

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS FORNOS DE UMA INDÚSTRIA DO SECTOR CERÂMICO

JOANA ALVES FERREIRA DA CRUZ

Mestrado em Engenharia Química
Ramo Optimização Energética na Indústria Química
Julho 2009



OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS FORNOS DE UMA INDÚSTRIA DO SECTOR CERÂMICO

Trabalho realizado por:

Joana Alves Ferreira da Cruz

Nº 1030714

Orientadores:

Doutora Anabela Guedes (ISEP)

Doutora Simone Morais (ISEP)

Eng. Henrique Barros (Valadares)

Agradecimentos

Queria desde já agradecer todo o apoio disponibilizado por parte da Direcção e todos os colaboradores da Fábrica Cerâmica de Valadares, em especial ao Eng. Henrique Barros e Eng. Vítor Chaves.

Gostava também de demonstrar toda a gratidão para com as orientadoras desta dissertação, a Doutora Anabela Guedes e a Doutora Simone Morais.

Resumo

O sector cerâmico em Portugal representa aproximadamente 14% do consumo energético na Indústria transformadora. Neste, a energia representa entre 11 e 17% dos custos de fabrico, tendo um peso relevante na moagem, secagem, climatização e sobretudo na Cozedura (60% do total), pelo que a optimização dos consumos é crucial.

Os materiais refractários como a Cordierite e Mulite, são os mais usados nos fornos, quer como revestimentos isolantes, quer na estrutura das vagonas ou como mobília refractária usada no suporte da cozedura das peças.

Recentemente surgiram outros materiais, com menor inércia térmica e melhores características químicas, como Nitreto de Silício (Si_3N_4) e Carboneto de Silício (SiC), adequados à utilização como mobília refractária.

O objectivo do trabalho consistiu na selecção de materiais refractários que, substituindo os usados até aqui, permitam a minimização da inércia térmica e consequentemente reduzam o consumo de energia. Identificaram-se também os modelos mais adequados à gestão energética, na indústria de louça sanitária.

A execução do trabalho foi suportada no estudo operacional de fornos cerâmicos industriais da *Fábrica Cerâmica de Valadares* e orientada para uma forte componente de aplicação concreta dos resultados do trabalho.

Para tal, realizou-se um levantamento das condições técnicas/operacionais dos equipamentos em estudo e elaborou-se uma ferramenta de simulação em Excel, para balanço energético detalhado e diagnóstico da situação existente. No seguimento, foi efectuada a prospecção de mercado, para elaboração do estudo económico da implementação das medidas sugeridas, nomeadamente, a substituição parcial do material refractário utilizado na cozedura, maioritariamente constituído por Cordierite, por elementos em SiC.

Pôde-se constatar que, houve uma diminuição de massa de refractário de cerca de 44%. O que faz com que haja uma redução do caudal térmico consumido de aproximadamente $1,01 \times 10^6$ kJ/h, possibilitando uma poupança de cerca de 89310 €/ano, em combustível nos dois fornos em estudo. O período de retorno do investimento em material refractário é de 14 meses.

Palavras-Chave: *Indústria de cerâmica, Energia, Material refractário.*

Abstract

The ceramic sector in Portugal represents nearly 14% of the energetic use of the transformer Industry. Energy represents between 11 and 17% of the manufacture expenses, having a relevant importance in grinding, drying, acclimatization and especially in firing (60% of the total value).

Refractory materials like Cordierite and Mullite are the most used in materials in insulating sheath of ovens, in kiln cars structures as well as in their refractory furniture applied to support the firing pieces.

Recently, other materials were developed with less thermal inertia and better chemical characteristics, like Si_3N_4 and SiC , which are appropriate to be use as refractory furniture.

The aim of the work was to select an appropriate refractory material to replace the actually used in order to minimize thermal inertia and maximize energy savings. The execution of this study was supported by an operational work in the ceramic ovens of the *Fábrica Cerâmica de Valadares* and oriented to the concrete application of the obtained results.

With this goal, the operational conditions of the equipments were registered. A simulation tool in Excel was elaborated for detailed energetic balance and to diagnostic the existent situation. Thereafter, a prospection to the materials market was realized to elaborate the economical study of the application of the suggested measures namely, the partial substitution of the refractory material used in firings, mostly constituted by Cordierite, by elements in SiC . These alterations promote a diminution of the refractory mass of nearly 44%, a reduction in the energy consumption of approximately $1,01 \times 10^6$ kJ/h and make possible saving about 89310 €/year. The payback of the investment in the new refractory material is 14 months.

Key Words: *Ceramic Industry, Energy, Refractory Material.*

Índice

1 - Introdução	1
1.1 – Fábrica Cerâmica de Valadares	1
1.2 – Definição de Cerâmica e diversos tipos de Cerâmica	3
1.3 – Cerâmica branca – Louça sanitária	6
1.3.1 - Tipos de louça sanitária	7
1.3.2 - Processo de produção	7
1.3.3 - Matérias – primas da pasta e do vidro.....	8
1.3.4 - Concepção e produção dos modelos, madres e moldes.....	9
1.3.5 - Fabrico de barbotinas (pasta) e vidrados.....	11
1.3.6 - Enchimento	14
1.3.7 - Secagem	16
1.3.8 - Acabamento	17
1.3.9 - Vidragem das peças	17
1.3.10 - Cozedura.....	18
1.4 - Consumo de energia na indústria cerâmica de louça sanitária	28
1.5 - Material refractário utilizado na cozedura da louça sanitária	31
1.5.1 - Refractários de suporte, produtos auxiliares de enfora e de transporte.....	31
1.6 – Fundamentação do trabalho	33
2 - Parte experimental	34
2.1- Fornos para cozedura de louça	34
2.2 – Material refractário utilizado nas vagonas dos fornos	39
2.3 – Material refractário utilizado como “móvel refractário”	42
3 - Processo de cálculo	43
3.1 – Estratégia utilizada na realização dos balanços energéticos	43
3.1.1 - Simulador elaborado.....	51
3.2 - Dados recolhidos para os cálculos	54
3.3 – Consumos energéticos	57
3.4 – Redução de massa de refractário	58
3.5 – Caudais de ar real e parasita: forno 4	59
3.6 – Caudal de ar nos grupos de queima: forno 3i	61
3.7 – Balanço de Energia aos fornos	63
3.8 - Poupanças resultantes da substituição do material refractário	69
3.8.1 - Ganhos energéticos.....	69
3.8.2 - Ganhos técnicos	71

3.9 – Avaliação Económica	72
4 - Resultados e Discussão	73
4.1 – Resultados técnicos	73
4.1.1 - Perdas de calor no forno 3i	73
4.1.2 - Caudal térmico perdido pelas paredes no forno 4.....	74
4.1.2 - Balanço energético ao forno 3i.....	76
4.1.3 - Balanço energético ao forno 4.....	79
4.2– Resultados económicos	81
4.2.1 - Redução da massa de refractário	81
4.2.2 - Redução do caudal térmico consumido.....	83
4.2.3 - Poupanças resultantes.....	84
4.2.4 - Avaliação económica	86
5 - Conclusões	87
6 - Sugestões para trabalhos futuros	89
7 - Lista de Referências	90

Nota: Os Anexos deste relatório são apresentados em separado, devido às suas dimensões.

Índice de figuras

Figura 1 – Fluxograma do processo de produção de louça sanitária.....	8
Figura 2 – Fluxograma da produção de madres.	10
Figura 3 – Madre com molde no seu interior.....	10
Figura 4 – Constituintes dos moldes de bacias.....	11
Figura 5 – Fluxograma da produção de porcelana sanitária.....	12
Figura 6 – Fluxograma do processo de produção do vidro.....	13
Figura 7 – a) Bancas de enchimento das peças; b) bateria de enchimento.	14
Figura 8 – Enchimento manual de peças.....	15
Figura 9 – Máquina de enchimento a alta pressão, fábrica 1.	15
Figura 10 – Máquina de enchimento do Gresanit, fábrica 3.	16
Figura 11 – a) Entrada das peças no secador; b) interior do secador, com carros carregados com peças.....	17
Figura 12 – Vidragem de uma peça numa cabine.....	18
Figura 13 – a) Imagem de uma das entradas do forno 3i; b) imagem da parte lateral do forno 3i.	34
Figura 14 – Representação do forno intermitente 3i.	35
Figura 15 – Vagonas carregadas à espera para entrar no forno 3i.....	35
Figura 16 – a) Vista lateral do forno 4; b) saída das peças cozidas.....	36
Figura 17 – Representação do forno 4, forno contínuo de túnel.....	37
Figura 18 – Vagona do forno 3i e seus constituintes.....	39
Figura 19 – Vagona do forno 4 e seus constituintes.	40
Figura 20 – Peças enfiadas directamente no lastro e apoiadas na mobília refractária.....	42
Figura 21 – Representação das correntes de entrada e saída no forno 3i.....	43
Figura 22 – Representação das correntes de entrada e saída no forno 4.	43
Figura 23 – Fracção da folha de cálculo do balanço energético ao forno 4.	52
Figura 24 – Fracção da folha de cálculo do inventário às peças cozidas no lado norte do forno 3i.	53
Figura 25 – a) Perdas de calor pelas superfícies, do forno 3i; b) total das perdas de calor pelas superfícies do forno 3i.....	73
Figura 26 – a) Caudal térmico perdido pelas faces do forno 4 em função do seu comprimento;b) caudal térmico médio que é perdido nas três faces do forno 4.....	74

Índice de tabelas

Tabela 1 – Dimensões dos fornos.	38
Tabela 2 – Representação e constituição dos componentes do 1º andar das vagonas do forno 4.	41
Tabela 3 – Valores usados para determinar a energia eléctrica consumida pelo forno 3i, no aquecimento e arrefecimento.	45
Tabela 4 – Valores usados para determinar a energia eléctrica consumida pelo forno 4.	45
Tabela 5 – Registo das temperaturas da parede do lado esquerdo e direito do forno 4.	46
Tabela 6 – Registo das temperaturas do tecto do forno 4.	47
Tabela 7 – Registo das temperaturas das paredes que constituem o forno 3i, para diversas temperaturas internas.	48
Tabela 8 – Valores das constantes (c; [7]) e do diferencial de pressão para o gás natural e ar, em todos os grupos de queima e ventiladores do forno 4.	49
Tabela 9 – Valores da velocidade do ar na entrada, saída, nas frinchas da cave e no espaço entre vagonas, do forno 4.	51
Tabela 10 – Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados: fornos 3i e 4.	55
Tabela 11 – Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados: forno 3i.	56
Tabela 12 – Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados: forno 4.	56
Tabela 13 – Valores da massa molecular, temperatura, pressão, massa volúmica, caudal volumétrico e mássico das respectivas correntes de ar e gases do forno 4.	60
Tabela 14 – Valores da temperatura média interna do forno, da percentagem de oxigénio, do excesso de ar, bem como dos caudais de combustível, de ar estequiométrico e de ar real, para vários tempos do aquecimento no forno 3i.	62
Tabela 15 – Valores calculados das entradas e saídas do balanço energético ao forno 3i, para cada intervalo de tempo da fase de aquecimento da cozedura.	76
Tabela 16 – Valores calculados das entradas e saídas do balanço energético ao forno 3i, para cada intervalo de tempo da fase de arrefecimento da cozedura.	77
Tabela 17 – Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético ao forno 3i.	77
Tabela 18 – Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético realizado ao forno 4.	79
Tabela 19 – Valores das massas de mobília refractária, de louça crua e cozida e do material refractário que constitui as vagonas, que entram e saem do forno 3i durante um ciclo.	81
Tabela 20 – Valores das massa de mobília refractária, de louça crua e cozida e do refractário que compõe as vagonas, que entram e saem do forno 4 durante um período de 24h.	82
Tabela 21 – Valores da energia de queima, do consumo específico do forno e da redução do mesmo, após a alteração no refractário para os fornos 3i e 4.	83
Tabela 22 – Valores da redução do caudal térmico consumido, para o forno 3i e 4.	84
Tabela 23 – Valores das poupanças resultantes da substituição parcial do material refractário nos dois fornos.	85
Tabela 24 – Mapa com os dados do investimento, do benefício, do fluxo de caixa líquido e do fluxo de caixa líquido actualizado.	86

