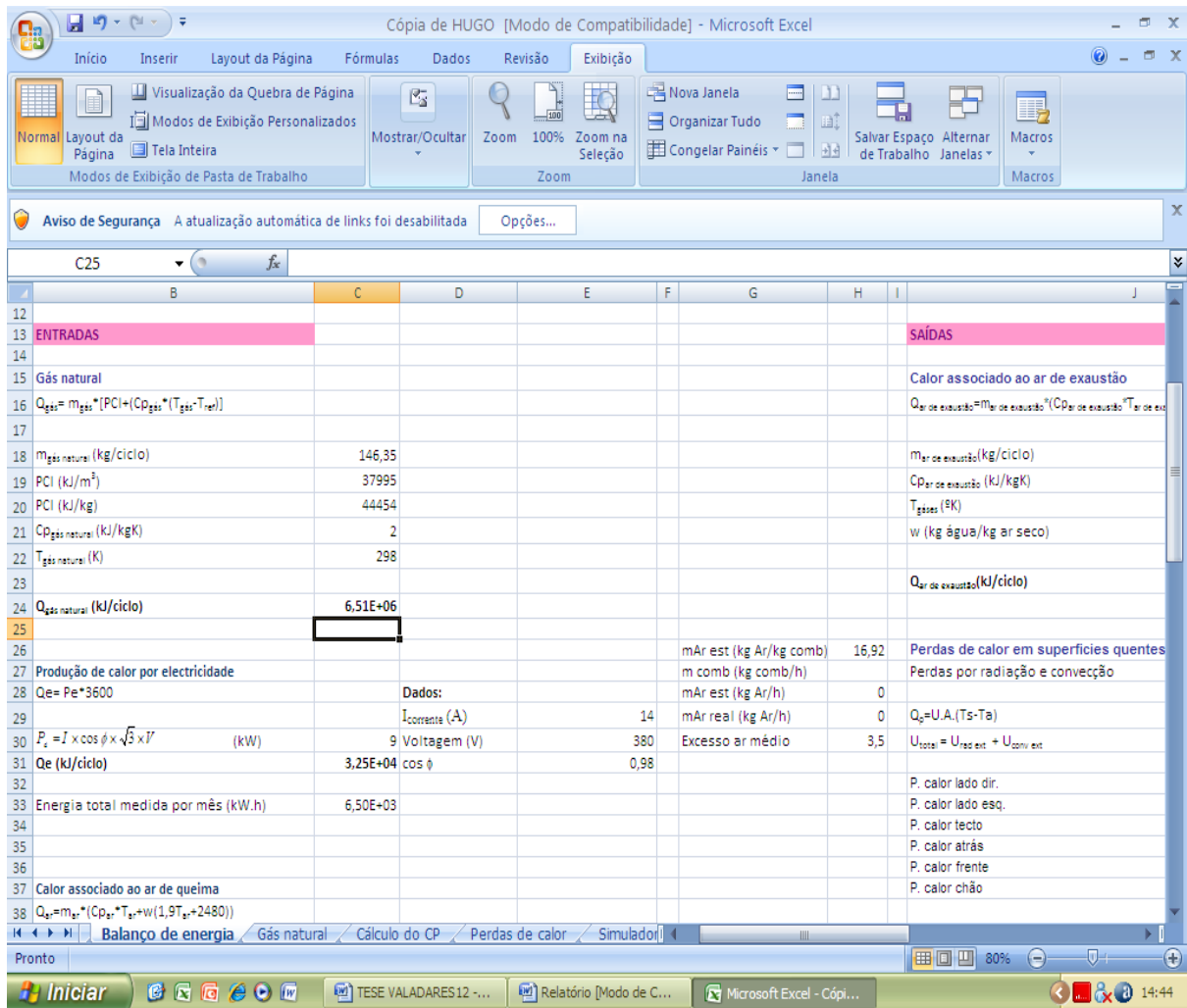


Figura 15 a) - Fração da folha de cálculo do balanço energético da estufa 1 e 4.

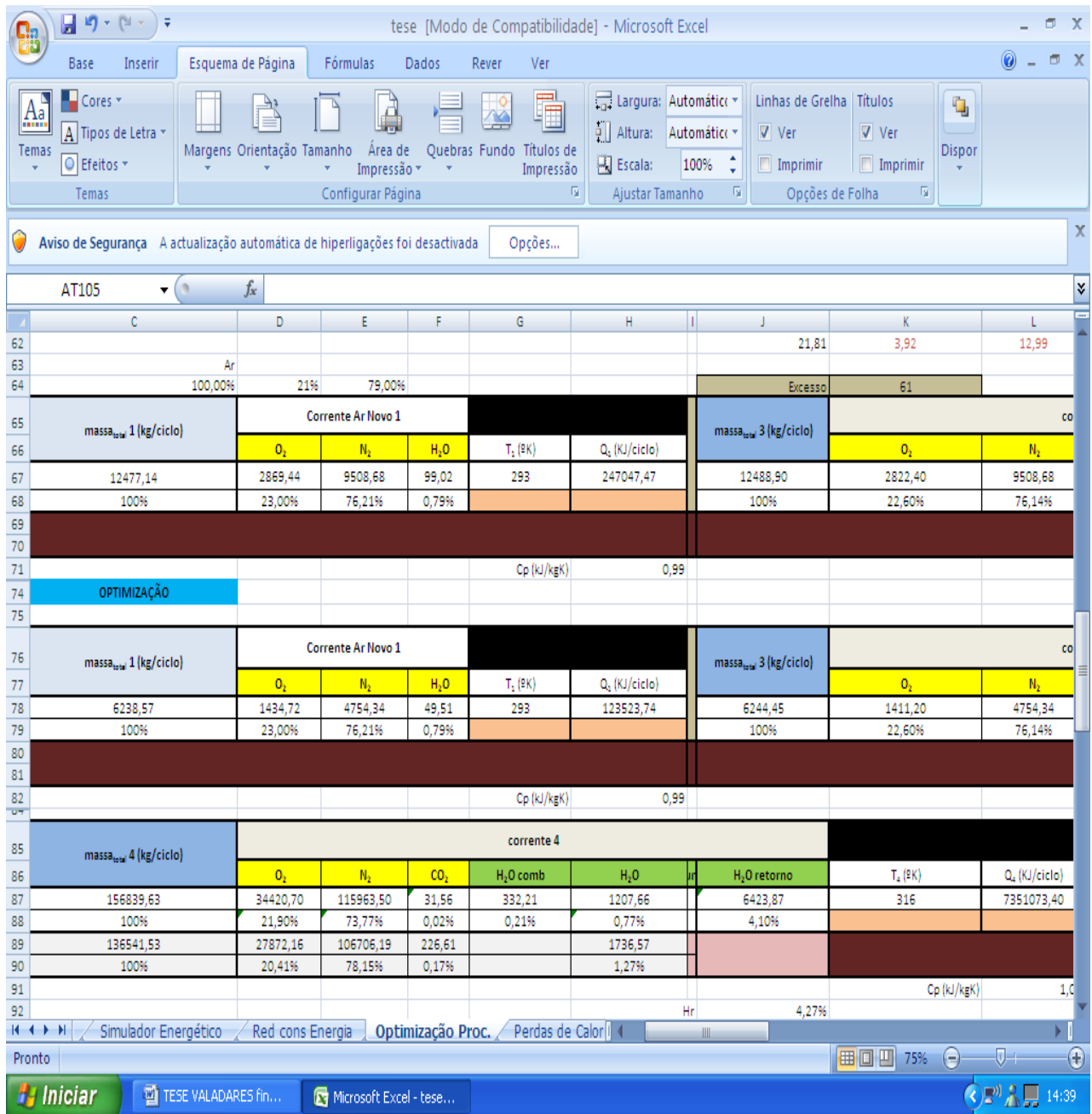


Figura 15 b) - Fração da folha de cálculo com a optimização energética das estufas de secagem de peças.

3.4 Balanço de Energia às estufas

3.4.1 Correntes de entrada da estufa

❖ Caudal térmico associado ao gás natural (combustão)

Para o cálculo do caudal térmico de combustão do gás natural ($Q_{gás\ natural}$) foi necessário conhecer o valor do caudal mássico ($\dot{m}_{gás\ natural}$), do poder calorífico inferior (PCI), da capacidade calorífica ($Cp_{gás\ natural}$), da temperatura do gás natural ($T_{gás\ natural}$) e da temperatura de referência (T_r). Assim, o caudal térmico associado ao gás natural foi determinado pela equação 3:

$$Q_{gás\ natural} = \dot{m}_{gás\ natural} \times PCI + \dot{m}_{gás\ natural} \times Cp_{gás\ natural} \times (T_{gás\ natural} - T_r) \quad (3)$$

❖ Caudal térmico associado à energia eléctrica

Quanto ao caudal térmico da energia eléctrica (Q_e), foi calculado pela seguinte expressão utilizando a potência eléctrica (P_e):

$$Q_e = P_e \times 3600 \quad (4)$$

A potência eléctrica consumida (P_e) foi calculada através da equação (5), uma vez que é uma corrente trifásica, usando os valores da intensidade da corrente (I), o factor potência ($\cos \phi$) e a voltagem ($Volt.$):

$$P_e = I \times \cos \phi \times \sqrt{3} \times Volt \quad (5)$$

❖ Caudal térmico associado aos gases de combustão

O caudal térmico associado aos gases de combustão, foi calculado através da equação 5, com os valores do caudal mássico ($\dot{m}_{ar\ comb}$), da capacidade calorífica (Cp_{ar}), da temperatura (T_{ar}), da humidade dos gases (w_{ar}) e ainda com os valores da capacidade calorífica do vapor de água ($Cp_{vaporH2O}$) e do calor latente de vaporização da água ($\lambda_{vaporH2O}$). Esta equação foi obtida da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 Q_{ar\ comb} &= \dot{m}_{ar\ comb} \times C_{p\ ar\ comb} \times (T_{ar\ comb} - T_r) + \dot{m}_{ar\ comb} \times w_{ar\ comb} \times C_{p\ vap.H_2O} \times (T_{vap.H_2O} - T_r) + \dot{m}_{ar\ comb} \times w_{ar\ comb} \times \lambda_{vap.H_2O} \\
 \Leftrightarrow Q_{ar\ comb} &= \dot{m}_{ar\ comb} \times [C_{p\ ar\ comb} \times (T_{ar\ comb} - T_r) + w_{ar\ comb} \times (C_{p\ vaporH_2O} \times (T_{ar\ comb} - T_r) + \lambda_{vaporH_2O})]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Para este cáculo assume-se que o ar de combustão é o estequiométrico, o que não é exacto pois deve ter algum excesso. O ar de secagem é obtido com a mistura dos gases de combustão com o ar de ventilação.

Para o cáculo do caudal mássico de ar de combustão estequiométrico, aplica-se a seguinte equa o:

$$\dot{m}_{ar\ comb} (kg_{ar} / ciclo) = \dot{m}_{g s\ natural} (kg_{comb} / ciclo) \times (\dot{m}_{ar} / \dot{m}_{comb})_{est} (kg_{ar} / kg_{comb})
 \tag{7}$$

Assim, o cáculo do caudal térmico dos gases de combustão será:

$$Q_{gases\ comb} = Q_{g s\ natural} + Q_{ar\ comb}
 \tag{8}$$

❖ Caudal térmico associado ao ar ventilado

Em rela o ao cáculo de ar ventilado, este será realizado de igual modo ao anterior, como se pode verificar na equa o seguinte:

$$\begin{aligned}
 Q_{ar\ ventilado} &= \dot{m}_{ar\ ventilado} \times [C_{p\ ar\ ventilado} \times (T_{ar\ ventilado(K)} - T_{r(K)})] + w_{ar\ ventilado} \times [C_{p\ vapH_2O} \times \\
 &(T_{ar\ ventilado(K)} - T_{r(K)}) + \lambda_{vapH_2O}]
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Através da recolha dos dados para o cáculo do caudal de exaustão (anexo F) verifica-se que:

- o $\dot{m}_{ar\ seco}/estufa=2314\ kg/h$

O cálculo do caudal mássico do ar ventilado obtém-se pelas seguintes equações:

$$\dot{m}_{gases\ secos} = \dot{m}_{ar\ seco} \times t_{ciclo} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{ar\ ventilado} = \dot{m}_{gases\ secos} - \dot{m}_{gases\ comb} \quad (11)$$

❖ Caudal térmico associado aos moldes e às peças cerâmicas

Para calcular o caudal térmico associado aos moldes e das peças cerâmicas na entrada foi necessário conhecer o caudal mássico à entrada, a sua capacidade calorífica, a temperatura, o teor de água dos moldes e das peças cerâmicas, bem como a sua capacidade calorífica (equações 12 e 13):

$$Q_{molde} = (\dot{m}_{molde} \times Cp_{molde} + \dot{m}_{H2O} \times Cp_{H2O}) \times (T_{molde} - T_r) \quad (12)$$

$$Q_{peças\ cerâmicas} = (\dot{m}_{peças\ cerâmicas} \times Cp_{peças\ cerâmicas} + \dot{m}_{H2O} \times Cp_{H2O}) \times (T_{peças\ cerâmicas} - T_r) \quad (13)$$

No que diz respeito aos restantes caudais térmicos associados ao ar, nomeadamente o que está associado ao ar na entrada da estufa, o cálculo foi feito de igual modo ao realizado para o ar de queima, mudando apenas os valores das variáveis presentes na equação.

3.4.2 Correntes de saída da estufa

❖ Caudal térmico associado aos gases de exaustão

O caudal térmico associado ao ar de exaustão foi calculado através da equa o 14 com 3 caudais distintos:

$$\begin{aligned}
 Q_{ar\ exaustão} &= \dot{m}_{ar\ exaustão} \times C_{p\ ar\ exaustão} \times (T_{ar\ exaustão} - T_r) + \left(\dot{m}_{ar\ exaustão} \times w_{a\ exaustão} \times \right. \\
 &\quad \left. C_{p\ vapor.H_2O} \times (T_{vapor.H_2O} - T_r) \right) + \\
 &\quad \dot{m}_{ar\ exaustão} \times w_{ar\ exaustão} \times \lambda_{vapor.H_2O} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow Q_{ar\ exaustão} &= \dot{m}_{ar\ exaustão} \times \left[C_{p\ ar\ exaustão} \times (T_{ar\ exaustão} - T_r) + w_{ar\ exaustão} \times (C_{p\ vaporH_2O} \times (T_{ar\ exaustão} - T_r) \right. \\
 &\quad \left. + \lambda_{vaporH_2O}) \right]
 \end{aligned} \tag{14}$$

O cáculo do caudal mássico de água existente nos moldes e no ar, foi obtido da seguinte forma:

$$\dot{m}_{H_2O\ evap} (kg/ciclo) = \dot{m}_{molde\ verdes} (kg/ciclo) - \dot{m}_{moldes\ secos} (kg/ciclo) \tag{15}$$

$$\dot{m}_{H_2O\ comb} (kg/ciclo) = (\dot{m}_{ar} / \dot{m}_{comb})_{est} (kg_{ar} / kg_{comb}) \times \dot{m}_{g s\ natural} (kg/ciclo) \tag{16}$$

$$\dot{m}_{H_2O} (kg/ciclo) = \dot{m}_{H_2O\ evap} (kg/ciclo) + \dot{m}_{H_2O\ comb} (kg/ciclo) \tag{17}$$

Na equa o 18, apresenta-se o cáculo do caudal de gases de exaustão, provenientes do processo de secagem, baseados nos valores dos caudais mássicos da água, dos gases estequiométrico e de gás natural à temperatura de saída.

$$\dot{m}_{ar\ exaustão} (kg/ciclo) = \dot{m}_{ar\ comb} (kg/ciclo) + \dot{m}_{ar\ ventilado} (kg/ciclo) + \dot{m}_{H_2O} (kg/ciclo) \tag{18}$$

O cálculo da humidade específica do ar de exaustão baseia-se em:

$$w_{ar\ exaustão} = \frac{\dot{m}_{H_2O} (kg/ciclo)}{\dot{m}_{gases\ secos} (kg/ciclo)} \quad (19)$$

Após a mistura do ar de combustão com o ar ventilado, a temperatura média dos gases de exaustão ponderada é calculado da forma seguinte:

$$T_{exaustão} (°C) = \frac{Q_{arventilado} (kJ/ciclo) + Q_{gases\ combustão} (kJ/ciclo)}{\dot{m}_{gases\ secos} (kg/ciclo) \times Cp_{ar\ exaustão} (kJ/kg°C)} \quad (20)$$

❖ Caudal térmico associado às perdas de calor pelas paredes das estufas

Para o cálculo das perdas de calor por radiação e por convecção pelas paredes quentes das estufas foi necessário determinar o coeficiente de transferência de energia por radiação (h_{rad}) e convecção natural (h_{conv}). Para realizar os cálculos citados anteriormente foi necessário conhecer os valores da emissividade da parede (ϵ), da temperatura exterior média da parede ($T_{ext.}$), da temperatura ambiente (T_{amb}) e das propriedades físicas do ar para uma média das temperaturas [9].

A equação 21 foi obtida através da bibliografia [10]:

➤ Radiação

$$h_{rad} = 20,4 \times \epsilon \times \frac{\left(\frac{T_{parede} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{amb} + 273}{100}\right)^4}{(T_{parede} - T_{amb})} \quad (21)$$

➤ Convecção

$$T_m = \frac{T_{parede\ exterior} + T_{amb}}{2} \quad (22)$$

Com o valor da temperatura média é possível definir as propriedades físicas do ar nestas condições, nomeadamente, a condutividade térmica do ar, a viscosidade cinemática do ar, o número de Reynolds (Re), o número de Prandtl (Pr) e o coeficiente de dilatação volumétrica [8].

○ **Convecção natural**

$$\frac{h_{conv} \times d}{K} = Nu = C(Gr Pr)^m \quad (23)$$

$$Gr = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times d^3}{\nu^2} \quad (24)$$

Assim, calculados os coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação, pode-se calcular as respectivas resistências térmicas, ou seja:

$$R_{rad} = \frac{1}{(h_{rad} \times A_{ext})} \quad (25)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{(h_{conv} \times A_{ext})} \quad (26)$$

Com as resistências anteriormente calculadas, foi determinada a resistência total e o coeficiente global de transferência de calor, pelas seguintes equações:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{rad}} + \frac{1}{R_{conv}} \quad (27)$$

$$R_{eq} = \frac{1}{U_{global} \times A_{ext}} \quad (28)$$

Por fim, determinado o coeficiente global de transferência de calor, é possível calcular o caudal térmico de perdas das paredes verticais e horizontais, pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{perdas} = U_{global} \times A_{pd} \times (T_{pdmed} - T_{amb}) \quad (29)$$

Foram depois somadas todas as parcelas das perdas de calor, do restante comprimento da estufa. Os resultados calculados referentes às perdas de calor nesta estufa encontram-se no anexo J.

❖ Caudal térmico associado aos moldes e peças cerâmicas á saída

O caudal térmico associado aos moldes determina-se a partir da seguinte equação:

$$Q_{molde} = (\dot{m}_{molde} \times Cp_{molde} + \dot{m}_{H_2O} \times Cp_{H_2O}) \times (T_{moldes} - T_r) \quad (30)$$

Em relação às peças cerâmicas, foi realizado de igual modo diferindo apenas os valores do caudal, capacidade calorífica e da temperatura final, ou seja:

$$Q_{peças\ cerâmicas} = (\dot{m}_{peças\ cerâmicas} \times Cp_{peças\ cerâmicas} + \dot{m}_{H_2O} \times Cp_{H_2O}) \times (T_{peças\ cerâmicas} - T_r) \quad (31)$$

4 Resultados e Discussão

4.1 Perdas de calor nas estufas dos moldes

Foi estudada a evolução da quantidade de calor perdido ao longo do comprimento da estufa 1 (figura 16). Somando as várias parcelas das quantidades de calor perdido pelas paredes da estufa, para as diferentes temperaturas, obteve-se o valor total do calor perdido por cada superfície, durante o ciclo de secagem (anexo J).

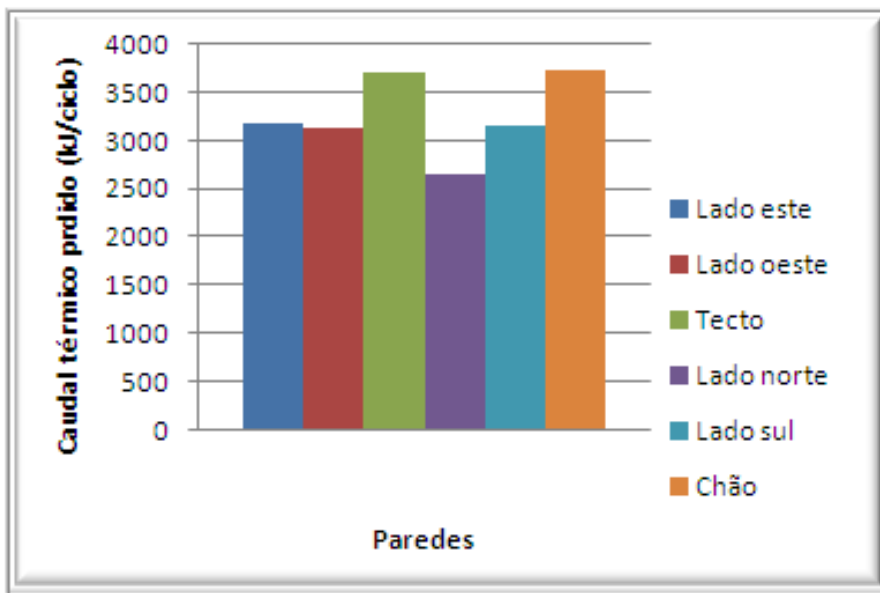


Figura 16 - Perdas de calor pelas superfícies da estufa 1.

Através da figura 16, é possível constatar que o chão e o tecto são as zonas que apresentam um maior caudal térmico perdido ($3,7 \times 10^3$ kJ/ciclo), sendo este ligeiramente superior aos restantes (cerca de 19%). O valor mínimo de perdas ocorre através do lado norte ($2,7 \times 10^3$ kJ/ciclo).

Quanto às restantes paredes, estas têm um comportamento muito semelhante, apresentando perdas na ordem das $3,2 \times 10^3$ kJ/ciclo. No total, as perdas atingem um valor de cerca de 2×10^4 kJ/ciclo.

4.2 Balanço Energético às estufas dos moldes

Neste balanço energético foram calculados todos os caudais térmicos envolvidos na estufa 1, que constam na tabela 13. Determinaram-se todos os caudais térmicos à entrada e à saída para cada patamar de secagem, como podemos verificar na tabela 13. Os cálculos encontram-se no anexo I.

Tabela 13 - Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético realizado à estufa 1.

Nº corrente	Caudal térmico - Entrada (kJ/ciclo)		Nº corrente	Caudal térmico - Saída (kJ/ciclo)	
5	Gás natural	$6,51 \times 10^6$	7	Perdido pelas superfícies quentes	$1,97 \times 10^4$
6	Energia eléctrica	$3,25 \times 10^4$	4	Gases de exaustão	$1,51 \times 10^8$
3	Gases de combustão	$6,61 \times 10^6$	2	Moldes	$7,28 \times 10^5$
8	Ar de ventilação	$1,21 \times 10^8$	----	-----	---
1	Moldes	$6,46 \times 10^5$	----	-----	---
TOTAL Entrada		$1,29 \times 10^8$	TOTAL Saída		$1,52 \times 10^8$

Através da análise da tabela 13, verifica-se que nas correntes de entrada o maior caudal diz respeito ao ar de ventilação, e o menor pertence à energia eléctrica. No que diz respeito às correntes de saída, o maior caudal térmico apresentado é o resultante dos gases de exaustão, e o menor corresponde ao caudal térmico associado ao calor perdido pelas superfícies quentes. A diferença entre o somatório do caudal térmico das correntes de entrada e o das de saída é de aproximadamente 17%. Este desvio pode dever-se à medição do caudal de combustível no processo de secagem dos moldes pois foi tecnicamente impossível efectuar a leitura com apenas uma estufa em funcionamento. O valor usado foi obtido por estimativa. Outro factor que pode justificar este desvio relaciona-se com a recolha dos dados dos gases de exaustão pois foi efectuada na parte terminal da conduta, não correspondendo exactamente à saída das estufas, o que promove alguma alteração da temperatura de exaustão e da velocidade de escoamento (ver anexo F).