Lista de abreviaturas, siglas, símbolos

%aumentoprov	Percentagem do aumento de número de peças aproveitadas (%)
%def.lou.coz.	Percentagem de louça cozida com defeitos (%)
%pmf	Percentagem de perda de massa ao fogo (%)
%Red.massa	Percentagem de redução de massa de material refractário (%)
ΔP	Diferencial de pressão (mmca)
A_{entF4}	Área de entrada do forno 4 (m ²)
A_{ev}	Área entre vagonas do forno F4 (m ²)
A_{frisos}	Área dos frisos do forno F4 (m ²)
A_{pd}	Área de superfície da parede direita (m ²)
A_{saiF4}	Área de saída do forno 4 (m ²)
Aumento _{peçasaprov.}	Aumento do número de peças que são aproveitadas, no decorrer da mudança no material refractário (%)
Bp	Constante característica da superfície de transferência de calor
c	Constante característica do gás/ar (Nm ³ /(h(mmca) ^{1/2}))
C.tér. _{aquec.act.}	Fluxo térmico debitado actualmente no aquecimento do forno 3i (kJ/h)
C.tér. _{arref.act.}	Fluxo térmico debitado actualmente no arrefecimento do forno 3i (kJ/h)
Cons. _{esp}	Consumo específico de energia do forno (kJ/kg)
cos Φ	Factor potência
C_{paa}	Capacidade calorífica do ar de arrefecimento do forno 3i (kJ/kgK)
C_{parq}	Capacidade calorífica do ar de queima (kJ/kgK)
C_{pgn}	Capacidade calorífica média do gás natural, entre os 273K e os 298K (kJ/kgK)
C_{pH2O}	Capacidade calorífica da água (kJ/kgK)
C_{plou}	Capacidade calorífica da louça (kJ/kgK)
$C_{p_{ref}}$	Capacidade calorífica actual do refractário (kJ/kgK)
$C_{p_{ref.alt.}}$	Capacidade calorífica de refractário após a alteração no refractário (kJ/kgK)
$C_{p_{vap.H2O}}$	Capacidade calorífica do vapor de água, nas correntes de gases húmidos (kJ/kgK)
dist _{ev}	Distância entre vagonas do forno 4 (m)
E	Excesso de ar utilizado na combustão do gás natural
$E_{abs.aq}$	Energia absorvida no aquecimento num ciclo de cozedura (kW.h)
E_{absm}	Energia absorvida por mês (kW.h)
E_{abst}	Energia absorvida num ciclo (aquecimento e arrefecimento) (kW.h)
EQ	Energia de Queima (MJ)
$E_{sp_{cord}}$	Espessura da placa de cordierite (mm)
$E_{sp_{cordP1}}$	Espessura da placa de cordierite P1(mm)
FC	Fluxo de caixa (€)

i	Taxa de actualização dos fluxos de caixa (%)
i_{abs}	Intensidade de corrente absorvida (A)
Investimento _{ref.}	Investimento em material refractário (€)
l_{F4}	Largura útil do forno 4 (m)
M	Massa molecular (g/mol)
\dot{m}	Caudal mássico de ar/gás natural (kg/h)
\dot{m}_{aef}	Caudal mássico de ar que entra na entrada do forno (kg/h)
\dot{m}_{aev}	Caudal mássico de ar entre vagonas (kg/h)
\dot{m}_{afc}	Caudal mássico de ar que entra pelos frisos da cave (kg/h)
\dot{m}_{ararref}	Caudal de ar de arrefecimento do forno 3i (kg/ciclo)
\dot{m}_{arb}	Caudal mássico de ar da refrigeração brusca (kg/h)
\dot{m}_{arc}	Caudal mássico de ar do contravec (kg/h)
\dot{m}_{arest}	Caudal mássico de ar estequiométrico (kg/h) *
\dot{m}_{arn}	Caudal mássico de ar da refrigeração normal (kg/h)
\dot{m}_{arq}	Caudal mássico de ar de queima (kg/h) *
\dot{m}_{art}	Caudal mássico de ar de tecto (kg/h)
\dot{m}_{asf}	Caudal mássico de ar que entra na saída do forno (kg/h)
m_{B4}	Massa da barra de Carboneto de silício B4 (kg)
\dot{m}_{caqa}	Caudal mássico de ar da chaminé de ar quente do arrefecimento (kg/h)
\dot{m}_{comb}	Caudal de combustível consumido em cada segmento do forno 3i (kg/ciclo)
\dot{m}_{csv}	Caudal mássico de ar da chaminé sem ventilador (kg/h)
\dot{m}_{cta}	Caudal mássico de ar da chaminé de tiragem aspiradora (kg/h)
\dot{m}_{gc}	Caudal de gases de combustão em cada segmento do forno 3i (kg/ciclo)
\dot{m}_{gn}	Caudal mássico de gás natural (kg/h)
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	Caudal mássico de água na louça à entrada (kg/h) *
m_{loue}	Massa de louça à entrada (kg)
\dot{m}_{loue}	Caudal mássico de louça à entrada (kg/h) *
\dot{m}_{lous}	Caudal mássico de louça à saída (kg/h) *
m_{P1}	Massa da placa de Cordierite P1 (kg)
m_{P12}	Massa da placa de Cordierite P12 (kg)
m_{pCozida}	Massa da peça cozida (kg)
m_{pCrua}	Massa da peça crua (kg)
$m_{\text{peça}_{\text{act.}}}$	Massa da peça de mobília refractária actual (kg)
$m_{\text{peça}_{\text{alt.}}}$	Massa da peça de mobília refractária após a alteração do refractário (kg)

$m_{ref.act.}$	Massa de refractário actual (kg)
$\dot{m}_{ref.act.}$	Caudal mássico de refractário actual (kg/h) *
$m_{ref.alter.}$	Massa de refractário após a alteração (kg)
\dot{m}_{refalt}	Caudal mássico de refractário, após a alteração no refractário (kg/h) *
\dot{m}_{refe}	Caudal mássico de refractário à entrada (kg/h) *
\dot{m}_{refs}	Caudal mássico de refractário à saída (kg/h) *
m_{SiC}	Massa do refractário em Carboneto de silício (kg)
m_{SiCP1}	Massa da placa P1 se essa fosse feita de Carboneto de silício (kg)
$m_{total.act.}$	Massa total actual de mobília refractária da peça (kg)
$m_{total.alter.}$	Massa total, após a alteração do refractário, de mobília refractária da peça (kg)
$\dot{m}_{vap.H_2O}$	Caudal de vapor de água, nas correntes de gases húmidos (kg/h) *
$N^{\circ} peças_{defact}$	Número de peças que são produzidas com defeito actualmente (peças/ano)
$n^{\circ} ciclos_{alt.ref.}$	Número de ciclos após a alteração de refractário
$N^{\circ} peças_{coz}$	Número de peças cozidas no forno (peças/dia)
$N^{\circ} unid$	Número de unidades dos constituintes da mobília refractária
P	Pressão do fluido (atm)
PCI	Poder calorífico Inferior do gás natural (kJ/Nm ³)
P_e	Potência eléctrica (kW)
P_{mont}	Pressão a montante (atm)
$Poupança_{def}$	Poupança económica resultante da diminuição das peças com defeito, após a substituição do refractário (€/ano)
$Poupança_{ee}$	Poupança resultante da economia de energia eléctrica, após a substituição do refractário (€/ano)
$Poupança_{gn}$	Poupança resultante da economia de gás natural, após a substituição do refractário (€/ano)
$Poupança_{total}$	Poupança total resultante da substituição do refractário (€/ano)
$preço_{enelect}$	Preço da energia eléctrica (€/kW.h)
$preço_{gnat}$	Preço do gás natural (€/Nm ³)
$Preço_{unit}$	Preço unitário das peças de mobília refractária (€)
P_{ref}	Pressão de referência (atm)
Q_{aef}	Caudal térmico associado ao ar que entra na entrada do forno (kJ/h)
Q_{aev}	Caudal térmico associado ao ar entre vagonas (kJ/h)
$Q_{aífc}$	Caudal térmico associado ao ar que entra pelos frisos da cave (kJ/h)
Q_{arb}	Caudal térmico associado ao ar da refrigeração brusca (kJ/h)
Q_{arc}	Caudal térmico associado ao ar do contravec (kJ/h)
Q_{arn}	Caudal térmico associado ao ar da refrigeração normal (kJ/h)
Q_{arq}	Caudal térmico associado ao ar de queima (kJ/h) *
Q_{art}	Caudal térmico associado ao ar de tecto (kJ/h)

Q_{asf}	Caudal térmico associado ao ar que entra na saída do forno (kJ/h)
Q_{caqa}	Caudal térmico associado à chaminé do ar quente do arrefecimento (kJ/h)
Q_{csv}	Caudal térmico associado ao ar da chaminé sem ventilador (kJ/h)
Q_{cta}	Caudal térmico associado ao ar da chaminé de tiragem aspiradora (kJ/h)
Q_e	Caudal térmico da energia eléctrica (kJ/h) *
$Q_{gasesarref.}$	Caudal térmico associado aos gases de arrefecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
Q_{gc}	Caudal térmico associado aos gases de combustão (kJ/h) *
Q_{gn}	Caudal térmico do gás natural (kJ/h) *
$Q_{lou.aquec.}$	Caudal térmico associado à louça durante o aquecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
$Q_{lou.arref.}$	Caudal térmico associado à louça durante o arrefecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
Q_{loue}	Caudal térmico associado ao caudal de louça à entrada (kJ/h) *
Q_{lous}	Caudal térmico associado ao caudal de louça à saída (kJ/h) *
\dot{Q}_{pd}	Fluxo de calor na parede direita (kJ/h)
Q_{pd}	Calor perdido pela parede direita (kJ)
$Q_{per.aquec.}$	Fluxo de calor perdido por radiação e convecção no aquecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
$Q_{per.arref.}$	Fluxo de calor perdido por radiação e convecção no arrefecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
$Q_{ref.act}$	Caudal térmico actual associado ao refractário (kJ/h) *
$Q_{ref.alt}$	Caudal térmico associado ao refractário, depois das alterações no mesmo (kJ/h) *
$Q_{ref.aquec.}$	Caudal térmico associado ao refractário durante o aquecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
$Q_{ref.aquec.alt.}$	Caudal térmico associado ao refractário durante o aquecimento do forno 3i, depois das alterações no mesmo (kJ/ciclo)
$Q_{ref.arref.}$	Caudal térmico associado ao refractário durante o arrefecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
$Q_{ref.arref.alt}$	Caudal térmico associado ao refractário durante o arrefecimento do forno 3i, depois das alterações no mesmo (kJ/ciclo)
Q_{refe}	Caudal térmico associado ao caudal de refractário de entrada (kJ/h) *
Q_{refs}	Caudal térmico associado ao caudal de refractário à saída (kJ/h) *
$Q_{ret.arref}$	Caudal térmico total a retirar do forno 3i durante o arrefecimento (kJ/ciclo)
$Q_{ret.lou}$	Caudal térmico a retirar da louça durante o arrefecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
$Q_{ret.ref}$	Caudal térmico a retirar do refractário durante o arrefecimento do forno 3i (kJ/ciclo)
\dot{Q}_{tecto}	Fluxo de calor perdido pelo tecto (kJ/h)
\dot{Q}_{tpd}	Fluxo total de calor perdido pela parede direita (kJ/h)
$Quant_{enc}$	Quantidade encomendada de peças de mobília refractária
$Q_{vap.H_2O}$	Caudal térmico do vapor de água, nas correntes de gases húmidos (kJ/h) *
R	Constante dos gases perfeitos ($m^3 \cdot atm / K \cdot kmol$)
$razão_{est}$	Razão estequiométrica ($kg_{ar} / kg_{gás\ natural}$)
Red_{ctc}	Redução do caudal térmico consumido durante a cozedura no forno 4 (kJ/h)

Red_{-ctcaq}	Redução do caudal térmico consumido durante o aquecimento no forno 3i (kJ/ciclo)
Red_{-ctcar}	Redução do caudal térmico consumido durante o arrefecimento no forno 3i (kJ/ciclo)
$Red_{-tempo_{aquec.}}$	Redução do tempo de aquecimento (h/ciclo)
$Red_{-tempo_{arref.}}$	Redução do tempo de arrefecimento (h/ciclo)
T	Temperatura (K)
T_{aa}	Temperatura do ar de arrefecimento do forno 3i (K)
$tacum.$	Tempo acumulado dos segmentos da cozedura do forno 3i (h)
T_{aef}	Temperatura do ar que entra na entrada do forno (K)
T_{aev}	Temperatura do ar entre vagonas (K)
T_{afc}	Temperatura do ar que entra pelos frisos da cave (K)
T_{amb}	Temperatura ambiente (°C)
$t_{aquec.act.}$	Tempo de aquecimento actual (h/ciclo)
$t_{aquec.alt.}$	Tempo de aquecimento alterado (h/ciclo)
T_{arb}	Temperatura do ar da refrigeração brusca (K)
T_{arc}	Temperatura do ar do contravec (K)
T_{arn}	Temperatura do ar da refrigeração normal (K)
T_{arq}	Temperatura do ar de queima (K)
$t_{arref.act.}$	Tempo actual do arrefecimento do forno 3i (h/ciclo)
$t_{arref.alt.}$	Tempo de arrefecimento do forno 3i, após a alteração de refractário (h/ciclo)
T_{art}	Temperatura do ar de tecto (K)
T_{asf}	Temperatura do ar que entra na saída do forno (K)
t_{ciclo}	Tempo do ciclo de cozedura do forno 3i (h/ciclo)
T_{entar}	Temperatura de entrada do ar no forno 3i (K)
T_f	Temperatura final de um segmento da cozedura do forno 3i (K)
T_{gn}	Temperatura do gás natural (K)
T_i	Temperatura inicial de um segmento da cozedura do forno 3i (K)
TIR	Taxa interna de rentabilidade (%)
T_{loue}	Temperatura da louça à entrada (K)
T_{lous}	Temperatura da louça à saída (K)
$T_{max.ref}$	Temperatura máxima que o refractário atinge durante a cozedura no forno 4 (K)
$t_{novociclo}$	Tempo do novo ciclo do forno 3i (h/ciclo)
T_{pd}	Temperatura da superfície exterior da parede direita (°C)
$T_{pdmed.}$	Temperatura média da superfície exterior da parede direita (°C)
T_r	Temperatura de referência (K)
T_{refe}	Temperatura do refractário à entrada (K)
T_{refs}	Temperatura do refractário à saída (K)
$tretorno_{inv.}$	Tempo de retorno do investimento feito em refractário (anos)

$T_{vap.H_2O}$	Temperatura do vapor de água, nas correntes de gases húmidos (K)
U_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
U_{pd}	Coeficiente global de transferência de calor na parede direita ($\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)
U_r	Coeficiente de transferência de calor por radiação ($\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)
VAL	Valor actual líquido (€)
Valor _{com.peças}	Valor comercial das peças (€/peça)
$V_{Ar \text{ frisos}}$	Velocidade do ar que entra pelos frisos da cave do forno 4 (m/s)
\dot{V}_{arent}	Caudal volumétrico de ar que entra na entrada do forno 4 (m^3/h)
V_{Arent}	Velocidade do ar à entrada do forno 4 (m/s)
\dot{V}_{arev}	Caudal volumétrico de ar a entrar nos espaços entre vagonas do forno 4 (m^3/h)
V_{Arev}	Velocidade do ar que entra pelos espaços entre as vagonas do forno 4 (m/s)
$\dot{V}_{arfrisos}$	Caudal volumétrico de ar a entrar nos frisos da cave do forno 4 (m^3/h)
\dot{V}_{arsai}	Caudal volumétrico de ar que entra na saída do forno 4 (m^3/h)
V_{Arsai}	Velocidade do ar que entra pela saída do forno 4 (m/s)
V_{B4}	Volume da barra de Carboneto de silício B4 (cm^3)
V_{cord}	Volume do refractário em cordierite (cm^3)
V_{gcons}	Volume de gás natural consumido (dm^3)
V_{gecon}	Volume do gás economizado (m^3)
V_{norm}	Volume de gás normalizado (Nm^3)
Volt.	Voltagem (V)
V_{P1}	Volume da placa de Cordierite P1 (cm^3)
V_{P12}	Volume da placa de Cordierite P12 (cm^3)
V_{pref}	Volume da peça de mobília refractária (cm^3)
V_{SiC}	Volume do refractário em carboneto de silício (cm^3)
V_{SiCP1}	Volume da placa P1 em carboneto de silício (cm^3)
w_{aa}	Humidade do ar de arrefecimento do forno 3i ($\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{aef}	Humidade do ar que entra na entrada do forno ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{aev}	Humidade do ar entre vagonas ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{afc}	Humidade do ar que entra pelos frisos da cave ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{arb}	Humidade do ar da refrigeração brusca ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{arc}	Humidade do ar do contravec ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{arn}	Humidade do ar da refrigeração normal ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{arq}	Humidade do ar de queima ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{art}	Humidade do ar de tecto ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{asf}	Humidade do ar que entra na saída do forno ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
w_{ga}	Humidade dos gases de arrefecimento do forno 3i ($\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$)

w_{gc}	Humidade dos gases de combustão do forno 3i ($\text{kg}_{\text{vapor de água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)
ϵ	Emissividade
$\lambda_{\text{vapH}_2\text{O}}$	Calor latente de vaporização da água (kJ/kg)
ρ_{cor}	Densidade específica de cordierite (kg/cm^3)
ρ_f	Massa volúmica do fluido (kg/m^3)
ρ_{SiC}	Densidade específica de carboneto de silício (kg/cm^3)

* Para o forno 3i as unidades destas variáveis são definidas em termos de ciclo de cozedura, em detrimento da base horária utilizada no forno 4.

1 - Introdução:

1.1 – Fábrica Cerâmica de Valadares

A Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A. (FCV), está localizada na vila de Valadares, no concelho de Vila Nova de Gaia. Ocupa uma área total de 176.000m², sendo 72.000m² de construção, emprega actualmente cerca de 500 pessoas e foi fundada em 25 de Abril de 1921.

Sendo uma das mais antigas fábricas de cerâmica em Portugal, ao longo da sua existência a “Valadares” dedicou-se sempre à produção de artigos cerâmicos. 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 quarto de banho. Na década de 90, em resultado das mudanças verificadas no mercado e com a tendência mundial para a especialização dos produtores, foi tomada a decisão de centralizar todos os esforços, investimentos e conhecimentos adquiridos, até aí, na produção exclusiva de louça sanitária e acessórios cerâmicos para quartos de banho.

Para reforçar todo este empenho, está certificada desde Julho de 1999, de acordo com a série de Normas ISO 9000 (Modelo de gestão da qualidade na produção, instalação e assistência após-venda), pela Associação Portuguesa de Certificação e foi a primeira empresa de sanitário na Europa, certificada pela série de Normas ISO 14000 (Sistemas de Gestão Ambiental), tendo obtido esta certificação em Abril de 2001. Recentemente (Junho de 2006) integrou os dois sistemas num único passando a dispor de um Sistema de Gestão Integrada de Qualidade e Ambiente.

Características, Produtos, Mercadorias, Serviços e Mercados

A especificidade do produto quanto a normas técnicas, é especialmente exigente no que respeita à absorção de água (normalizada internacionalmente a <0,5%), resistência mecânica e fendilhagem. Estas condições obrigam a uma atenção constante para a utilização de matérias-primas de qualidade superior. Assim, pela ausência em Portugal de produtos convenientes, a empresa importa de Inglaterra e França parte daquelas.

Investigação e Desenvolvimento

Numa época em que a actividade em Investigação e Desenvolvimento é fundamental, é confortável verificar que a Cerâmica de Valadares tem esta prática assimilada há muitos anos, desenvolvendo e concebendo internamente produtos sanitários, materiais cerâmicos e equipamento industrial, tendo construído desse modo um “saber fazer” de inestimável valor e sem paralelo, em Portugal, na sua área.

A sua última descoberta, consiste num novo material cerâmico, a que deu o nome de Gresanit®, cujas propriedades lhe permitiram substituir material em grés cerâmico, vulgarmente aplicado em peças de grande dimensão. Este material inicialmente criado para produção de artigos sanitários, está actualmente a ser testado noutros campos e aplicações^[1].

1.2 – Definição de Cerâmica e diversos tipos de Cerâmica

A palavra "CERÂMICA" deriva do termo grego *keramike*, derivação de *keramos*, que significa argila. Cerâmica é o conjunto de actividades destinadas à elaboração de toda a espécie de objectos, com barros de qualquer classe, decorados ou não, utilizando-se a propriedade que possui a argila de se moldar facilmente no estado de barro cru (húmido), adquirindo dureza à medida que avança a sua secagem ou por efeito da cozedura ^[2].

O sector cerâmico é amplo e heterogéneo o que induz a dividi-lo em sub-sectores ou segmentos em função de diversos factores, como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Dessa forma, em geral, é adoptada a seguinte classificação ^[2]:

Cerâmica vermelha

Compreende aqueles materiais com coloração avermelhada utilizados na construção civil (tijolos, blocos, telha e tubos cerâmicos/manilhas) e também argila expandida, utensílios domésticos e adorno.

Cerâmica ou materiais de revestimento

Constituem este grupo materiais usados na construção civil para revestimento de paredes, piso e bancadas tais como azulejos, placas ou ladrilhos.

Cerâmica branca

Este grupo é bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente. Eram assim agrupados pela cor branca de massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas. Com o advento dos vidrados opacos, muitos dos produtos enquadrados neste grupo passaram a ser fabricados, sem prejuízo das características, com matérias-primas com certo grau de impurezas, responsáveis pela coloração. Muitas vezes prefere-se subdividir este grupo em função da utilização dos produtos em:

- Louça sanitária;

- Louça de mesa;
- Isoladores eléctricos para linhas de transmissão e de distribuição;
- Utensílios domésticos e de adorno;
- Cerâmica técnica para fins diversos, tais como: químico, eléctrico, térmico e mecânico.

Materiais Refractários

Este grupo compreende uma gama grande de produtos, que têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, envolvendo esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações.

Abrasivos

Parte da indústria de abrasivos, por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes ao da cerâmica, constituem também o segmento cerâmico. Entre os produtos mais conhecidos pode citar-se o óxido de alumínio electrofundido.

Vidro, cimento e cal

São três importantes segmentos cerâmicos e que, pelas suas particularidades, são por vezes, considerados à parte da cerâmica.

Cerâmica de alta tecnologia / Cerâmica avançada

O aprofundamento dos conhecimentos na área da Ciência dos Materiais proporcionam ao homem o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes nas mais diferentes áreas, como aeroespacial, electrónica, nuclear e muitas outras, surgindo materiais com qualidade excepcionalmente elevada. Tais materiais passaram a ser desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Estes produtos, que podem apresentar os mais diferentes formatos, são fabricados pelo chamado segmento cerâmico de alta tecnologia ou

cerâmica avançada. Estes são classificados de acordo com as suas funções em: electrónicas, magnéticas, ópticas, químicas, térmicas, mecânicas, biológicas e nucleares. Os produtos deste segmento, são de uso intenso e a cada dia tende a ampliar-se. Como alguns exemplos, citam-se: naves espaciais, satélites, centrais nucleares, implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (humidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedores de fogão, etc^[2].

1.3 – Cerâmica branca – Louça sanitária

O trabalho desenvolvido nesta dissertação relaciona-se com a cerâmica branca e em particular com a louça sanitária. Esta é feita habitualmente com um dos seguintes três materiais: porcelana sanitária (Vitreous china), grés (Fire clay) e grés fino (Fine fire clay).

A Valadares criou recentemente um quarto material a que deu o nome de Gresanit®, cujas características o colocam entre a porcelana sanitária e o grés fino.

A Porcelana Sanitária é uma mistura de argila, caulino, quartzo e feldspato que é processada para formar um corpo para aplicação sanitária. Este é depois vidrado antes de cozer com vidro branco ou colorido, podendo ainda ser decorado.

Depois da cozedura a massa cerâmica fica branca ou amarela, com uma taxa de absorção de água que não excede os 0,5% em massa, conferindo ao material grande resistência mecânica e muito boa resistência a ataque químico e bacteriológico. Contudo este material apresenta nível elevado de contracção (cerca de 11%) entre a conformação e o produto cozido, assim como deformação mecânica acentuada o que limita o seu uso em artigos de grande dimensão.

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. Antes da cozedura este é vidrado a branco ou a cor, tornando o corpo opaco uma vez que é composto por silicato de zircónio ou óxido de estanho. O resultado depois da cozedura é um corpo com uma taxa de absorção de água da ordem dos 9%, mas com menor deformação e contracção (8%) que a porcelana sanitária, mas também com menor resistência mecânica e química.

O grés é uma mistura de caco moído, argila refractária e quartzo que processados formam o corpo de aplicação. Este é depois vidrado a branco ou a cor, como o grés fino. O resultado depois da cozedura é um corpo com uma taxa de absorção de água entre os 11 e os 13%, mas com baixa deformação e adequado ao fabrico de artigos de grande dimensão. A sua resistência mecânica e química é baixa, limitando a sua utilização ^[3].

O Gresanit®, corresponde a um material gerado a partir de Argilas, Chamote e inertes, que formam o corpo principal. Este será revestido por vidrado opaco, conferindo-lhe a cor e a textura final. Este novo material foi obtido, pela necessidade de produzir artigos de grande dimensão, mas cuja resistência mecânica e química fossem muito próximas da porcelana sanitária. A absorção de água média do Gresanit® é de cerca de 4%.