Analisados os resultados verifica-se que existe um grande consumo de energia por parte das estufas, devido ao elevado consumo de ar ventilado e gás natural durante o ciclo de secagem, bem como por existirem algumas perdas térmicas provenientes das superfícies da estufa.

4.3 Perdas de calor nas estufas das peças cerâmicas

Foi estudada a evolução da quantidade de calor perdido ao longo do comprimento da estufa 4 (figura 17). Somando as várias parcelas das quantidades de calor perdido pelas paredes da estufa, para as diferentes temperaturas, obteve-se o valor total do calor perdido por cada superfície, durante o ciclo de secagem.

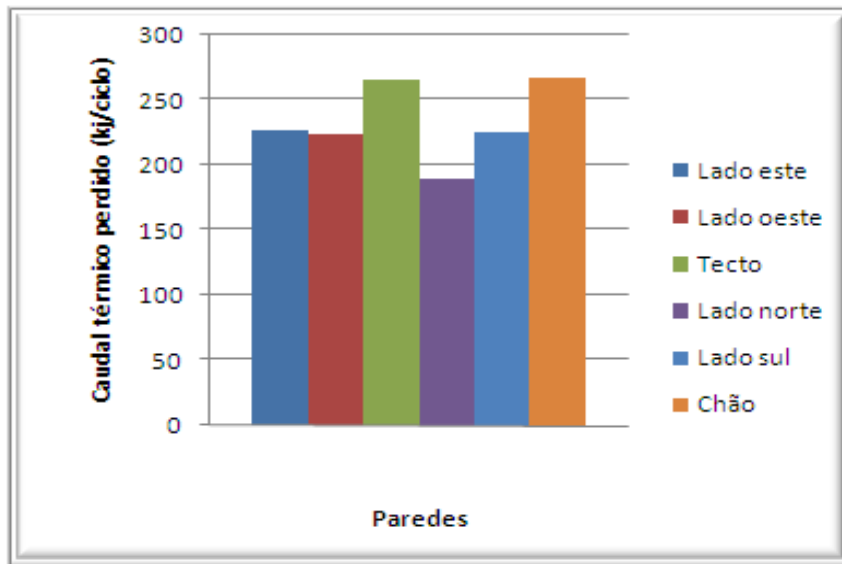


Figura 17 – Perdas de calor pelas superfícies da estufa 4.

Através da figura 17, é possível constatar que o chão e o tecto são as zonas que apresentam um maior caudal térmico perdido (266 kJ/ciclo), sendo este ligeiramente superior aos restantes (cerca de 19%). O valor mínimo de perdas ocorre através do lado norte (190 kJ/ciclo).

Quanto às restantes paredes, estas têm um comportamento muito semelhante, apresentando perdas na ordem das 225 kJ/ciclo. No total, as perdas atingem um valor de cerca de 1400 kJ/ciclo.

De salientar que a diferença das perdas de calor nos dois tipos de secagem (secagem dos moldes e das peças cerâmicas) deve-se à diferença do tempo de secagem nos dois ciclos.

4.4 Balanço Energético às estufas das peças cerâmicas

Neste balanço energético foram calculados todos os caudais térmicos envolvidos na estufa 4, que constam na tabela 14. Determinaram-se todos os caudais térmicos à entrada e à saída para cada patamar de secagem, como podemos verificar na tabela 14, sendo que o caudal de gás natural gasto no processo de secagem é de 12 kg/ciclo. Os cálculos encontram-se no anexo I.

Tabela 14 - Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético realizado na estufa 4.

Nº corrente	Caudal térmico - Entrada (kJ/ciclo)		Nº corrente	Caudal térmico - Saída (kJ/ciclo)	
5	Gás natural	$5,34 \times 10^5$	7	Perdido pelas superfícies quentes	$1,40 \times 10^3$
6	Energia eléctrica	$2,32 \times 10^3$	4	Gases de exaustão	$9,93 \times 10^6$
3	Gases de combustão	$4,43 \times 10^6$	2	Peças cerâmicas	$6,98 \times 10^4$
8	Ar de ventilação	$8,66 \times 10^6$	---	-----	---
1	Peças cerâmicas	$4,55 \times 10^4$	---	-----	---
TOTAL Entrada		$1,37 \times 10^7$	TOTAL Saída		$1,00 \times 10^7$

Analisando a tabela 14, é possível constatar que nas correntes de entrada o maior caudal diz respeito ao Ar de ventilação, e o menor pertence ao caudal térmico associado à energia eléctrica. Relativamente às correntes de saída, o maior caudal térmico apresentado é o resultante do ar de exaustão, e o menor corresponde ao caudal térmico associado ao calor perdido pelas superfícies quentes.

Quanto à diferença entre o somatório do caudal térmico das correntes entradas e o das de saída, estas apresentam um desvio de cerca de 30%. Como referido anteriormente para o processo de secagem dos moldes, este desvio pode dever-se a dois factores: à estimativa usada para o caudal de combustível e à recolha dos dados dos gases de exaustão.

A partir dos resultados constata-se que existe um grande consumo de energia por parte das estufas, e isto deve-se ao facto de haver um elevado consumo de ar ventilado e gás natural que necessita a estufa durante o ciclo de secagem.

Como sugestão para a optimização deste processo, sendo este o principal objectivo de trabalho, decidiu-se usar parte do ar de exaustão das estufas de secagem dos moldes para um aquecimento parcial do ar das estufas das peças cerâmicas. Esta alternativa permite uma redução no consumo de energia, pois existe um elevado potencial de recuperação de energia como podemos observar pelo elevado caudal térmico associado ao de ar de exaustão e dos moldes quentes á saída das estufas dos moldes.

5 Optimização energética das estufas

O objectivo deste trabalho consistiu em reaproveitar a energia térmica contida no ar de exaustão das estufas de moldes para aquecer o ar das estufas das peças cerâmicas, conseguindo-se assim uma redução do consumo de energia e combustível (gás natural).

O ar recuperado das estufas dos moldes entra com uma percentagem de humidade de 20% nas estufas das peças, correspondendo ao ar das últimas 50 horas do processo de secagem dos moldes (último terço da curva de secagem).

O ciclo de secagem das peças tem duas fases, sendo uma a cerca de 40°C (primeiras 6 horas) e outra a cerca de 70°C (restantes 6 horas).

Para o reaproveitamento do calor do ar de exaustão é necessário apenas a aquisição de duas válvulas de manuseio automático permitindo que as estufas de secagem de peças cerâmicas funcionem em dois ciclos distintos. O ar passa por um sistema de tubagens e dispositivos de controlo que visam realimentar o ar de exaustão das estufas que estão a terminar o ciclo, mas que estiveram a iniciar o ciclo de secagem das peças cerâmicas. Esta instalação será montada e instalada pela empresa.

Ao proceder à colocação do equipamento sugerido nas estufas dos moldes, há uma redução do caudal térmico consumido durante o processo de secagem nas estufas da louça. Este processo propõe-se em dividir em duas partes distintas a etapa de secagem das peças, nomeadamente:

- 1) Nas primeiras 6 horas, reaproveitar os gases de exaustão que saem das estufas de secagem dos moldes;
- 2) Nas restantes 6 horas, manter o processo sem alteração, ou seja, usar a energia da queima de gás.

Para as 2 estufas de secagem de louça, a redução foi calculada através da diferença entre os valores dos caudais térmicos, antes e após a colocação das válvulas. Na figura 18 está ilustrado o diagrama do processo de secagem das estufas optimizado.

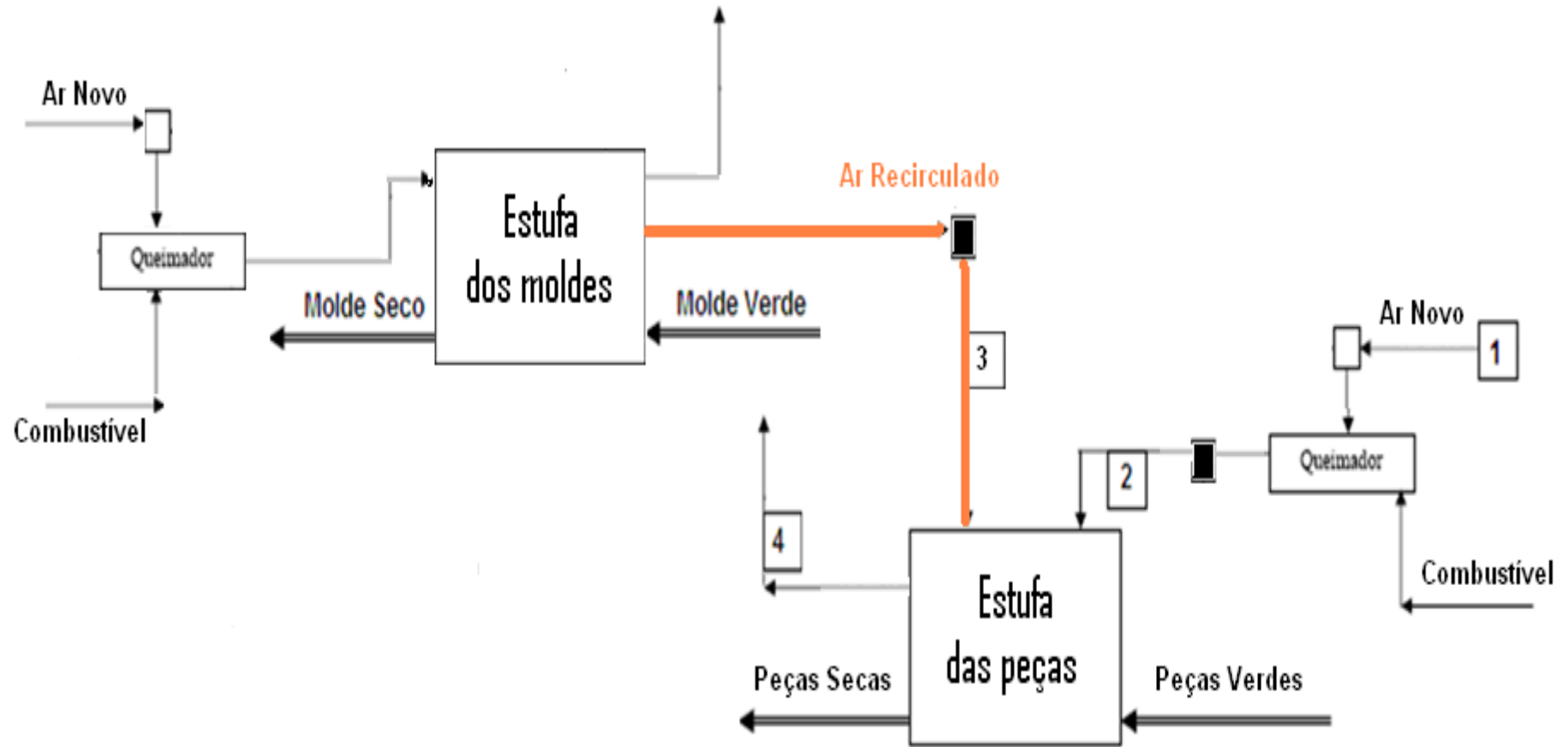


Figura 18 – Diagrama do processo de secagem otimizado.

A implementação desta medida irá promover uma diminuição do caudal térmico consumido pelas estufas da louça, e conseqüentemente da energia de queima e do consumo específico da estufa. Este processo visa reaproveitar o ar quente de exaustão da fase final da secagem das estufas de moldes para o incorporar no início da secagem das estufas de secagem das peças cerâmicas, aproveitando a baixa humidade específica e temperatura dessa corrente, para poupar o aquecimento inicial do ciclo (cerca de 24 - 36 horas iniciais). Este aproveitamento está dependente da humidade específica dos gases de saída a aproveitar, não podendo estes estarem perto da saturação, pois nesse caso em vez de secarem os moldes, promoveria a humidificação. Esta estratégia de secagem tem a vantagem de tornar o processo mais suave e gradual no início da secagem dos moldes, e desta forma melhorar a eficiência do processo de secagem.

Com os valores do volume de gás consumido nas estufas foram calculadas os custos dos ciclos de secagem, as energias de queima e os valores do consumo específico das estufas de louça (anexo I). Estes valores, considerando a alteração efectuada no processo nas estufas, encontram-se na tabela 15.