1.3.1 - Tipos de louça sanitária:

Cada um dos diferentes tipos de materiais mencionados anteriormente, pode ser manufacturado em variadas formas e tamanhos. Os tipos de louça sanitária mais produzidos em todo o mundo são as bacias (sanita), lavatórios, bidés, bases de chuveiro e os tanques (cisternas).

A criação do Gresanit permitiu à Cerâmica de Valadares desenvolver um conjunto de peças mais técnicas e para aplicações especiais, como artigos sanitários para deficientes motores, placas de aplicação de lavatórios, lava louças, bancadas de hotte de laboratório, revestimentos para aplicações especiais, *etc* ^[3].

1.3.2 - Processo de produção:

O processo de fabrico de sanitário é dividido em três fases principais que podem ser discriminadas do seguinte modo:

1. Concepção e *design* do produto;
2. Produção;
3. Embalagem e armazenamento.

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. Acresce a este, o facto da empresa produzir um boa parte do equipamento mecânico que usa nas suas secções de produção, tendo desenvolvido diversas soluções tecnológicas para a sua produção.

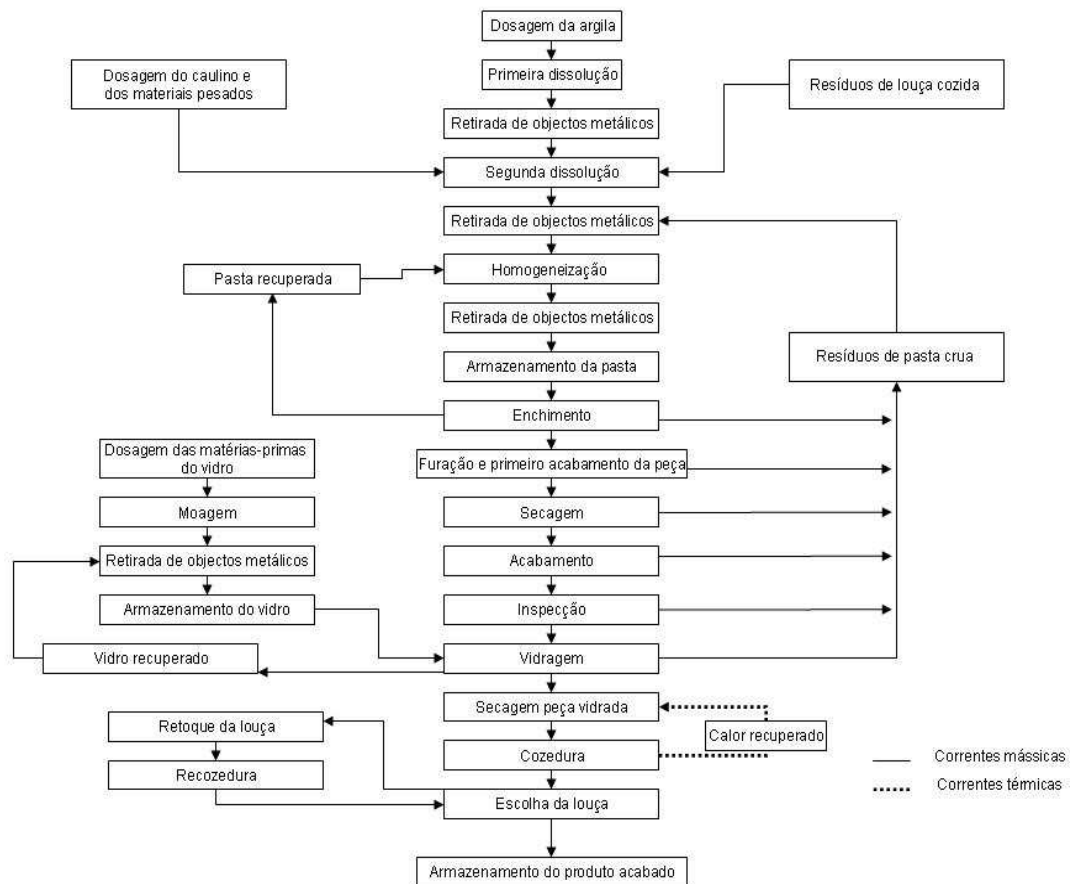


Figura 1 – Fluxograma do processo de produção de louça sanitária.

1.3.3 - Matérias – primas da pasta e do vidro:

Para produzir a pasta sanitária de porcelana são normalmente utilizados os seguintes materiais: caulino, argila, feldspato e quartzo. Um dos constituintes mais importantes é o quartzo. A presença deste tem um duplo efeito. Antes da cozedura, este comporta-se como um inerte não plástico, que reduz a plasticidade da argila e também a resistência mecânica; por outro lado, aumenta a fluidez. Durante a cozedura, o quartzo aumenta a temperatura de vitrificação da pasta. Este sofre uma transformação aos 573°C, de quartzo alfa para beta, que causa um rearranjo dos cristais com um aumento de volume. Este fenómeno obriga a que o processo de cozedura seja lento (baixo gradiente térmico) quando as temperaturas do forno estiverem próximas deste valor.

Na pasta podem ser adicionados aditivos, nomeadamente, desfloculantes que são utilizados para ajustar o comportamento reológico da pasta.

Os vidrados usados no revestimento do corpo cerâmico, são essencialmente feitos de quartzo, feldspato, caulino, carbonato de um metal alcalino terroso e óxido de zinco. O opacificador usado normalmente é o silicato de zircónio.

Nos vidros também podem ser adicionados aditivos tais como: aglutinantes e fluidificantes.

1.3.4 - Concepção e produção dos modelos, madres e moldes:

A produção de novas peças na indústria sanitária é uma operação complexa e delicada ao mesmo tempo. Complexa porque o sucesso de fabrico depende de forma significativa das opções técnicas tomadas durante a concepção do modelo, por forma a prever com rigor os níveis de deformação e retracção mecânica dos artigos. É também uma tarefa delicada pois a tecnologia de conformação escolhida no processo de concepção poderá interferir no rendimento produtivo e qualidade final obtida. Em suma, o processo de concepção exige um completo domínio do processo industrial e das variáveis tecnológicas envolvidas, algumas delas por validação empírica. A qualidade do produto acabado depende fortemente do nível de qualidade do procedimento inteiro da produção do modelo-madre-molde.

Em primeiro lugar há que desenvolver os desenhos, estes são executados em escala de 1:1 e definem todas as características estéticas e funcionais do produto a ser produzido. Estes desenhos devem ser baseados no conhecimento das transformações físico-químicas às quais a peça cerâmica é sujeita durante a cozedura, do enchimento e da secagem. É por isso preciso ter uma grande experiência e um profundo conhecimento do material e do processo de produção de modo a lidar com os problemas de deformações e de encolhimento que podem existir durante as diversas fases de produção.

Através dos desenhos passa-se à produção manual dos modelos em escala de 1:1. Estes são aumentados entrando em consideração com o encolhimento do produto final. Uma vez obtido o modelo é feito o primeiro molde, também chamado de molde original. Este primeiro molde é usado para produzir várias peças. Estas são então testadas: se responderem positivamente aos requisitos técnicos e funcionais e não tiverem deformações ou defeitos que tenham a ver com o modelo, então, o modelo está preparado para passar à fase seguinte. Contudo, isto nunca costuma acontecer à primeira tentativa. Se os resultados não forem satisfatórios há então que fazer as devidas mudanças até se obter o resultado pretendido.

Este processo de correcção com sucessivas aproximações ao produto desejado encontra-se descrito no diagrama seguinte:

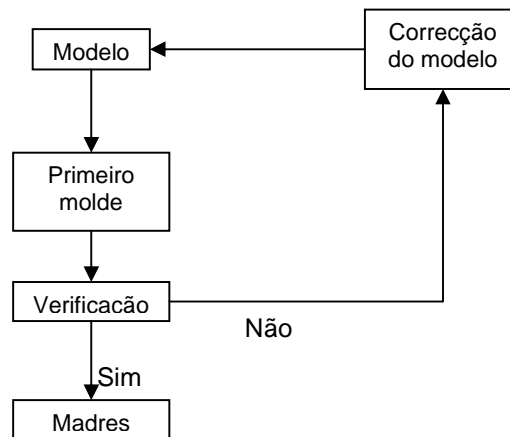


Figura 2 – Fluxograma da produção de madres.

A construção da madre (peça utilizada para construir os moldes das peças) 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. Na figura 3 pode ser visto um exemplo de uma madre.



Figura 3 – Madre com molde no seu interior

Posteriormente utilizando as madres são produzidos os moldes, é nestes que será feito o enchimento das peças. Por muitos anos, os moldes de enchimento para a louça sanitária foram feitos exclusivamente de gesso. No entanto, nos anos recentes com o

desenvolvimento das técnicas de enchimento, a média e alta pressão, foi preciso introduzir materiais com maior resistência mecânica e à abrasão. Foram por isso desenvolvidos moldes de plástico especial e de resina para a média pressão e de resina para a alta pressão.



Figura 4 – Constituintes dos moldes de bacias.

1.3.5 - Fabrico de barbotinas (pasta) e vidrados:

A quantidade e tipo de argila e caulino a ser usado quando se está a formular um corpo dependem das características pretendidas para a pasta, especialmente, das seguintes: viscosidade, tixotropia, tempo de formação de espessura, tempo de arrefecimento, plasticidade da pasta endurecida, resistência mecânica do corpo cru e encolhimento do corpo cru.

As fases de preparação da pasta de porcelana sanitária estão representadas no diagrama seguinte:

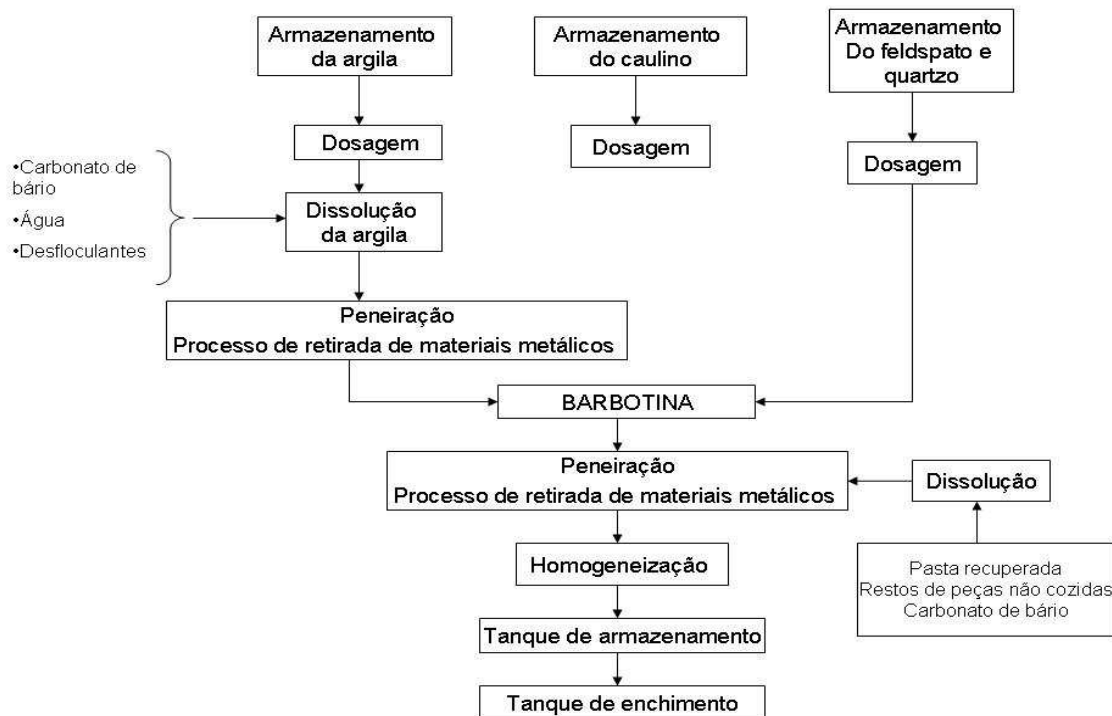


Figura 5 – Fluxograma da produção de porcelana sanitária.

Os vidros usados na produção de porcelana sanitária são normalmente brancos, com o uso ocasional de vidro colorido.

Estes são preparados através de moagem pela ordem indicada na figura 6.

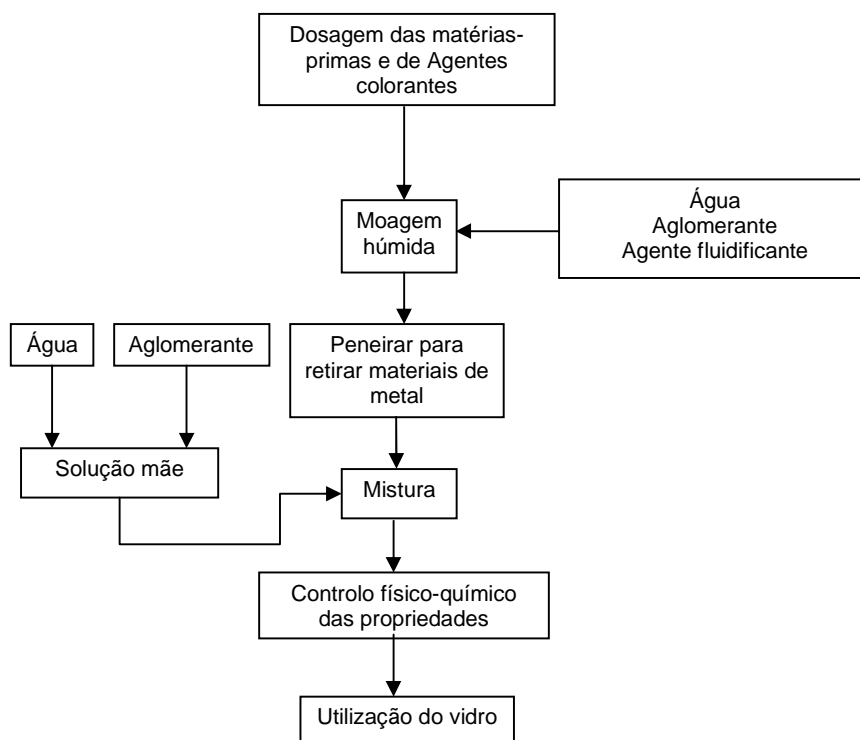


Figura 6 – Fluxograma do processo de produção do vidro.

A dosagem das matérias-primas é geralmente feita manualmente em termos de massa, para ter em conta o conteúdo de humidade dos materiais plásticos.

1.3.6 - Enchimento

O processo de enchimento, que ocorre nas olarias, segue os seguintes passos:

1. Enchimento dos moldes;
2. Formação de espessura;
3. Remoção do excesso de pasta;
4. Endurecimento, abertura do molde;
5. Furação e desmoldagem.

As duas fases tecnológicas mais importantes do processo de enchimento são a formação de espessura e o endurecimento da pasta. Durante a formação de espessura, a parte do corpo em contacto com o molde solidifica à medida que este perde água. Numa segunda fase, a de consolidação, a eliminação de água continua até que o corpo atinja uma consistência que permita a extracção da peça do molde e o seu manuseamento.

Quanto á tecnologia usada de conformação das peças na olaria, podem ser usados equipamentos de baixa pressão (0,20 a 0,40 bar) (Figura 7 e 8) ou de alta pressão (10 a 15 bar) (Figura 9 e 10). Estes equipamentos podem ser manuais, semi-automáticos ou robotizados. A opção pela tecnologia a usar, depende do tipo de peça e do grau de complexidade da mesma.

a)



b)



Figura 7 – a) Bancas de enchimento das peças; b) bateria de enchimento.



Figura 8 – Enchimento manual de peças.



Figura 9 – Máquina de enchimento a alta pressão, fábrica 1.



Figura 10 – Máquina de enchimento do Gresanit, fábrica 3.

1.3.7 - Secagem

A secagem é uma fase de produção muito importante para a eliminação de água do corpo cerâmico. Durante esta fase decorre uma boa parte da contracção dimensional, pelo que a secagem deve decorrer com respeito pela curva de secagem deste tipo de materiais. Quando tal não acontece, podem surgir problemas sérios na cozedura ou da qualidade final do produto.

A secagem na indústria sanitária, usando ar como fluido de aquecimento, é quase sempre feita em duas fases:

- 1) Secagem verde: a peça extraída do molde é sujeita a uma secagem inicial, que a torna mais consistente e mais facilmente manuseável para o acabamento;
- 2) Secagem branca: os produtos semi-processados são secos até uma humidade residual de cerca de 1%.

Na figura 11 pode ser observado um dos secadores existentes na fábrica e as peças a secar.

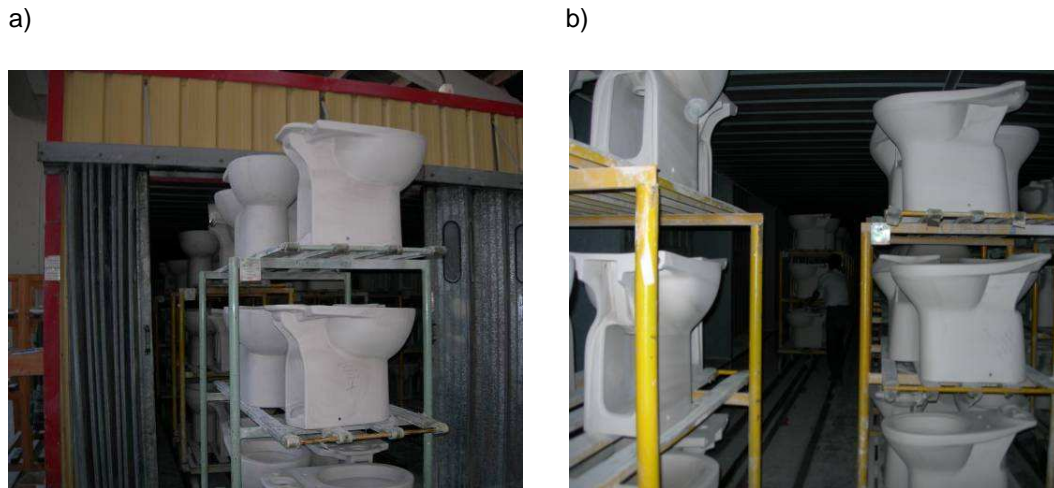


Figura 11 – a) Entrada das peças no secador; **b)** interior do secador, com carros carregados com peças.

1.3.8 - Acabamento

O acabamento, como já foi mencionado, pode ser feito antes ou depois da secagem a branco ou a verde. Este consiste num conjunto de operações, feitas manualmente, durante as quais o operador corrige algumas imperfeições, que possam existir na peça. As mais comuns são:

- Saliências formadas nas juntas dos moldes;
- Ajuste dos buracos funcionais dos produtos semi-processados;
- Eliminação de pequenos buracos ou de defeitos de superfície de diferente natureza.

1.3.9 - Vidragem das peças

A louça é vidrada manualmente ou por robots, com pistolas de *spray* especiais. O vidro é alimentado às pistolas ou através de bombas pneumáticas ou através de pressão aplicada ao seu reservatório (Figura 12). Com utilização de ar comprimido a cerca de 5 bar, promove-

se a atomização de vidro líquido na pistola, e desse modo recobre-se toda a superfície visível da peça, que após a cozedura conferirá a cor e o brilho ao artigo sanitário.



Figura 12 – Vidragem de uma peça numa cabine.

1.3.10 - Cozedura

A cozedura é a fase final do ciclo de produção. Esta fase é a mais delicada de todo o processo de manufactura de louça sanitária. É aqui que a combinação do processo físico e químico ocorre, conferindo à peça as suas características funcionais, técnicas e estéticas, passando esta a pertencer a uma certa classe técnica ou comercial. Os defeitos que apareçam nesta fase custam às empresas mais do que quaisquer outro, uma vez que a peça já incorpora uma boa parte dos custos de produção. É por isso que os produtores tentam evitar defeitos em peças cozidas (esta é a principal razão da existência de operações de inspecção). Deve ser garantida a melhor qualidade do vidro e um processo de cozedura o mais controlado e regular possível.

As condições técnicas da cozedura de artigos cerâmicos, assumem um papel muito importante no resultado final, pois dada a transformação química e dimensional que ocorre, qualquer pequena deficiência no corpo cerâmico que forma a peça será amplificada nesta fase de transformação.

1.3.10.1 - Transformações físicas e químicas e curvas de cozedura

Os processos físicos e químicos que têm lugar no interior do corpo e dos vidros durante a cozedura, assim como as temperaturas do início e do fim das transformações, dependem principalmente dos seguintes factores:

- Composição química e mineralógica dos corpos e dos vidros;
- Distribuição granulométrica das matérias-primas, que compõem os corpos e os vidros;

Os corpos vão vitrificar ou os vidros vão fundir a uma temperatura inferior, quanto mais finas forem as partículas.

- Da temperatura máxima atingida, o tempo de permanência (patamar) nos vários níveis de temperatura e a velocidade de aquecimento.

Um aumento da velocidade de aquecimento vai alterar o início e o fim das transformações baseadas no fornecimento de energia térmica com respeito a elevadas temperaturas.

Quando se está a trabalhar com louça sanitária, para serem estabelecidos os valores limite para o aquecimento e arrefecimento, deve ser levada em conta a forma e a espessura da peça. Isto faz com que haja quase sempre um considerável gradiente de temperatura na peça, que se traduz em diferentes tipos de transformações ao mesmo tempo. O que pode provocar *stress* na peça que pode levar à quebra da mesma. A seguir, mencionam-se as principais transformações que os corpos e o vidro sofrem, durante um ciclo, nas várias gamas de temperaturas:

❖ 30-150°C

A humidade residual, que não deve ser mais do que 1 a 1,5%, é eliminada. É importante evitar a evaporação violenta no corpo, pois a peça pode ser destruída. A peça deve ser aquecida lentamente, a cerca de 100-130°C/h (no máximo).

Esta fase de aquecimento pode ser eliminada se o forno tiver uma zona de pré-cozedura, em que as peças são secas completamente (humidade <1%).

❖ 150-500°C

As substâncias orgânicas que integram as argilas, decompõem-se e queimam-se. A cinética deste processo é grandemente condicionada pelo(a):

- Natureza e a granulometria das substâncias orgânicas;
- Velocidade de aquecimento;
- Espessura do corpo cerâmico: quanto maior for a espessura, mais lento deve ser o aquecimento e portanto este torna-se mais demorado;
- Tipo de atmosfera no forno (oxidante ou redutor). No caso da cerâmica, esta deve ser absolutamente oxidante.

❖ 500-700°C

Durante este intervalo de temperaturas, existem muitas transformações a registar:

- a) Entre os 520°C e os 650°C, o caulino decompõem-se, com a conseqüente libertação de água. A migração desta gera um fluxo de vapor através da camada de vidro, que como ainda é permeável não é danificada;
- b) Próximo dos 573°C, o quartzo transforma-se abruptamente da forma alotrópica alfa para a forma beta, que leva a um aumento do volume do corpo, sendo parcialmente compensado com o encolhimento resultante da desidratação do caulino. Esta expansão é absorvida com relativa facilidade pelos corpos porosos ou sem vidragem;
- c) Nesta gama de temperaturas há a decomposição da mica contida na argila e dos carbonatos presentes no corpo, começa também a decomposição do vidro. As transformações típicas que se dão neste intervalo de temperaturas permitem o aquecimento a elevada velocidade, que pode exceder os 300 a 400°C/h.

❖ 700-1050°C

Os carbonatos completam o seu processo de decomposição, o carbonato de magnésio e o carbonato de cálcio a cerca de 800°C e 950°C, respectivamente.

❖ 950-1100°C

Os sulfatos existentes na argila decompõem-se, dando origem à formação de gás. A estas temperaturas são iniciadas as reacções de sinterização, principalmente o efeito catalisador do sódio, potássio e dos óxidos de ferro. Estas reacções são responsáveis por um encolhimento do corpo. Portanto é necessária uma velocidade de aquecimento lenta, cerca de 120-150°C/h, para que o produto final não seja danificado. Além disso, a aproximadamente 1100°C, a maior parte do vidro utilizado começa a fundir, é nesta fase que

o processo de desgasificação é concluído, pelo que deverá ocorrer de forma relativamente prolongada para garantir a melhor qualidade de superfície do vidro. Se esta fase for muito rápida, haverá o risco dos gases ficarem retidos na massa de vidro quando se iniciar o arrefecimento.

❖ **1100-1230/1250°C**

Nesta gama de temperaturas o vidro atinge o seu estado de maturação.

Uma vez atingida a temperatura máxima, o encolhimento e a vidragem dos corpos de porcelana sanitária e, parcialmente no caso dos corpos de grés, estão completos. A vidragem leva a um aumento de espessura da massa cerâmica, graças à fase vítrea gerada pela fusão do feldspato, pois este rodeia e dissolve em parte os componentes cristalinos. Este fenómeno, típico dos corpos de porcelana, origina um corpo que depois da cozedura é feito de uma fase vítrea, mulite microcristalina, e um resíduo de quartzo.