Tabela 15 – Custo do ciclo de secagem, energia de queima e do consumo específico da estufa das peças antes e depois da optimização do processo.

Custo do ciclo de secagem (€/mês)	877
Energia de queima (MJ), antes da alteração	$5,34 \times 10^5$
Consumo específico (kJ/kg), antes da alteração	50023
Custo do ciclo de secagem, após a alteração (€/mês)	439
Energia de queima, após a alteração (MJ)	$2,67 \times 10^5$
Consumo específico da estufa, após a alteração (kJ/kg)	25011

Verifica-se uma redução do consumo específico, do custo do ciclo de secagem e de energia de queima em 50%.

Com a optimização deste processo que consiste em recuperar ar quente das estufas dos moldes, consegue-se uma poupança no caudal térmico de gás natural no ciclo de secagem das estufas de secagem de louça de $2,65 \times 10^5$ kJ/ciclo, representando cerca de 50% de redução no consumo de gás natural (figura 19).

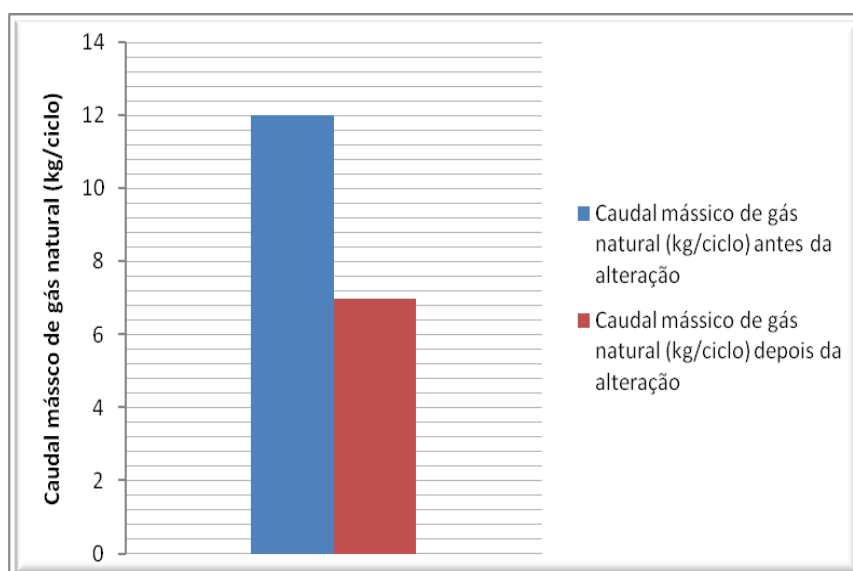


Figura 19 – Caudais mássicos de gás natural antes e após a optimização energética nas estufas das peças cerâmicas

6 Análise Económica

Os cálculos foram efectuados com base no preço de gás natural de 0,60 €/Nm³, valor fornecido pela empresa da EDP [4]. Na tabela 16 é possível podermos verificar os ganhos de energia e económicos proporcionados pelo reaproveitamento da energia dissipada das estufas dos moldes para as das peças cerâmicas.

Tabela 16 – Poupança de gás natural devido à recuperação de energia dissipada

Gás natural	
Redução energia (kJ/ciclo)	2,67E+05
Q/PCI (Nm ³ /ciclo)	7
Poupança (Euros/ciclo)	4,22
Número de ciclos /mês	104
Poupança (Euros/mês)	439
Número de meses de funcionamento/ano	11

Para conseguir esta poupança de gás natural foi necessário fazer um investimento num equipamento que consiste na aquisição de duas válvulas de manuseio automático, e ver até que ponto é viável fazer este mesmo investimento. Na tabela 17 encontram-se os benefícios da optimização deste processo nas estufas.

Para avaliar a viabilidade económica da implementação das duas válvulas necessárias para conseguir a redução de gás natural referida na tabela 16 foi feita uma análise económica, através de uma pesquisa dos preços dos equipamentos necessários, com o objectivo de determinar o período necessário para recuperar o investimento efectuado. Conclui-se que o valor do investimento é de 4000€.

O tempo de retorno do investimento (t_{retorno}) é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor do investimento realizado é calculado através da equação seguinte:

$$t_{\text{retorno}} = \frac{\text{Investimento}}{\text{Poupança}} \quad (32)$$

Adicionando todos os valores dos fluxos de caixa líquidos actualizados calculou-se o valor actual líquido (VAL), tendo-se obtido um valor de 4824€. Relativamente ao tempo de retorno do investimento resultante deste investimento, este é de 10 meses.

7 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho apresentado nesta tese teve como objectivo a optimização da energia nas estufas de secagem na *Fabrica de Cerâmica de Valadares S.A.* A actividade desta empresa consiste na produção de louça sanitária e envolve um consumo elevado de energia.

Realizou-se um levantamento das condições técnicas/operacionais dos equipamentos em estudo e elaborou-se uma ferramenta de simulação que foi aplicada para realizar um balanço energético detalhado e diagnóstico da situação existente.

No seguimento, foi efectuada uma análise de mercado, para elaboração do estudo económico da implementação das medidas sugeridas, nomeadamente, a recuperação dos gases de combustão que saem das três estufas que secam os moldes para as estufas de louça, optou-se por tomar esta medida uma vez que reduzirá significativamente (50%) o consumo de combustível (gás natural) nestas estufas. A implementação desta medida proporciona uma poupança do caudal térmico de gás natural na etapa de secagem das estufas da louça de $2,67 \times 10^5$ kJ/ciclo (cerca de 50%).

A redução do consumo de energia origina uma poupança em gás natural de 6 kg/ciclo, proporcionando assim numa poupança total de 4824€/ano.

Sendo o investimento necessário para adquirir os equipamentos de 4000€, e tendo em conta a poupança anual referida anteriormente, o período de recuperação do investimento é de aproximadamente 10 meses.

Como propostas para trabalhos futuros aconselha-se a realização de estudos energéticos noutras secções da fábrica, como por exemplo no *enchimento*, na *cozedura* e na *vidragem* de modo a que haja uma utilização cada vez mais eficiente da energia consumida.

8 Referências

- [1] www.valadares.com (acedido em 05/03/2010).
- [2] www.apicer.pt (acedido em 10/03/2010).
- [3] www.wikipedia.org (acedido em 05/05/2010).
- [4] www.edp.pt (acedido em 10/06/2010).
- [5] Manual de Secagem de Sólidos, Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Melo, L., Outubro de 1979;
- [6] SEMINÁRIO, O Gesso Cerâmico cod: MD-004/03, Maria Teresa Freire; Fabrica Cerâmica de Valadares, Edição Junho de 2003;
- [7] Manuais de apoio á disciplina de Fontes e Conversão de Energia, Edição de 2009, Instituto Superior de Engenharia do Porto;
- [8] Gil, M. Gabriela, “Dimensionamento e optimização de equipamentos e utilidades”, 2005/2006.
- [9] Hougen, Watson, Ragatz, “Princípios dos processos químicos - I parte”, Lopes da Silva Editora, 1984;
- [10] Formulário da Direcção Geral de Energia e Geologia para balanços de energia a equipamentos industriais, no âmbito da Regulamentação legal de Gestão de Energia (RGCE), 1986.
- [11] Johnson, C, 1990. Controlo de processos: Tecnologia da Instrumentação, Fundação Calouste Gulbenkian.
- [12] Gastar, C, 2004 Eficiência energética na Industria. Adene - Cursos de utilização racional de energia.

Anexos

Anexo A – Evolução da Temperatura e Humidade relativa fornecido pelo fabricante da estufa

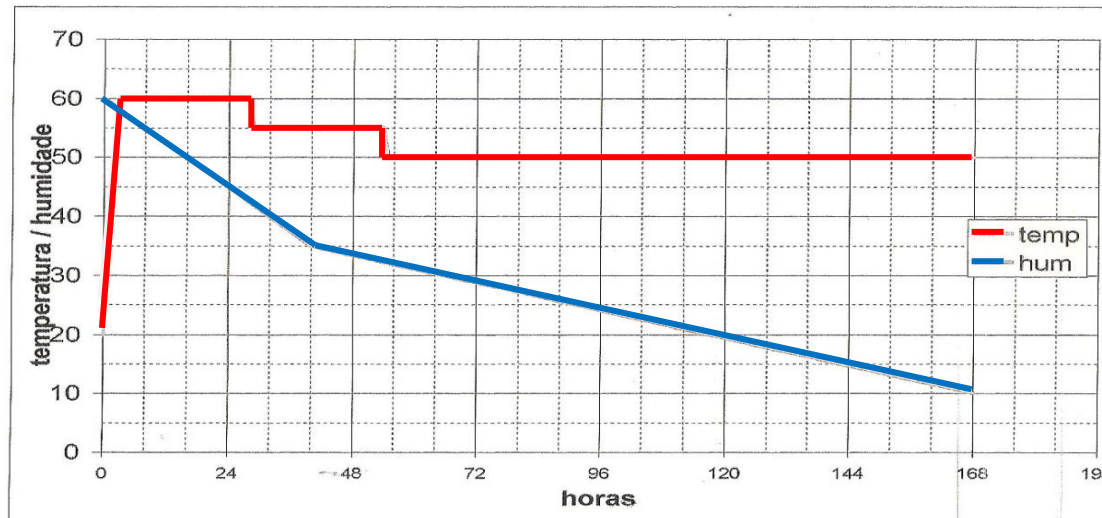


PROGRAMA DAS ESTUFAS DE MOLDES

Programa NORMAL

Seg.	Temperatura	%Humidade
PR1	3 hr	step
OR1	3 -	--
PL1	60°	60%
FD1	25 hr	00 hr
OD1	3 -	--
PR2	1 hr	40 hr
OR2	3 -	--
PL2	55°	35%
PD2	25 hr	00 hr
OD2	3 -	--
PR3	1 hr	135hr
OR3	3 -	--
PL3	50°	5%
PD3	120hr	00 hr
OD3	3 -	--
PR4	end	end
OR4		
PL4		
PD4		
OD4		

temporizador final de 90 minutos
Pressão queimadores: 2,5 mbar (abertura máxima)



GP02-R079-1 - Página 1

Realizado por  em 26/2/08

Figura A 1 - Evolução de Temperatura e Humidade relativa do processo de secagem das estufas

Anexo B – Características do anemómetro utilizado para as medições da velocidade do ar

Tabela B 1 – Características do anemómetro digital

Anemómetro	RS232
Modelo	LCD 8903
Marca	Air Flow
Fonte de alimentação	Uma bateria 9V PP3 ou equivalente
Duração da bateria	100 Horas de contínuo uso
Pressão Barométrica	500mbar até 2 bar
Temperatura	-10°C até 50°C
Velocidade	0,4-30 m/s
Precisão	a 20°C e 1013 mbar - $\pm 2\%$
Dimensões totais	183x76x45 mm
Peso	280g

Anexo C – Características do Termo-Higrômetro e do Termómetro utilizado para as medições da Temperatura e humidade

Tabela C 1 - Características do Termo-Higrômetro

Termo-Higrômetro	RS203
Modelo	LCD 8711
Marca	Air Flow
Fonte de alimentação	Uma bateria 9V PP3 ou equivalente
Duração da bateria	100 Horas de contínuo uso
Humidade	5%-95%
Temperatura	-10°C até 50°C
Precisão	a 25°C e 20-90% ± 3%
Dimensões totais	183x76x45mm

Tabela C 2 – Características do Termómetro laser

Termómetro	TN 2
Saída máxima	<1Mw
Comprimento de Onda	650 nm
Produto laser de classe 2	60825-1: 1993

Anexo D – Ficha de dados de segurança do combustível (gás natural) [2]