A performance à temperatura máxima de cozedura condiciona o final das reacções que se dão entre o corpo e os componentes do vidro.

❖ **1230/1250-1200°C**

O arrefecimento deve ser feito muito lentamente, para permitir a máxima evacuação de bolhas de gás presas na camada de vidro. A temperatura é reduzida a cerca de 10-15°C/h.

❖ **1200-800°C**

Inicialmente (acima dos 950°C), o corpo é caracterizado por um comportamento pirolástico, portanto deve ser feito um arrefecimento rápido, até serem atingidas temperaturas inferiores a 800°C. Este arrefecimento rápido também beneficia o aumento da espessura do vidro, prevenindo a desvitrificação que pode afectar o vidro se este se mantiver a temperaturas muito elevadas por longos períodos de tempo.

A velocidade de arrefecimento deve atingir os 1000°C/h, nos ciclos rápidos.

❖ **800-600°C**

O arrefecimento deve ser feito lentamente (a cerca de 100-130°C/h), porque entre os 750 e os 800°C atinge-se um ponto de transformação do corpo vítreo. A temperatura deve ser mantida uniforme nas várias partes da peça e em toda a sua espessura, devido à transformação dos resíduos do quartzo beta em alfa.

❖ 600-500°C

Aos 573°C o resíduo de quartzo transforma-se de beta para alfa, com uma contracção rápida de volume. Como o corpo cozido é frágil, se houver uma distribuição não uniforme de temperaturas, a peça vai sofrer diferentes encolhimentos o que pode provocar quebras.

É recomendável que não seja ultrapassada a velocidade de arrefecimento de 50°C/h, quando se está a trabalhar com tipos de corpos tradicionais.

❖ 500-50°C

Nesta fase o arrefecimento pode ser feito sem nenhuma precaução especial. Este deve ser feito a aproximadamente 50°C/h entre os 250 e os 180°C.

Para reduzir os ciclos de cozedura é necessário:

- a) Estudar convenientemente a formulação da pasta e do vidro;
- b) Adoptar as curvas de cozedura óptimas;
- c) Utilizar os fornos mais adequados à cozedura seleccionada.

1.3.10.2 - Características do forno de cozedura

Os fornos devem ser desenhados de modo a otimizar o mecanismo de troca por radiação e convecção, para transferir o calor no menor tempo possível e de maneira uniforme.

Nas áreas de pré-aquecimento, as temperaturas da parte superior e inferior do forno devem ser aproximadamente constantes, para evitar quebras durante esta fase que são muito comuns em certas partes das bacias. É importante assegurar que a temperatura seja uniforme na área de arrefecimento do forno, que normalmente é dividida em arrefecimento rápido e lento.

O arrefecimento rápido deve ser feito através da introdução de ar frio lateralmente e pelo topo. Este procedimento é justificado por dois motivos:

- 1) Se o arrefecimento for efectuado apenas pelos lados, em certas peças podem ser provocadas diferenças de temperaturas de uma parte para outra da peça.
- 2) A altura considerável e a densidade variável das cargas do forno provocam uma estratificação substancial do ar quente nas zonas mais altas.

Durante o arrefecimento rápido há que ter em especial atenção no intervalo de temperaturas em que se dá a transformação do quartzo. O ar quente é por isso aspirado, para tornar a distribuição da temperatura o mais uniforme possível.

1.3.10.3 - Tipos de fornos

Os fornos utilizados na indústria cerâmica, podem ser classificados segundo o seu funcionamento, como contínuos ou intermitentes.

Os fornos contínuos operam ininterruptamente durante as 24h do dia, com um fluxo contínuo de material, que é carregado em vagonas que entram no forno a intervalos iguais. São utilizados para grandes quantidades de produção, mais de 700 a 800 peças por dia.

Vários tipos de fornos pertencem a esta categoria, estes são classificados com respeito ao sistema de combustão em que estes se baseiam e o tipo de troca de calor entre os gases de combustão e o material a ser cozido. Estes dividem-se em:

- Fornos de chama aberta;
- Fornos com semi-muflas;
- Fornos com muflas.

Este trabalho debruça-se apenas nos fornos de chama aberta, uma vez que os fornos em estudo são ambos deste tipo.

Os fornos de chama aberta são utilizados apenas quando os combustíveis gasosos que contêm quantidades insignificantes de sulfureto podem ser consumidos (metano e GPL). O forno é composto por um túnel recto, que pode ser isolado com fibras cerâmicas ou com tijolos isolantes.

Com os novos materiais isolantes, podem ser construídos fornos com uma inércia térmica mais baixa, o que consequentemente faz com que os arranques e as pausas sejam feitos mais rapidamente. O material a ser cozido é posto em carros de transporte para a cozedura, as vagonas, e estas são constituídas por:

- Uma estrutura metálica com rodas e eixos;
- Uma plataforma constituída por tijolos;

- Pilares;
- Lastro da vagona constituído por placas de cordierite, que são cobertas com alumina, podem ainda existir mais andares com as mesmas placas;
- Barras refractárias que suportam as placas do lastro;

O lastro é utilizado como suporte para as peças de louça que vão ser cozidas, ou para transportar conjuntos de mobília refractária. Esta mobília serve de apoio à louça de modo a que esta não se danifique durante a cozedura. Recentemente, graças à comercialização de novos produtos (por exemplo as barras de carboneto de silício recristalizado) podem existir vagonas muito mais leves.

A utilização destas vagonas mais leves permite:

- Uma redução drástica da razão entre a massa do carro e a massa do material cozido;
- A redução da dispersão das temperaturas na parte de baixo do túnel;
- A diminuição da inércia térmica da vagona. Como consequência, o tempo de duração do ciclo pode ser reduzido.

Depois das peças serem carregadas manualmente nas vagonas, estas são introduzidas no forno através de um sistema mecanizado, o que faz com que as vagonas entrem em continuo no forno.

O forno é desenhado de modo a obter a curva de cozedura desejada e é dividido praticamente em três zonas: pré-aquecimento, cozedura e arrefecimento.

A exaustão está situada no início da zona de pré-aquecimento. Um ventilador extrai os gases de combustão, e os mesmos são enviados em contra-corrente às peças a serem cozidas. Isto permite que as peças sejam cozidas gradualmente, antes dos fumos serem emitidos pela chaminé. A extracção dos fumos deve ser feita correctamente de modo a evacuar todo o vapor formado, resultante da combustão de substâncias orgânicas.

Um sistema de recirculação do ar, localizado na zona de pré-aquecimento serve para tornar a temperatura uniforme. Os gases de combustão são gerados por queimadores localizados nas paredes laterais do forno, na zona de pré-aquecimento e especialmente na zona de cozedura. Os queimadores são instalados de maneira a evitar que a chama esteja em contacto directo com as peças.

A capacidade térmica do forno é controlada mantendo constante o fluxo de ar e variando o fluxo de gás. Os sistemas de controlo mais sofisticados também fazem variar de forma conveniente o fluxo de ar, de modo a manter uma razão óptima de ar/gás.

Os produtos são arrefecidos de forma directa e indirecta. No primeiro caso, ar frio é introduzido no túnel, em contra corrente da saída do mesmo. Desta forma o material é arrefecido lentamente e ao mesmo tempo o calor é recuperado. Este é chamado de arrefecimento rápido, onde o ar incide directamente no material acabado de sair da zona de cozedura.

O arrefecimento indirecto ou lento pode ser feito essencialmente de duas maneiras:

- 1) Aspiração de ar quente do interior do túnel, que favorece a entrada de ar do túnel.
- 2) Remoção de calor da estrutura do forno através da circulação de ar frio em cavidades feitas nas paredes laterais do forno. A vantagem deste sistema é a geração de ar quente limpo que pode ser reutilizado na secagem das peças ou dos moldes.

Actualmente, os fornos de chama aberta são caracterizados por um consumo específico de 5850 a 8360 kJ/kg de peças cozidas e estes podem ter ciclos de 12 a 13 horas no mínimo.

Nos fornos intermitentes, as peças são introduzidas, cozidas e depois o forno é arrefecido sendo as peças descarregadas. Podem ser efectuados 2 ciclos por dia, mas usualmente só um é completo. Este tipo de fornos é indicado para pequenos volumes de produção, menos do que 700 peças por dia. São especialmente convenientes para a cozedura de peças grandes tais como bases de chuveiro e tanques.

Os fornos intermitentes, podem ser classificados segundo o tipo de transmissão de calor, como de chama aberta ou como mufla. Podem também ser classificados segundo o tipo de sistema de aquecimento adoptado, como fornos de combustíveis gasosos ou eléctricos.

Os fornos intermitentes de chama aberta são utilizados em monocozedura em fábricas pequenas e para recozedura a baixa temperatura ou cozedura normal.

Em relação ao forno de túnel, têm as seguintes vantagens e desvantagens:

- 1) Grande flexibilidade no tipo de peças a carregar. Em adição, como o forno só é ligado quando necessário, não são precisos operadores a trabalhar em contínuo.
- 2) Fácil manutenção, pois pode ser feita a qualquer altura.
- 3) Maior consumo de energia do que os fornos de túnel, podendo atingir valores de 11700 ou 15050 kJ/kg de produto cozido.

Nestes a combustão pode ser feita de 2 modos:

a) Com queimadores atmosféricos:

Estes encontram-se em grande número para que haja uma distribuição de temperatura uniforme no forno e estão situados na parte de baixo do forno, por vezes mesmo abaixo das vagonas.

b) Queimadores de média e elevada velocidade:

A elevada turbulência criada no forno torna possível a redução do número de queimadores e ao mesmo tempo permite que a temperatura de cozedura seja uniforme, nas várias zonas do forno. Estes necessitam de um ventilador para o ar (comburente).

Os fumos são aspirados do topo do forno.

O arrefecimento é feito através da introdução de ar frio pelos queimadores ou outros orifícios.

Este tipo de forno está geralmente ligado a um computador, que armazena todas as curvas de cozedura na sua memória. O ciclo de cozedura pode então ser facilmente modificado, sem ser necessário regular manualmente o forno.

O ciclo de cozedura demora 12 a 22 horas de acordo com o tipo de peças e de pasta a serem cozidos.

Os carros utilizados neste forno são similares aos utilizados nos fornos contínuos, já descritos anteriormente, a única diferença é que têm maiores dimensões ^[3].

1.4 - Consumo de energia na indústria cerâmica de louça sanitária

No ano de 2006, a produção das empresas a laborar em Portugal foi de 7.567.717 artigos, de entre as quais foram vendidas 7.434.240 peças, que fez um valor de vendas de 161.412.832€. Os custos de energia constituem uma grande parte dos custos de produção totais (10 a 25%), conseqüentemente é muito importante medir a eficiência da produção ^[4].

Na indústria de Sanitário, são relevantes os custos de energia em processos de secagem, cozedura e moagem e ainda em alguns sistemas de apoio, como a produção de ar comprimido. Contudo as necessidades de energia térmica a partir de combustíveis, representa cerca de 80% da energia consumida, com incidência particular no processo de cozedura.

O aumento do custo dos combustíveis fez com que tecnologias inovadoras fossem introduzidas nesta indústria, de modo a ser conseguida uma optimização dos consumos de energia. Os maiores desenvolvimentos foram feitos na melhoria da eficiência energética dos fornos, pois estes representam o maior consumo de energia no processo de produção.

O forno intermitente é caracterizado por um elevado nível de calor desperdiçado pelos gases, isto deve-se à falta de recuperação do calor interno que é feito na zona de pré-aquecimento nos fornos contínuos.

A eficiência térmica do forno é avaliada pela relação entre a energia necessária para cozer o material e a energia térmica que é fornecida ao forno. A eficiência energética depende de factores técnicos e processuais, que deverão ser devidamente estudados e controlados. Estes factores são geralmente os seguintes:

- Densidade de carga por vagona (kg/m^2)
- Taxa de utilização do Potencial de cozedura do Forno
- Controlo de queima e ventilação
- Taxa de recuperação de calor
- Condições do isolamento térmico
- Massa de refractário utilizada.

O trabalho realizado, incidiu no último factor apontado, ou seja, na redução da massa de refractário que é usada durante o processo de cozedura. Para tal podem ser realizadas as seguintes acções ^[4]:

- Redução da massa térmica das vagonas e da mobília refractária

A energia consumida não é só utilizada para aquecer a louça, mas também para aquecer o material refractário.

A razão entre a massa de mobília refractária e a de louça é geralmente cerca de 6:1. Esta pode ser diminuída através do desenho mais apropriado da mobília ou com o uso de novos materiais refractários em Carboneto e Nitreto de Silício, com baixa massa térmica e que oferecem a mesma resistência e estabilidade que os materiais tradicionais. O uso destes produtos pode proporcionar uma redução na massa até 70%, o que resulta em menores consumos de combustível, de funcionamento, de reparação e de manutenção.

- Construção mais leve

A introdução de novos *designs* das vagonas, através da incorporação de carboneto de silício recristalizado, pode levar a reduções significativas do consumo de energia.

São também utilizadas fibras cerâmicas mais leves para isolar o forno, que reduzem a massa térmica do mesmo e melhoram a eficiência do seu isolamento.

De forma a melhorar a eficiência energética na fase de cozedura, podem ainda ser efectuadas as seguintes alterações ^[4]:

- Utilização de fornos de rolos

Estes permitem reduzir o peso no sistema de transporte das peças, uma vez que não são utilizadas vagonas, mas sim tapetes que transportam as peças ao longo da cozedura no forno. Mesmo assim, ainda existe a necessidade da utilização de mobília refractária, para que a peça não fique deformada.

- Recuperação do calor residual

A recuperação de calor das zonas de arrefecimento do forno de túnel ou de rolos pode ser usado no processo de secagem, bem como pré-aquecer o ar de combustão, o que oferece poupanças substanciais.

Se a temperatura de pré-aquecimento puder ser aumentada, maior é a poupança de energia. Quando comparado o aquecimento a 150°C ao de 400°C, o último traz uma poupança de cerca de 17%, se for feito a 600°C a redução é de 28%. O investimento em recuperadores construídos em metal de elevada performance ou em cerâmica, é recuperado em média em dois anos.

- Queimadores de elevada velocidade

Há no mercado vários modelos de queimadores que permitem uma poupança significativa em comparação com os convencionais. Estes queimadores criam uma turbulência intensa no interior do forno e isso melhora a transferência de calor, na zona de convecção. Podem ser conseguidas poupanças de 10-15% em comparação com os queimadores tradicionais.

- Cozedura de impulso

Com esta técnica os queimadores entram em ignição e param sequencialmente, através do uso de controladores electrónicos. Estes funcionam à sua potência nominal e por isso à sua melhor eficiência. A poupança varia de 10 a 30%, dependendo da potência inicial do sistema de controlo dos queimadores.

- Substituição para combustíveis mais baratos

Como alternativas aos combustíveis mais caros podem ser utilizados alguns resíduos, a serem utilizados como combustíveis mais baratos.

1.5 - Material refractário utilizado na cozedura da louça sanitária

Como já foi referido anteriormente, este é um factor preponderante na cozedura da louça e por isso na optimização do consumo de energia nesta mesma fase.

Nos fornos cerâmicos, os materiais refractários são utilizados nas seguintes funções:

- Isolamento das paredes do forno;
- Suporte e transporte da carga (fornos de rolos);
- Para manter a louça na posição pretendida (mobila refractária);
- Componentes especiais para os fornos.

Os materiais refractários devem ter as seguintes características:

- Elevada capacidade de isolamento (condutividade reduzida);
- Baixa acumulação do calor;
- Estabilidade e resistência mecânica e pirolástica;
- Comportamento neutro à medida que a composição da atmosfera varia.

1.5.1 - Refractários de suporte, produtos auxiliares de enfora e de transporte

Os materiais de enfora são produtos refractários extremamente resistentes aos choques térmicos. Por esta razão, e afim de reduzir o peso, eles devem ter também a menor espessura possível.

- Material em Cordierite-Mulite

Em função da temperatura e da carga assim como do tempo de cozedura, a estrutura do material de cordierite pode ser enriquecido com mulite. A percentagem de cordierite garante a resistência aos choques térmicos, enquanto que a mulite é responsável pela estabilidade mecânica. Estes materiais são muito utilizados para fazer placas, suportes, *etc*, e têm excelentes resultados.

- Material de enfora e de transporte em cerâmica à base de óxidos

Estes são compostos principalmente por óxido de alumínio e são materiais resistentes a temperaturas elevadas, que possuem propriedades térmicas e mecânicas óptimas.

- Material de enfora e de transporte em cerâmica à base de não óxidos

Os materiais deste grupo mais utilizados na indústria cerâmica são os carbonetos de silício (SiC). Estes distinguem-se por terem uma elevada durabilidade e uma excelente resistência a elevadas temperaturas. Actualmente são utilizados os seguintes produtos de Carboneto de silício: SiC com silício infiltrado, SiC recristalizado e SiC aglomerado ^[5].

Os materiais refractários modernos permitem conceber fornos mais rápidos e flexíveis, de modo a obter uma produção com menos defeitos e com um consumo e funcionamento mais económicos ^[5]. Estes materiais revelam-se muito melhores que os de cordierite durante a utilização, pois são muito menos atacados por oxidação a alta temperatura e apresentam maior resistência à flexão e empeno. Este último facto, permite um ganho assinalável na qualidade final das peças nas superfícies de contacto com a placa.

1.6 – Fundamentação do trabalho

Considerando o peso que o consumo de energia tem de forma intrínseca na indústria cerâmica e o facto do preço desta ter vindo a aumentar de forma considerável nos últimos anos, justifica-se inteiramente a oportunidade de realizar um estudo de optimização energética, a partir de uma situação real de utilização de equipamentos industriais, como o proporcionado pela Fábrica Cerâmica de Valadares.

O trabalho proposto, assenta no estudo de optimização energética associada ao melhor uso de materiais refractários, que servem de apoio à cozedura de peças sanitárias, em fornos cerâmicos industriais. Neste contexto, é proposta a identificação das possibilidades de redução de massa refractária por substituição de componentes refractários, de menor massa específica, e a avaliação do impacto no desempenho energético do forno e da respectiva redução de custos de operação.

A perspectiva económica está igualmente na primeira linha dos objectivos do trabalho, pois assume-se como essencial à viabilidade das alterações técnicas propostas que estas se remunerem por poupanças adquiridas na recuperação de energia e na melhoria do rendimento técnico do processo. Para tal foi realizada uma análise económica, onde foi calculada a taxa interna de rentabilidade e o valor actual líquido do investimento proposto.

2 - Parte experimental:

2.1- Fornos para cozedura de louça

Na Fábrica Cerâmica de Valadares existem quatro fornos para cozer a louça, dois contínuos de túnel (Forno 1 e Forno 4) e dois intermitentes (Forno 3i e Forno S). Neste trabalho apenas foram tidos em consideração os fornos **3i** e **4**, uma vez que o funcionamento do forno 1 é muito semelhante ao do forno 4 e o forno S só é praticamente utilizado para recozedura. Nas páginas seguintes, encontram-se representados os fornos 3i e 4, com a localização dos seus grupos de queima, chaminés de exaustão, entradas de gás e ar de queima e ainda os ventiladores.

a)



b)



Figura 13 – a) Imagem de uma das entradas do forno 3i; b) imagem da parte lateral do forno 3i.

O Forno 3i (Figura 13), é um forno intermitente, que possui duas zonas de entradas das vagonas (uma pelo lado norte e outra pelo lado sul), que são usadas à vez em cada ciclo de cozedura. O forno está equipado com quatro grupos de queima e um ventilador (para fornecer o ar de queima e proceder à refrigeração do forno). Este tem ainda uma única chaminé para a tiragem dos gases de combustão resultantes da cozedura, como se pode ver na figura 14. Neste forno podem ser cozidos vários tipos de peças, inclusive peças grandes

como bases de chuveiro, dadas as áreas de enforna das suas 10 vagonas (5 em cada ciclo) (Figura 15).

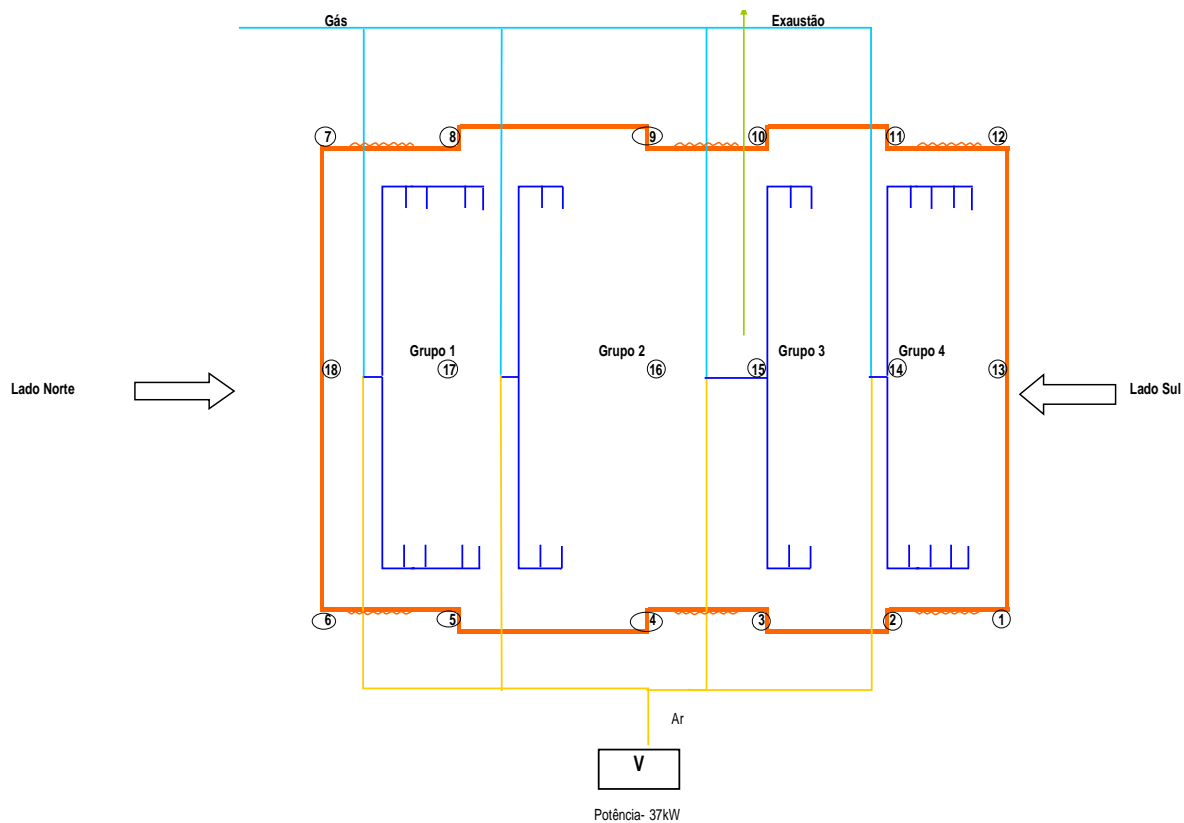


Figura 14 – Representação do forno intermitente 3i.



Figura 15 – Vagonas carregadas à espera para entrar no forno 3i.

No Forno 4 (Figura 16), existem seis grupos de queima, cada um com o seu ventilador para fornecer o ar para a combustão. Este tem três chaminés de extracção dos gases de combustão, a de tiragem aspiradora, a chaminé sem ventilador e a do ar quente da etapa de arrefecimento. O calor existente na corrente de gases que saem pela chaminé do ar quente da etapa de arrefecimento, é aproveitado no secador de louça existente nessa fábrica (Fábrica 4). Existem ainda ventiladores para fazer a refrigeração das peças (ar de refrigeração normal, refrigeração brusca e o ar de contravec) (Figura 17).

Este forno tem 65 vagonas, das quais 58 estão no seu interior carregadas com louça e as restantes estão fora do forno, à espera para a louça ser descarregada, ou para serem carregadas com louça para cozer.

a)



b)



Figura 16 – a) Vista lateral do forno 4; **b)** saída das peças cozidas.