Tabela D 1 – Dados sobre a composição do gás natural

GÁS NATURAL	Símbolo	Massa molecular (g/mol)	ρ (kg/m ³)	%(V/V)	Fracção Mássica
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	-	0,20	0,0054
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,80	-	-
Hidrogénio	H ₂	2,02	1,12	-	-
Metano	CH ₄	16,05	1,39	83,70	0,71
Etano	C ₂ H ₆	30,07	0,74	7,60	0,12
Propano	C ₃ H ₈	44,10	0,50	1,90	0,045
n Butano	C ₄ H ₁₀	58,12	0,37	0,40	0,012
i Butano	C ₄ H ₁₀	8,12	-	0,30	0,0093
n Pentano	C ₅ H ₁₂	72,00	-	0,10	0,0034
i Pentano	C ₅ H ₁₂	72,00	-	0,10	0,0031
n Hexano	C ₆ H ₁₄	86,00	-	0,10	0,0037
n Heptano	C ₇ H ₁₆	100,00	-	-	-
n Octano	C ₈ H ₁₈	114,00	-	-	-
n Nonano	C ₉ H ₂₀	128,00	-	-	-
n Decano	C ₁₀ H ₂₂	142,00	-	-	-
Oxigénio	O ₂	32,00	0,70	-	-
Azoto	N ₂	28,16	0,80	5,60	0,084
Água	H ₂ O	18,02	1,24	-	-

Tabela D 2 - Principais Características Físicas do Gás Natural

Limite superior de inflamabilidade (%v/v)		15 Metano	
Poder Calorífico	Superior	PCS	10 032 kcal/m ³
			42,0 MJ/m ³
	Inferior	PCI	9 054 kcal/m ³
			37995kJ/kg
Densidade (kg/m ³)		0,8547	
Densidade Relativa (ao ar)		0,65	
Densidade do vapor		0,55 (Metano)	
Temperatura (°C)		20	

Tabela D 3 - Registo dos valores da combustão estequiométrica do gás natural

	Ar Estequiométrico (kg/kgcomb)			Gases Secos (kg/kgcomb)			Humidade (kg/kgcomb)		
	O ₂ Nec.	N ₂ Nec.	Ar Nec.	CO ₂ prod	SO ₂ prod	N ₂ Gases	H ₂ O	Gases Secos Gs	Gases Totais Gt
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,005	-	0,00	-	2,63	2,63
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	-	-	-
H ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	-
CH ₄	3,27	9,41	12,26	1,96	-	9,41	1,60	-	-
C ₂ H ₆	0,26	1,50	1,95	0,36	-	1,50	0,22	-	-
C ₃ H ₈	0,11	0,54	0,70	0,14	-	0,54	0,07	-	-
C ₄ H ₁₀	0,11	0,15	0,19	0,037	-	0,15	0,02	-	-
C ₅ H ₁₀	0,07	0,11	0,14	0,028	-	0,11	0,01	-	-
C ₆ H ₁₂	0,01	0,040	0,05	0,011	-	0,040	0,01	-	-
C ₇ H ₁₂	0,01	0,04	0,05	0,009	-	0,040	0,00	-	-
C ₆ H ₁₄	0,01	0,04	0,06	0,011	-	0,040	0,01	-	-
C ₇ H ₁₆	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	-
C ₈ H ₁₈	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	-
C ₉ H ₂₀	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	-
C ₁₀ H ₂₂	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	-
S	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	0,00
O ₂	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
N ₂	-	-	-	-	-	0,080	0,14	12,99	12,99
H ₂ O	-	-	-	-	-	-	0,00	-	2,27
TOTAL	3,92	12,99	16,92	2,63	0,00	12,99	2,27	15,63	17,90

Tabela D 4 - Composição em massa e volume dos gases húmidos, para cada valor de excesso de ar

Excesso de Ar	Ar Seco			Gás Seco		Composição de Gases Combustão (secos)								Ar Total (cf H2O do Ar)		Volume Gases (Húmidos)		Composição de Gases Combustão (húmidos)									
	zO ₂	zAs	VAs	zGs	VGs	%CO ₂	%SO ₂	%N ₂	%O ₂	%CO ₂	%SO ₂	%N ₂	%O ₂	zAr	VAr	zGt	VGt	%CO ₂	%SO ₂	%N ₂	%O ₂	%H ₂ O	%CO ₂	%SO ₂	%N ₂	%O ₂	%H ₂ O
	Kg/Kg	Kg/Kg	m ³ /Kg	Kg/Kg	m ³ /Kg	Kg/Kg	Kg/Kg	Kg/Kg	Kg/Kg	m ³ /m ³	m ³ /m ³	m ³ /m ³	m ³ /m ³	Kg/Kg	m ³ /Kg	Kg/Kg	m ³ /Kg	Kg/Kg	Kg/Kg	Kg/Kg	Kg/Kg	Kg/Kg	m ³ /m ³	m ³ /m ³	m ³ /m ³	m ³ /m ³	Kg/Kg
1	3,92	16,32	13,08	15,63	11,75	0,17	0,00	0,83	0,00	0,12	0,00	0,88	0,00	17,05	13,08	17,30	14,40	0,15	0,00	0,73	0,00	0,13	0,10	0,00	0,72	0,00	0,18
1,05	4,12	17,76	13,74	16,47	12,40	0,16	0,00	0,83	0,01	0,11	0,00	0,88	0,01	17,9	13,74	18,75	15,06	0,14	0,00	0,73	0,01	0,12	0,09	0,00	0,72	0,01	0,18
1,1	4,32	18,61	14,39	17,32	13,05	0,15	0,00	0,83	0,02	0,11	0,00	0,87	0,02	18,76	14,39	19,60	15,72	0,13	0,00	0,73	0,02	0,12	0,09	0,00	0,72	0,02	0,17
1,15	4,51	19,45	15,04	18,16	13,71	0,15	0,00	0,82	0,03	0,10	0,00	0,87	0,03	19,61	15,04	20,46	16,38	0,13	0,00	0,73	0,03	0,11	0,09	0,00	0,73	0,03	0,16
1,2	4,71	20,30	15,7	19,01	14,36	0,14	0,00	0,82	0,04	0,10	0,00	0,86	0,04	20,46	15,7	21,31	17,05	0,12	0,00	0,73	0,04	0,11	0,08	0,00	0,73	0,04	0,16
1,25	4,91	21,14	16,35	19,86	15,02	0,13	0,00	0,82	0,05	0,09	0,00	0,86	0,05	21,31	16,35	22,16	17,71	0,12	0,00	0,73	0,05	0,10	0,08	0,00	0,73	0,04	0,15
1,3	5,1	21,99	17,01	20,70	15,67	0,13	0,00	0,82	0,06	0,09	0,00	0,86	0,06	22,17	17,01	23,01	18,37	0,11	0,00	0,73	0,06	0,10	0,08	0,00	0,73	0,05	0,14
1,35	5,3	22,84	17,66	21,55	16,32	0,12	0,00	0,81	0,06	0,09	0,00	0,85	0,07	23,02	17,66	23,87	19,03	0,11	0,00	0,73	0,06	0,10	0,07	0,00	0,73	0,06	0,14
1,4	5,49	23,68	18,31	22,39	16,98	0,12	0,00	0,81	0,07	0,08	0,00	0,85	0,07	23,87	18,31	24,72	19,69	0,11	0,00	0,74	0,07	0,09	0,07	0,00	0,74	0,06	0,14
1,45	5,69	24,53	18,97	23,24	17,63	0,11	0,00	0,81	0,08	0,08	0,00	0,85	0,08	24,72	18,97	25,57	20,35	0,10	0,00	0,74	0,07	0,09	0,07	0,00	0,74	0,07	0,13
1,5	5,89	25,37	19,62	24,08	18,29	0,11	0,00	0,81	0,08	0,08	0,00	0,85	0,09	25,58	19,62	26,42	21,01	0,10	0,00	0,74	0,08	0,09	0,07	0,00	0,74	0,07	0,13
1,55	6,08	26,22	20,28	24,93	18,94	0,11	0,00	0,81	0,09	0,07	0,00	0,85	0,09	26,43	20,28	27,28	21,67	0,10	0,00	0,74	0,08	0,09	0,07	0,00	0,74	0,08	0,12
1,6	6,28	27,07	20,93	25,78	19,59	0,10	0,00	0,81	0,09	0,07	0,00	0,84	0,10	27,28	20,93	28,13	22,33	0,09	0,00	0,74	0,09	0,08	0,06	0,00	0,74	0,08	0,12
1,65	6,48	27,91	21,58	26,62	20,25	0,10	0,00	0,81	0,10	0,07	0,00	0,84	0,10	28,13	21,58	28,98	22,99	0,09	0,00	0,74	0,09	0,08	0,06	0,00	0,74	0,09	0,12
1,7	6,67	28,76	22,24	27,47	20,90	0,10	0,00	0,80	0,10	0,07	0,00	0,84	0,10	28,99	22,24	29,83	23,65	0,09	0,00	0,74	0,10	0,08	0,06	0,00	0,74	0,09	0,11
1,75	6,87	29,60	22,89	28,31	21,56	0,09	0,00	0,80	0,10	0,07	0,00	0,84	0,11	29,84	22,89	30,69	24,31	0,09	0,00	0,74	0,10	0,08	0,06	0,00	0,75	0,10	0,11
1,8	7,06	30,45	23,55	29,16	22,21	0,09	0,00	0,80	0,11	0,06	0,00	0,84	0,11	30,69	23,55	31,54	24,97	0,08	0,00	0,74	0,11	0,08	0,06	0,00	0,75	0,10	0,11
1,85	7,26	31,29	24,2	30,00	22,86	0,09	0,00	0,80	0,11	0,06	0,00	0,84	0,12	31,54	24,2	32,39	25,63	0,08	0,00	0,74	0,11	0,07	0,06	0,00	0,75	0,10	0,10
1,9	7,46	32,14	24,85	30,85	23,52	0,09	0,00	0,80	0,11	0,06	0,00	0,83	0,12	32,4	24,85	33,24	26,29	0,08	0,00	0,74	0,11	0,07	0,05	0,00	0,75	0,11	0,10

Anexo E – Capacidades Caloríficas

Na figura seguinte encontram-se representadas as constantes empíricas utilizadas para o cálculo das capacidades caloríficas do ar, dos gases de combustão e da água [10].

Tabela C. CAPACIDADES CALORÍFICAS MOLARES DE GASES A PRESSÃO ZERO*

$$c_p^* = a + bT + cT^2 + dT^3; (T = ^\circ K) \quad \text{cal / (gmol } ^\circ K)$$

por K. A. Kobe e colaboradores «Thermochemistry for the Petrochemical Industry»

Petroleum Refiner, Jan. 1949 até Nov. 1954

		a	b × 10 ³	c × 10 ⁶	d × 10 ⁹	Intervalo de Temperatura °K	Máx. Erro %	Médio Erro %	
Hidrocarbonetos parafínicos									
Metano	CH ₄	4,750	1,200	0,3030	-2,630	273-1500	1,33	0,57	
Etano	C ₂ H ₆	1,648	4,124	-1,530	1,740	273-1500	0,83	0,28	
Propano	C ₃ H ₈	-0,966	7,279	-3,755	7,580	273-1500	0,40	0,12	
Butano-n	C ₄ H ₁₀	0,945	8,873	-4,380	8,360	273-1500	0,54	0,24	
Isobutano	C ₄ H ₁₀	-1,890	9,936	-5,495	11,92	273-1500	0,25	0,13	
Pentano-n	C ₅ H ₁₂	1,618	10,85	-5,365	10,10	273-1500	0,56	0,21	
Hexano-n	C ₆ H ₁₄	1,657	13,19	-6,844	13,78	273-1500	0,72	0,20	
Hidrocarbonetos monoolefínicos									
Etileno	C ₂ H ₄	0,944	3,735	-1,993	4,220	273-1500	0,54	0,13	
Propileno	C ₃ H ₆	0,753	5,691	-2,910	5,880	273-1500	0,73	0,17	
Buteno-1	C ₄ H ₈	-0,240	8,650	-5,110	12,07	273-1500	0,25	0,18	
Isobuteno	C ₄ H ₈	1,650	7,702	-3,981	8,020	273-1500	0,11	0,06	
cis-2-Buteno	C ₄ H ₈	-1,778	8,078	-4,074	7,890	273-1500	0,78	0,14	
trans-2-Buteno	C ₄ H ₈	2,340	7,220	-3,403	6,070	273-1500	0,54	0,12	
Hidrocarbonetos cicloparafínicos									
Ciclo-pentano	C ₅ H ₁₀	-12,957	13,087	-7,447	16,41	273-1500	1,00	0,25	
Metil-ciclo-pentano	C ₅ H ₁₀	-12,114	15,380	-8,915	20,03	273-1500	0,86	0,23	
Ciclo-hexano	C ₆ H ₁₂	-15,935	16,454	-9,203	19,27	273-1500	1,57	0,37	
Metil-ciclo-hexano	C ₆ H ₁₂	-15,070	18,972	-10,989	24,09	273-1500	0,92	0,22	
Hidrocarbonetos aromáticos									
Benzeno	C ₆ H ₆	-8,650	11,578	-7,540	18,54	273-1500	0,34	0,20	
Tolueno	C ₇ H ₈	-8,213	13,357	-8,230	19,20	273-1500	0,29	0,18	
Etil benzeno	C ₈ H ₁₀	-8,398	15,935	-10,003	23,95	273-1500	0,34	0,19	
Estireno	C ₈ H ₈	-5,968	14,354	-9,150	22,03	273-1500	0,37	0,23	
Cumeno	C ₉ H ₁₀	-9,452	18,686	-11,869	28,80	273-1500	0,36	0,17	
Acetileno e Diolefinas									
Acetileno	C ₂ H ₂	5,21	2,2008	-1,559	4,349	273-1500	1,46	0,59	
Metil acetileno	C ₃ H ₄	4,21	4,073	-2,192	4,713	273-1500	0,36	0,13	
Dimetil acetileno	C ₄ H ₆	3,54	5,838	-2,780	4,974	273-1500	0,70	0,16	
Propadieno	C ₃ H ₄	2,43	4,693	-2,781	6,484	273-1500	0,37	0,19	
Butadieno-1,3	C ₄ H ₆	-1,29	8,350	-5,582	14,24	273-1500	0,91	0,47	
Isopreno	C ₅ H ₈	-0,44	10,418	-6,762	16,93	273-1500	0,99	0,43	
Gases de combustão (intervalo pequeno)									
Nitrogénio	N ₂	6,903	-0,03753	0,1930	-0,6861	273-1800	0,59	0,34	
Oxigénio	O ₂	6,085	0,3631	-0,1709	0,3133	273-1800	1,19	0,28	
Ar		6,713	0,04697	0,1147	-0,4696	273-1800	0,72	0,33	
Hidrogénio	H ₂	6,952	-0,04576	0,09563	-0,2079	273-1800	1,01	0,26	
Monóxido de carbono	CO	6,726	0,04001	0,1283	-0,5307	273-1800	0,89	0,37	
Dióxido de carbono	CO ₂	5,316	1,4285	-0,8362	1,784	273-1800	0,67	0,22	
Vapor de água	H ₂ O	7,700	0,04594	0,2521	-0,8587	273-1800	0,53	0,24	
Gases de combustão (intervalo grande)									
Nitrogénio	N ₂	6,529	0,1488	-0,02271	--	273-3800	2,05	0,72	
Oxigénio	O ₂	6,732	0,1505	-0,01791	--	273-3800	3,24	1,20	
Ar	H ₂	6,557	0,1477	-0,02148	--	273-3800	1,64	0,70	
Hidrogénio	CO ₂	6,424	0,1039	-0,007804	--	273-3800	2,14	0,79	
Dióxido de carbono	CO ₂	Veja nota no fundo da página*				--	273-3800	2,65	0,54
Monóxido de carbono	CO	6,480	0,1566	-0,02387	--	273-3800	1,86	1,01	
Vapor de água	H ₂ O	6,970	0,3464	-0,04833	--	273-3800	2,03	0,66	
Compostos sulfurados									
Enxofre	S ₂	6,499	0,5298	-0,3888	0,9520	273-1800	0,99	0,38	
Dióxido de enxofre	SO ₂	6,157	1,384	-0,9103	2,057	273-1800	0,45	0,24	
Trióxido de enxofre	SO ₃	3,918	3,483	-2,875	7,744	273-1800	0,29	0,13	
Sulfureto de hidrogénio	H ₂ S	7,070	0,3128	0,1364	-0,7867	273-1800	0,74	0,37	
Disulfureto de carbono	CS ₂	7,390	1,489	-1,096	2,760	273-1800	0,76	0,47	
Sulfureto de carbonilo	COS	6,222	1,536	-1,058	2,560	273-1800	0,94	0,49	

* Reimpressão autorizada. No artigo original, as constantes também se dão para T, em graus Celsius, graus Fahrenheit e graus Rankine.

* Equação para CO₂, 273 a 3800 K: $c_p^* = 18,036 - 0,00004474T - 158,08 \sqrt{T}$

Figura E 1 – Valores das constantes empíricas utilizadas para o cálculo das capacidades caloríficas do ar, dos gases de combustão e da H₂O

Anexo F – Recolha dos dados para a medição do caudal de exaustão (Setembro de 2010)

Figura F 1 – Dados da medição do caudal de exaustão

Tubo de Pitot - Sonda	
tipo S	
Tipo Sonda - 1,5m Metal	
Velocidade escoamento:	13,1 m/s
Temperatura do fluido exaustão	39°C
Nº Estufas em operação	5
Diâmetro da Conduta	0,5 M
Secção conduta	0,19625 m ²
Caudal efluente (calculado) (4 estufas)	9255,15 m ³ /h
d	1,25
Q _{total}	11568,94 kg/h
q/estufa	2313,8 kg/h

Anexo G - Carta psicrométrica de baixas Temperaturas

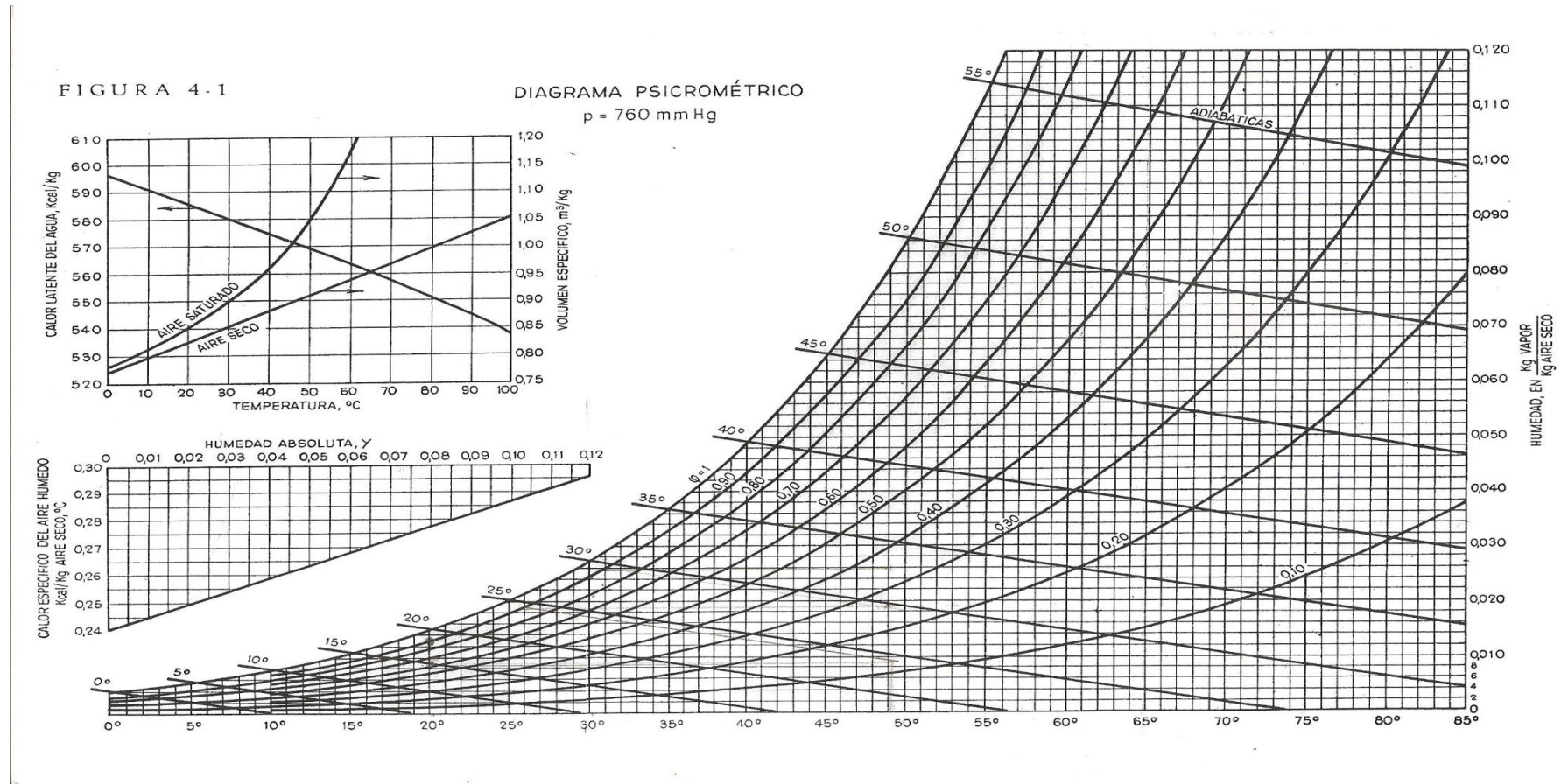


Figura G 1 - Carta psicrométrica de baixas temperaturas [8]

Anexo H – Diagrama do processo de instalação otimizado

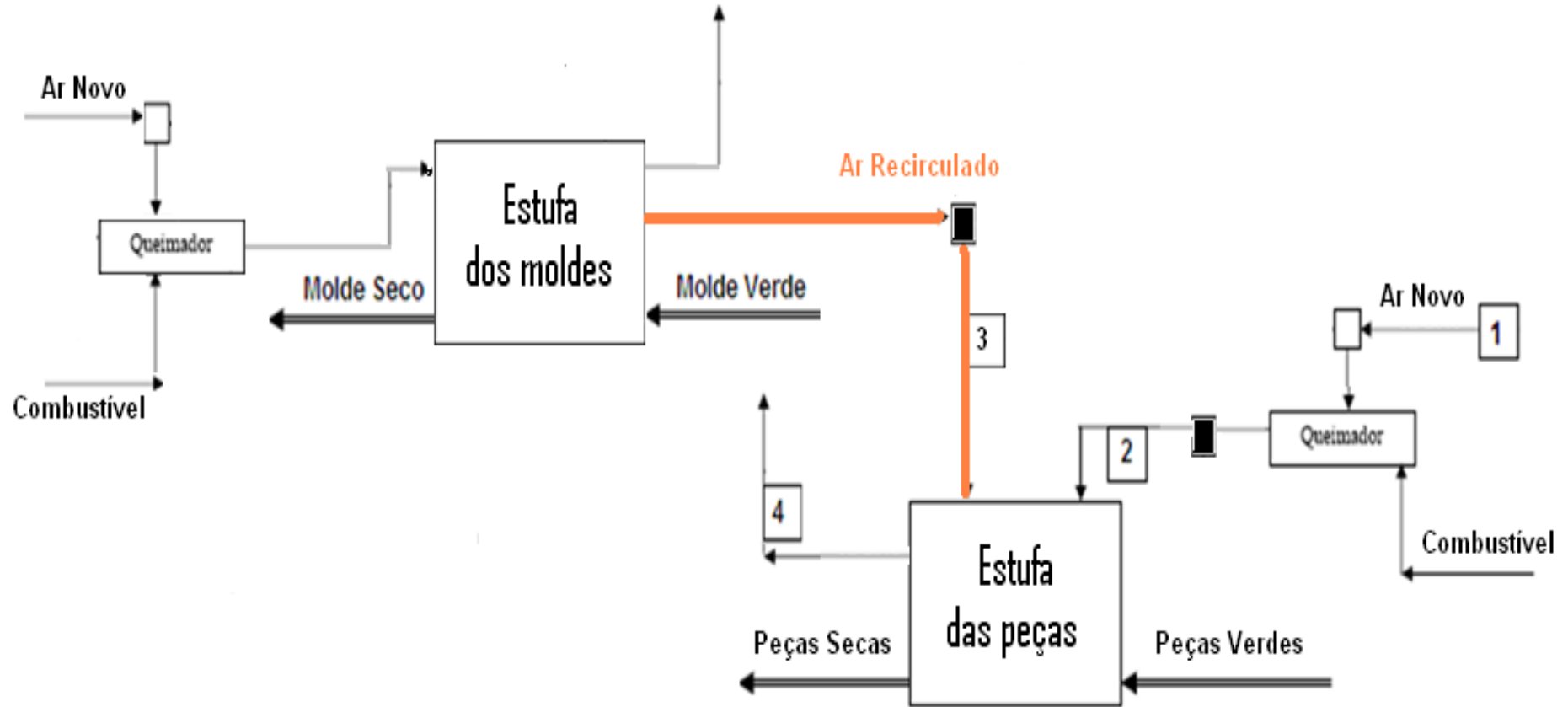


Figura H 1 – Fluxograma do processo de instalação otimizado

Anexo I- Exemplo de cálculo

- Cálculo do caudal mássico de gás natural

$$\dot{m}_{\text{gás natural}} = \frac{\dot{V}(\text{m}^3/\text{ciclo}) \times P(\text{atm}) \times M_{ar}(\text{kg}/\text{kmol})}{T(^{\circ}\text{K}) \times R(\text{m}^3 \cdot \text{atm}/\text{K} \cdot \text{kmol})} = \frac{(371313 - 308060) \times 1,03 \times 28,9}{298 \times 0,082} \Leftrightarrow \quad (\text{A.1})$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{gás natural}} = 146,4 \text{ kg}/\text{ciclo}$$

- Energia de queima:

Para calcular a energia de queima foi necessário determinar previamente o volume de gás consumido normalizado durante a secagem e utilizar o poder calorífico inferior do gás natural (PCI). O cálculo foi realizado através da equação seguinte:

Este exemplo refere-se á estufa dos moldes, para o caudal mássico calculado anteriormente.

$$EQ = PCI(\text{MJ}/\text{kg}) \times \dot{m}_{\text{gás natural}}(\text{kg}/\text{ciclo}) = 44454 \times 146,35 = 6,51 \times 10^6 \text{ MJ}/\text{ciclo} \quad (\text{A.2})$$

- Consumo específico de energia da estufa:

O consumo específico da estufa foi determinado apenas para uma estufa utilizando o valor de energia de queima, calculado anteriormente, e o da massa de moldes à entrada da estufa. Este é dado pela expressão seguinte:

Este cálculo foi também feito para um ciclo de secagem, para uma determinada carga de louça.

$$Cons_{esp} = \frac{EQ(\text{MJ})}{\dot{m}_{\text{moldes}}(\text{kg}/\text{ciclo})} = \frac{6,51 \times 10^6}{(15548 - 10664)} = 6,01 \times 10^5 \text{ MJ}/\text{kg ciclo} \quad (\text{A.3})$$

É de notar que os valores do consumo específico e da energia de queima apresentados anteriormente são resultantes de uma das medições do consumo de gás natural realizadas.

➤ **Balanc  de Energia   estufa dos moldes:**

○ Correntes de Entrada

▪ Caudal térmico de combustão - Gás natural

$$Q_{g s\ natural} = \dot{m}_{g s\ natural} (kg/ciclo) \times [PCI(kJ/kg) + (Cp_{g s\ natural} (kJ/kgK) \times (T_{g s\ natural} (K) - T_r (K)))] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Q_{g s\ natural} = 146,35 \times (44454 + (2,00 \times (298 - 273))) = 6,51 \times 10^6\ kJ/ciclo \quad (A.4)$$

▪ Caudal térmico da energia eléctrica

$$Pe = I(A) \times \cos\theta \times \sqrt{3} \times Volt(V) = 14 \times \cos 0,98 \times \sqrt{3} \times 380 = 9\ kJ/s \quad (A.5)$$

$$Q_e = Pe(kJ/s) \times 3600 (s/h) = 9 \times 3600 = 3,25 \times 10^4\ kJ/ciclo \quad (A.6)$$

▪ Caudal térmico do ar de combustão

$$Q_{ar\ comb} = \dot{m}_{ar\ comb} \times [Cp_{ar\ comb} \times (T_{ar} - T_r)] + w_{ar\ comb} \times [Cp_{vapH_2O} \times (T_{ar} - T_r) + \lambda_{vapH_2O}] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Q_{ar\ comb} = 2476 \times (0,99 \times (293 - 273) + 0,008 \times (1,84 \times (293 - 273) + 2480)) = 9,89 \times 10^4\ kJ/ciclo \quad (A.7)$$

Para o cálculo do caudal mássico de ar de combustão, aplica-se a seguinte equa o:

$$\dot{m}_{ar\ comb} = \dot{m}_{g s\ natural} \times (\dot{m}_{ar} / \dot{m}_{comb})_{est} (kg_{ar} / kg_{comb})$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{ar\ comb} = 146,35 \times 16,92 = 2476\ kg/ciclo \quad (A.8)$$

▪ Caudal térmico dos gases de combustão

$$Q_{gases\ comb} = Q_{g s\ natural} + Q_{ar\ comb} \quad (A.9)$$

$$\Leftrightarrow Q_{gases\ comb} = 6,51 \times 10^6 + 9,89 \times 10^4 = 6,61 \times 10^6\ kJ/ciclo$$

Para o cálculo do caudal mássico dos gases de combustão obt m-se pela equa o:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{gases\ comb(kg/ciclo)} &= \dot{m}_{g s\ natural} + \dot{m}_{ar\ comb} \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{gases\ comb} &= 146,35 + 2476 = 2622kg/ciclo\end{aligned}\quad (A.10)$$

- Caudal térmico do ar ventilado

$$\begin{aligned}Q_{ar\ ventilado} &= \dot{m}_{ar\ ventilado(kg/ciclo)} \times [Cp_{ar\ ventilado(kJ/kgK)} \times (T_{ar\ ventilado(K)} - T_r(K))] + w_{ar\ ventilado(kg_{H_2O}/kg_{ar\ seco})} \times [Cp_{vapH_2O(kJ/kgK)} \times \\ &\times (T_{ar\ ventilado(K)} - T_r(K)) + \lambda_{vapH_2O(kJ/kg)}] \Leftrightarrow \\ Q_{ar\ ventilado} &= 386094 \times (0,99 \times (293 - 273) + 0,008 \times (1,84 \times (293 - 273) + 2480)) = 1,21 \times 10^8\ kJ/ciclo\end{aligned}\quad (A.11)$$

Através da recolha dos dados para o cálculo do caudal de exaustão verifica-se que:

- $\dot{m}_{ar\ seco/estufa} = 2314\ kg/h$

Para o cálculo do caudal mássico do ar ventilado é:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{gases\ secos(kg/ciclo)} &= \dot{m}_{ar\ seco} \times t_{ciclo}(horas) \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{gases\ secos} &= 2314 \times 168 = 388716kg/ciclo\end{aligned}\quad (A.12)$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{ar\ ventilado(kg/ciclo)} &= \dot{m}_{gases\ secos} - \dot{m}_{gases\ comb} \\ \Leftrightarrow \dot{m}_{ar\ ventilado} &= 388716 - 2622 = 386094kg/ciclo\end{aligned}\quad (A.13)$$

- Caudal térmico associado aos moldes

$$\begin{aligned}Q_{moldes} &= (\dot{m}_{moldes(kg/ciclo)} \times Cp_{moldes(kJ/kg^\circ C)} + \dot{m}_{H_2O(kg/ciclo)} \times Cp_{H_2O(kJ/kg^\circ C)}) \\ &\times (T_{moldes(^\circ C)} - T_r(^\circ C)) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Q_{moldes} &= 15548 \times 1,5 + 4884 \times 1,84 \times (20 - 0) = 6,46 \times 10^5\ kJ/ciclo\end{aligned}\quad (A.14)$$

○ Correntes de Saída

- Caudal térmico do ar de exaustão á saída da estufa

$$\begin{aligned}
 Q_{ar\ exaustão} &= \dot{m}_{ar\ exaustão} \times (Cp_{ar(kJ/kgK)} \times (T_{ar\ exaustão(K)} - T_{r(K)})) + w_{ar\ exaustão(kg_{H_2O}/kg_{ar\ seco})} \times (Cp_{vapH_2O(kJ/kgK)} \\
 &\times (T_{ar\ exaustão(K)} - T_{r(K)}) + \lambda_{vapH_2O(kJ/kg)}) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow Q_{ar\ exaustão} &= 393786 \times (1,10 \times (310 - 273) + 0,0134 \times (1,84 \times (310 - 273) + 2480)) = 1,51 \times 10^8\ kJ/ciclo
 \end{aligned}
 \tag{A.15}$$

Para o cálculo do caudal mássico de água nos moldes e no ar é:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{H_2O\ evap} &= \dot{m}_{molde\ verdes} - \dot{m}_{molde\ secos} \\
 \Leftrightarrow \dot{m}_{H_2O\ evap} &= 15548 - 10664 = 4884\ kg/ciclo
 \end{aligned}
 \tag{A.16}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{H_2O\ comb} &= (\dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_{comb})_{est} (kg_{ar} / kg_{comb}) \times \dot{m}_{gás\ natural} \\
 \Leftrightarrow \dot{m}_{H_2O\ evap} &= 2,27 \times 146,35 = 332\ kg/ciclo
 \end{aligned}
 \tag{A.17}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{H_2O} &= \dot{m}_{H_2O\ evap} + \dot{m}_{H_2O\ comb} \\
 \Leftrightarrow \dot{m}_{H_2O} &= 4884 + 332 = 5216\ kg/ciclo
 \end{aligned}
 \tag{A.18}$$

Assim, para o cálculo caudal mássico dos gases de exaustão baseia-se em:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{gases\ exaustão} &= \dot{m}_{ar\ comb} + \dot{m}_{ar\ ventilado} + \dot{m}_{H_2O} \\
 \Leftrightarrow \dot{m}_{gases\ exaustão} &= 2476 + 386094 + 5216 = 393786\ kg/ciclo
 \end{aligned}
 \tag{A.19}$$

O cálculo da humidade específica do ar de exaustão é:

$$w_{ar\ exaustão} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{gases\ exaustão}} = \frac{5216}{388716} = 0,0134
 \tag{A.20}$$

Após a mistura do ar de combustão com o ar ventilado, obtém-se a temperatura média dos gases de exaustão ponderada, ou seja:

$$T_{exaustão}(^{\circ}C) = \frac{Q_{ar\ ventilado} + Q_{gases\ comb}}{\dot{m}_{gases\ exaustão} \times Cp_{gases\ exaustão}} = \frac{1,21 \times 10^8 + 9,89 \times 10^4}{388716 \times 1,12} = 37^{\circ}C
 \tag{A.21}$$

- Perdas de calor em superfícies quentes - Perdas por radia o e convec o

Apresenta-se seguidamente o exemplo do cálculo feito para as leituras da temperatura ao longo da parede direita [6].

- **Radia o**

$$h_{rad} = 20,4 \times \varepsilon \times \frac{\left(\frac{T_{parede\ exterior} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{amb} + 273}{100}\right)^4}{(T_{parede} - T_{amb})} \quad (A.22)$$

$$\Leftrightarrow h_{rad} = 20,4 \times 0,85 \times \frac{\left(\frac{22,6 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100}\right)^4}{(23,1 - 20)} = 17,7 \text{ kJ} / (\text{h m}^2 \text{ K})$$

Assim, podemos calcular a resistência por radia o da parede do lado este, ou seja:

$$R_{rad} = \frac{1}{(h_{rad} \times A_{ext})} = \frac{1}{17,7 \times 6,93} = 8,15 \times 10^{-3} \text{ h} \cdot \text{K} / \text{kJ} \quad (A.23)$$

- **Convec o**

Estes cálculos foram feitos através de interpola es m dias entre temperaturas e com o auxílio da tabela J 1, que se encontra no anexo J [8].

$$T_m = \frac{T_{parede} + T_{amb}}{2} = \frac{44,75 + 20}{2} = 32,4^\circ \text{ C} \quad (A.24)$$

Convec o natural

$$Gr = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times d^3}{\nu^2} = \frac{3,2802 \times 10^{-3} \times 9,81 \times 12,4 \times 4,4^3}{(1,87670 \times 10^{-5})^2} = 1,29 \times 10^{11} \quad (A.25)$$

$$\frac{h_{conv} \times d}{K} = Nu = C(Gr Pr)^m$$

$$\frac{h_{conv} \times 4,4}{0,026596} = 0,27 \times (1,29 \times 10^{11} \times 0,7066)^{0,25} \Leftrightarrow h_{conv} = 0,87 \text{ kJ} / \text{h.m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{A.26})$$

No caso da parede do lado este, o cálculo da resistência aplica-se da seguinte forma:

$$R_{conv} = \frac{1}{(h_{conv} \times A_{ext})} = \frac{1}{0,87 \times 6,93} = 0,17 \text{ h.K} / \text{kJ} \quad (\text{A.27})$$

De seguida, para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor tem-se as equações seguintes:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{rad}} + \frac{1}{R_{conv}} \Leftrightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{8,15 \times 10^{-3}} + \frac{1}{0,17}$$

$$R_{eq} = 8,15 \times 10^{-3} = \text{h.K} / \text{kJ} \quad (\text{A.28})$$

$$U_{global} = \frac{1}{(R_{eq} \times A_{ext})} = \frac{1}{8,15 \times 10^{-3} \times 6,93} = 20 \text{ kJ} / (\text{h.m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A.29})$$

Por fim, poderemos calcular o caudal térmico das paredes verticais, nomeadamente a parede este é:

$$\dot{Q}_{parede} = U_{global} (\text{kJ} / (\text{h.m}^2 \cdot \text{K})) \times A_{pd} (\text{m}^2) \times (\bar{T}_{ext} - \bar{T}_{amb}) (\text{K}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{Q}_{parede} = 20 \times 6,93 \times (44,75 - 20) = 3716 \text{ kJ} / \text{ciclo} \quad (\text{A.30})$$

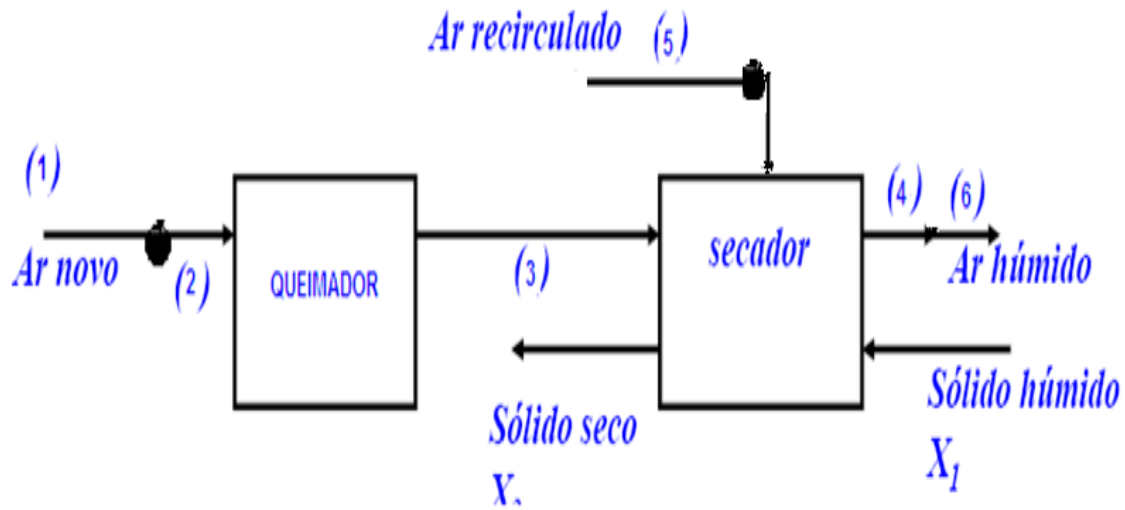
- Caudal térmico de moldes na estufa

$$Q_{moldes} = (\dot{m}_{moldes} (\text{kg} / \text{ciclo}) \times Cp_{moldes} (\text{kJ} / \text{kg}^\circ \text{C}) + \dot{m}_{H_2O} (\text{kg} / \text{ciclo}) \times Cp_{H_2O} (\text{kJ} / \text{kg}^\circ \text{C}))$$

$$\times (T_{moldes} (\text{°C}) - T_r (\text{°C})) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Q_{moldes} = (10664 \times 1,5 + 4884 \times 1,84) \times (45 - 0) = 7,28 \times 10^5 \text{ kJ} / \text{ciclo} \quad (\text{A.31})$$

➤ **Optimização Energética das estufas:**



NOTA - Foram efectuados os mesmos cálculos para a estufa de secagem das peças cerâmicas, porém neste caso o ciclo de secagem é de 12 horas e um consumo de combustível de $m_{\text{gás natural}}=1 \text{ kg/h}$.

➤ **Avaliação Económica**

• **Poupanças resultantes devido á implementação do recuperador de calor**

A poupança nas estufas é resultante da redução do caudal térmico consumido de $2,67 \times 10^5$ kJ/ciclo na secagem, contabilizando os 60 ciclos por mês que passam a ser efectuados e um preço do gás natural de $0,60 \text{ €/Nm}^3$, fornecido pelo site da edp.

Para o cálculo do caudal de gás natural que é poupado na secagem das peças, este baseia-se em:

$$\dot{m}_{\text{gás consumido}} = \frac{\dot{m}_{\text{gás natural}} \text{redzida}(\text{kJ} / \text{ciclo})}{\text{PCI}(\text{kJ} / \text{Nm}^3)} = \frac{2,67 \times 10^5}{37995} = 7 \text{ kg} / \text{ciclo} \quad (33)$$

$$\text{Poupança}_{\text{gás natural}} = \dot{m}_{\text{gás consumido}} \times \text{preço}_{\text{gás natural}} (\text{€} / \text{Nm}^3) = 7 \times 0,60 = 4,22 \text{ €} / \text{ciclo} \quad (34)$$

$$\text{Poupança}_{\text{gás natural}} = 4,22 \times 104 (\text{ciclos} / \text{mês}) = 439 \text{ €} / \text{mês} = 4824 \text{ €} / \text{ano}$$

• **Tempo de retorno do investimento**

Sendo o investimento realmente suportado pela empresa de 4000€ e a poupança conseguida pela implementação do recuperador de calor nas estufas dos moldes de 4824€/ano, o tempo de retorno do investimento é dado por:

$$t_{\text{retorno}} = \frac{\text{Investimento}(\text{€})}{\text{Poupança}_{\text{total}}(\text{€} / \text{ano})} = \frac{4000}{4824} = 0,83 \text{ anos} = 10 \text{ meses} \quad (35)$$

• **Custo do ciclo de secagem**

$$\text{Custo do ciclo de secagem} = \frac{Q_{\text{gás natural}}}{\text{PCI}(\text{kJ} / \text{Nm}^3)} = \frac{5,34 \times 10^6}{37995} = 40 \text{ Nm}^3 / \text{ciclo} \quad (36)$$

$$\Leftrightarrow 40 \frac{\text{Nm}^3}{\text{ciclo}} \times 0,60 \frac{\text{euros}}{\text{Nm}^3} \times 2 \text{ estufas} \times 2 \frac{\text{ciclos}}{\text{dia}} \times 30 \frac{\text{dias}}{\text{mês}} = 877 \text{ euros} / \text{mês}$$

Anexo J - Perdas de calor pelas superfícies da estufa

Tabela J 1 - Valores calculados do coeficiente global de transferência de calor por convecção e radiação da estufa 1.

Parede	Comprimento (m)	Espessura (m)	Área (m ²)	h_{conv} (kJ/h.m ² °K)	h_{rad} (kJ/h.m ² °K)	Perdas calor (kJ/ciclo)
Lado este	0	0,3	6,93	-	-	-
	1,575			0,52	17,68	2793
	3,15			0,53	17,70	3021
	4,725			0,53	17,71	3330
	6,3			0,55	17,74	3560
					17,71	3176
Lado oeste	0	0,3	6,93	-	-	-
	1,575			0,52	17,68	2471
	3,15			0,53	17,70	2907
	4,725			0,52	17,68	3383
	6,3			0,51	17,67	3795
						3139
Tecto	0	0,24	7,02	-	-	-
	1,575			0,50	17,64	3237
	3,15			0,50	17,64	3798
	4,725			0,50	17,65	3910
	6,3			0,50	17,64	3897
						3711
Lado norte	0	0,3	4,91	-	-	-
	1,12			0,50	17,66	2506
	2,23			0,51	17,66	2669
	3,35			0,50	17,65	2713
	4,46			0,52	17,68	2749
						2659
Lado sul	0	0,04	4,91	-	-	-
	1,12			0,76	18,54	3099
	2,23			0,75	18,52	3171
	3,35			0,74	18,45	3175
	4,46			0,75	18,51	3204
					18,51	3162
Chão	0	-	7,02	-	-	-
	1,575			0,32	17,48	3414
	3,15			0,32	17,48	3809
	4,725			0,32	17,48	3911
	6,3			0,32	17,48	3813
						3737

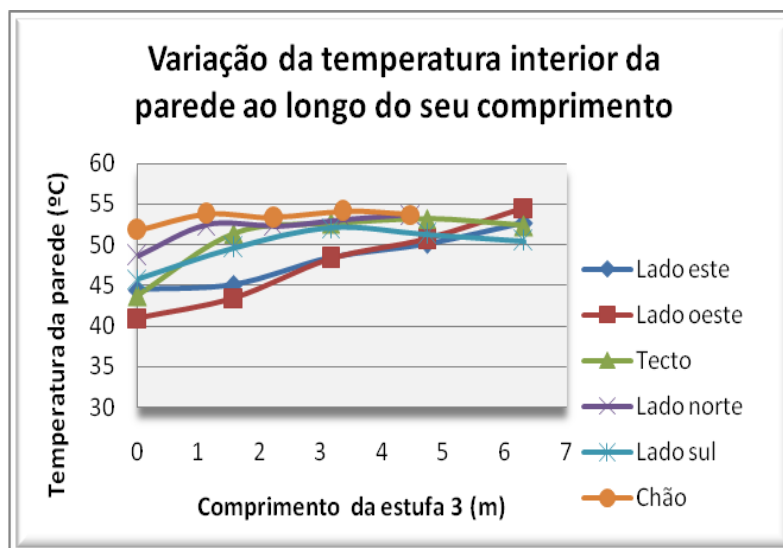


Figura J 1 - Evolução da temperatura das paredes do lado direito, esquerdo, do tecto, atrás, do chão á frente ao longo do comprimento da estufa 1.

Tabela J 2 - Registo do calor perdido pelas superfícies da estufa.

Parede	Perdas de calor (kJ/ciclo)
Lado este	3,18E+03
Lado oeste	3,14E+03
Tecto	3,71E+03
Lado norte	2,66E+03
Lado sul	3,16E+03
Chão	3,74E+03
SOMA	1,96E+04

Efectuou-se de igual modo estes cálculos para as estufas de secagem de peças cerâmicas, onde a única diferença consiste no ciclo de secagem (12 horas) e consequente massa de gás natural gasto (1 kg/h).

Anexo K – Propriedades físicas do ar à pressão de 101,325KPa [9]

Tabela K 1 – Propriedades físicas do ar.

A.3-3 Physical Properties of Air at 101.325 kPa (1 Atm Abs), SI Units

T (°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \times 10^5$ (Pa·s, or kg/m·s)	k (W/m·K)	N_{Pr}	$\beta \times 10^3$ (1/K)	$g\beta\rho^2/\mu^2$ (1/K·m ³)
-17.8	255.4	1.379	1.0048	1.62	0.02250	0.720	3.92	2.79×10^8
0	273.2	1.293	1.0048	1.72	0.02423	0.715	3.65	2.04×10^8
10.0	283.2	1.246	1.0048	1.78	0.02492	0.713	3.53	1.72×10^8
37.8	311.0	1.137	1.0048	1.90	0.02700	0.705	3.22	1.12×10^8
65.6	338.8	1.043	1.0090	2.03	0.02925	0.702	2.95	0.775×10^8
93.3	366.5	0.964	1.0090	2.15	0.03115	0.694	2.74	0.534×10^8
121.1	394.3	0.895	1.0132	2.27	0.03323	0.692	2.54	0.386×10^8
148.9	422.1	0.838	1.0174	2.37	0.03531	0.689	2.38	0.289×10^8
176.7	449.9	0.785	1.0216	2.50	0.03721	0.687	2.21	0.214×10^8
204.4	477.6	0.740	1.0258	2.60	0.03894	0.686	2.09	0.168×10^8
232.2	505.4	0.700	1.0300	2.71	0.04084	0.684	1.98	0.130×10^8
260.0	533.2	0.662	1.0341	2.80	0.04258	0.680	1.87	0.104×10^8