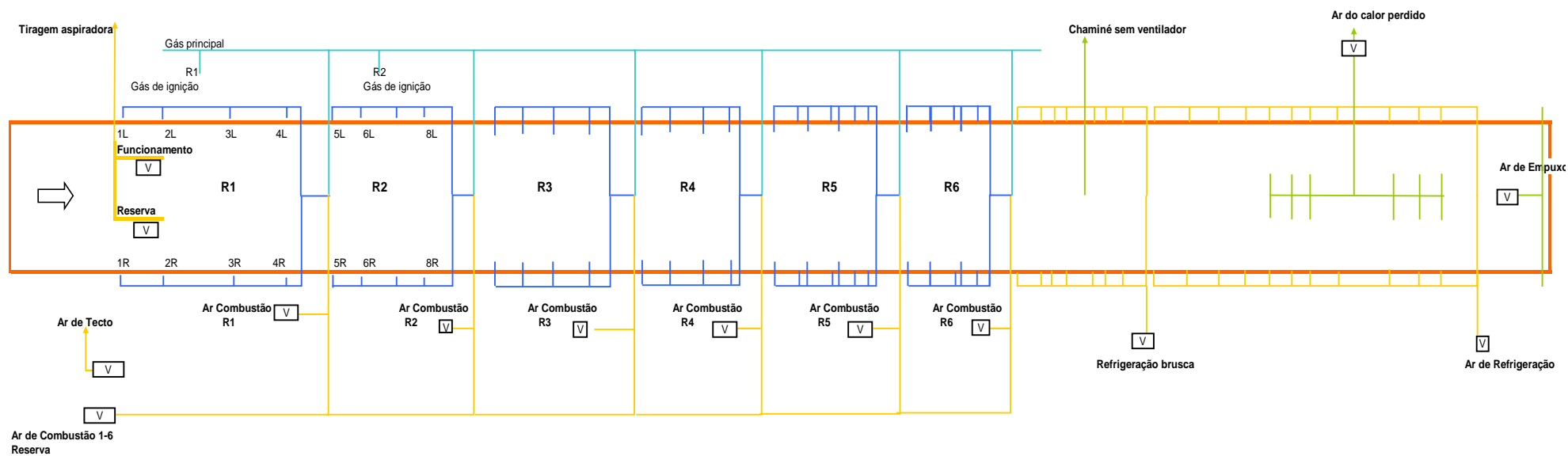


Figura 17 – Representação do forno 4, forno contínuo de túnel.

Na tabela 1, estão registados os valores das dimensões dos fornos em estudo.

Tabela 1 – Dimensões dos fornos.

Dimensões	Forno 4	Forno 3i
Comprimento (m)	78,0	11,0
Largura (m)	21,0	5,4
Altura útil (m)	0,8	-
Altura (m)	-	2,5
Área lateral (m ²)	58,5	27,5
Área tecto (m ²)	163,8	59,4
Área lateral por vagona (m ²)	1,1	-
Área tecto por vagona (m ²)	3,2	-
Volume interno forno (m ³)	122,9	-
Volume externo forno (m ³)	-	148,5
Área entrada (m ²)	1,6	13,5
Comprimento por vagona (m)	1,5	-

2.2 – Material refractário utilizado nas vagonas dos fornos

Vagonas do forno 3i:

Na figura 18 encontra-se uma fotografia de uma vagona do forno 3i, carregada com louça para ser cozida.

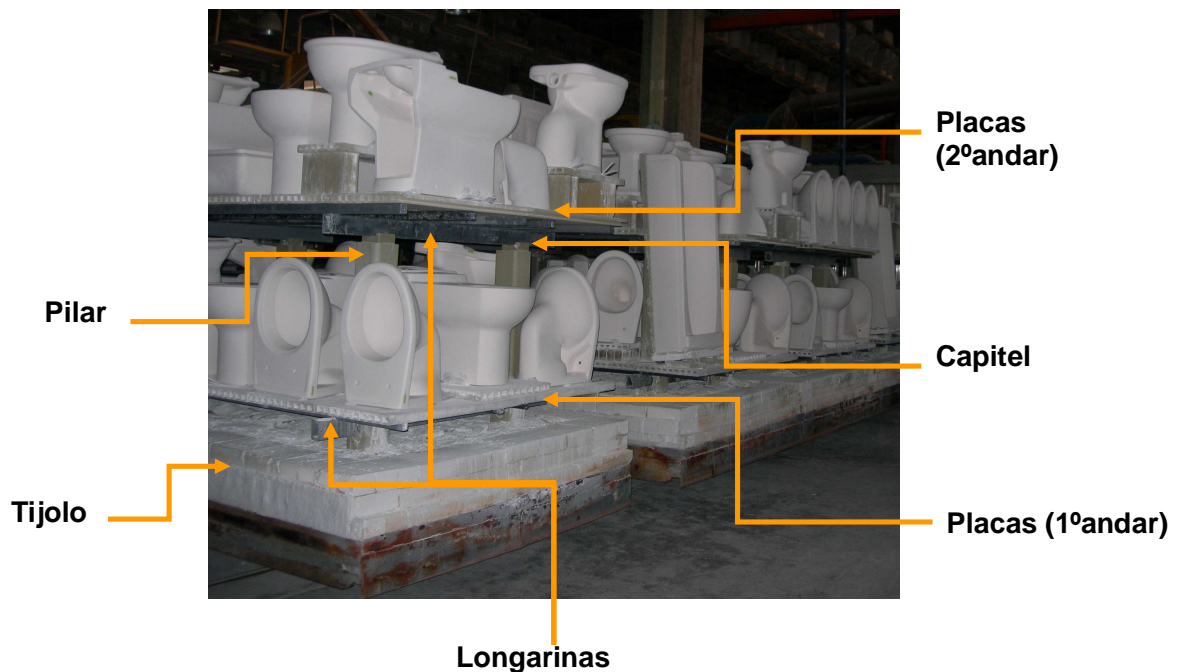


Figura 18 – Vagona do forno 3i e seus constituintes.

Na tabela A.1 do anexo A encontram-se as figuras dos constituintes das vagonas do forno 3i, bem como o material de que são feitos. Na tabela A.2 do anexo A, apresenta-se a massa desses constituintes.

Vagonas do forno 4:

Na figura 19 apresenta-se uma fotografia de uma vagona do forno 4, carregada com louça para cozer.

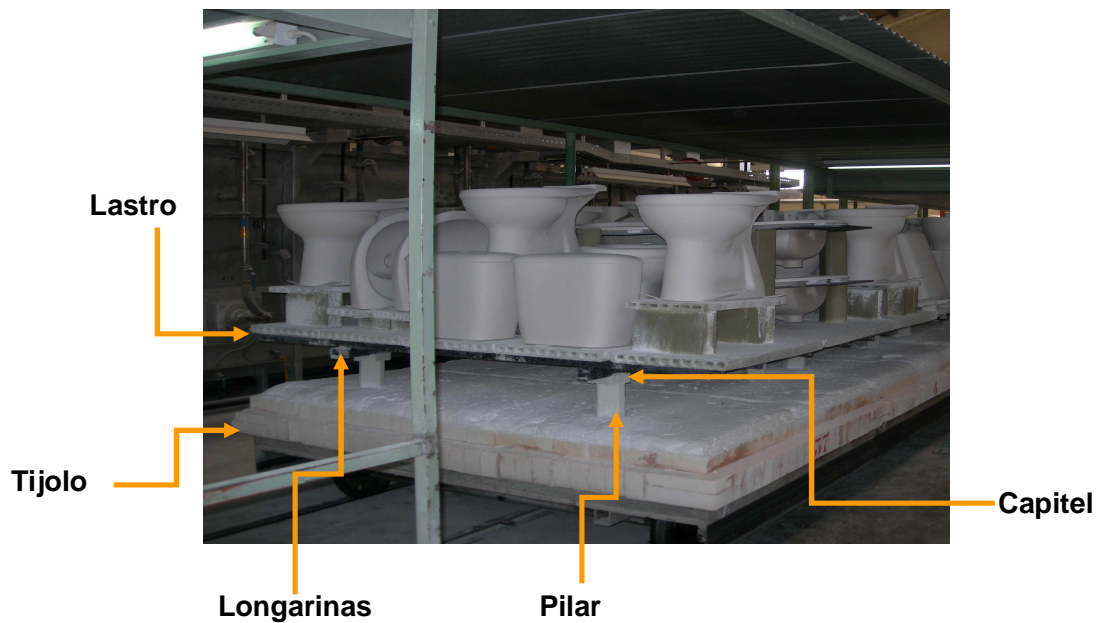

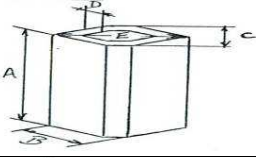
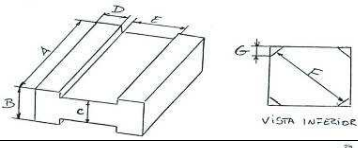
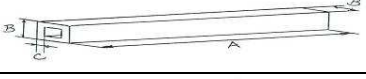
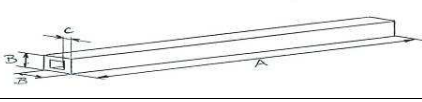
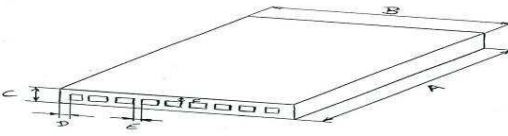


Figura 19 – Vagona do forno 4 e seus constituintes.

Na tabela 2 encontram-se os constituintes do primeiro andar das vagonas do forno 4, bem como o material de que são feitos. Esta exemplifica a constituição das vagonas dos fornos. A lista completa de material refractário que compõe as vagonas deste forno, encontra-se na tabela A.3 do anexo A. Na tabela A.4 do anexo A, apresenta-se a massa desses constituintes.

Tabela 2 – Representação e constituição dos componentes do 1º andar das vagonas do forno 4.

1º Andar	Componente	Figura	Material
	Tijolo (T1)		Isolante
	Pilar (R2)		Cordierite
	Capitel (X1)		Cordierite
	Longarina (L1)		Carboneto de silício
	Longarina (L2)		Carboneto de silício
Placa (P 1)		Cordierite	

2.3 – Material refractário utilizado como “móbilía refractária”

A louça sanitária, quando é cozida, por vezes não pode ser transportada directamente no lastro das vagonas. Neste caso, é necessário utilizar “móbilía refractária” que suporte a peça, de modo a que esta no final da cozedura não tenha deformações.

Na figura 20, para melhor compreender a enforna das peças, está uma fotografia onde são mostradas peças que são cozidas directamente no lastro e outras que são enfornadas na móbilía refractária respectiva.



Figura 20 – Peças enfornadas directamente no lastro e apoiadas na móbilía refractária.

Nesse sentido, foi elaborada uma lista de refractários utilizados nos vários fornos da fábrica, que constituem a “móbilía refractária” usada no apoio da enforna das peças destinadas à cozedura (tabela A.5 do anexo A). Nessa lista constam os desenhos técnicos das referidas peças, ou no caso destes não existirem são utilizadas fotografias, e também as dimensões de todo o material utilizado.

Estas peças de móbilía refractária foram também pesadas, para se poder saber a massa de refractário usada durante a cozedura. A lista completa da massa de móbilía refractária de cada peça encontra-se no anexo A, na tabela A.6.

É de referir que já existia uma lista com a móbilía refractária correspondente às peças produzidas, com medidas, massas e desenho técnico. No entanto, estes dados tiveram que ser conferidos, pois alguns estavam desactualizados ou, no caso das peças mais recentes, eram inexistentes.

3 - Processo de cálculo:

3.1 – Estratégia utilizada na realização dos balanços energéticos

Com o objectivo de realizar o balanço energético aos fornos, estão representados na figura 21 e 22 todas as correntes de entrada e saída dos fornos 3i e 4, respectivamente. Todos estes valores foram calculados na ferramenta de simulação em Excel que foi elaborada, para o diagnóstico da situação existente.

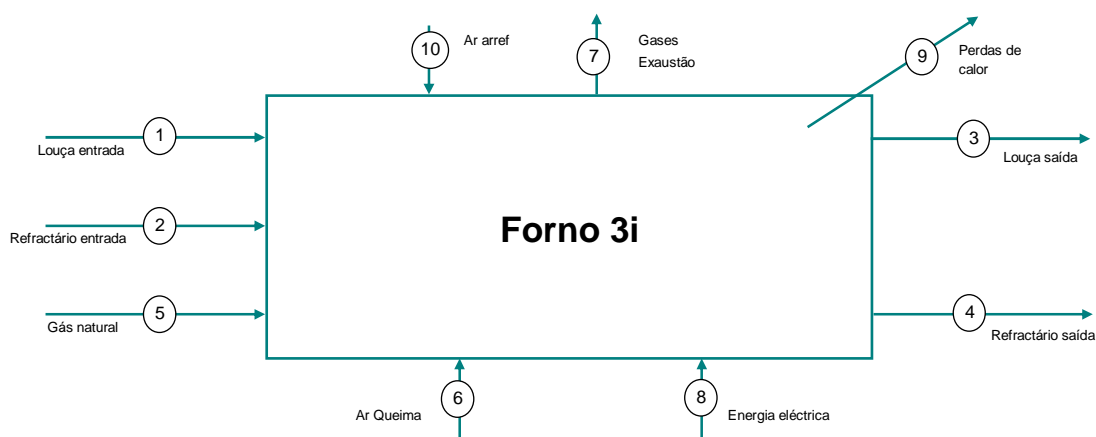


Figura 21 – Representação das correntes de entrada e saída no forno 3i.

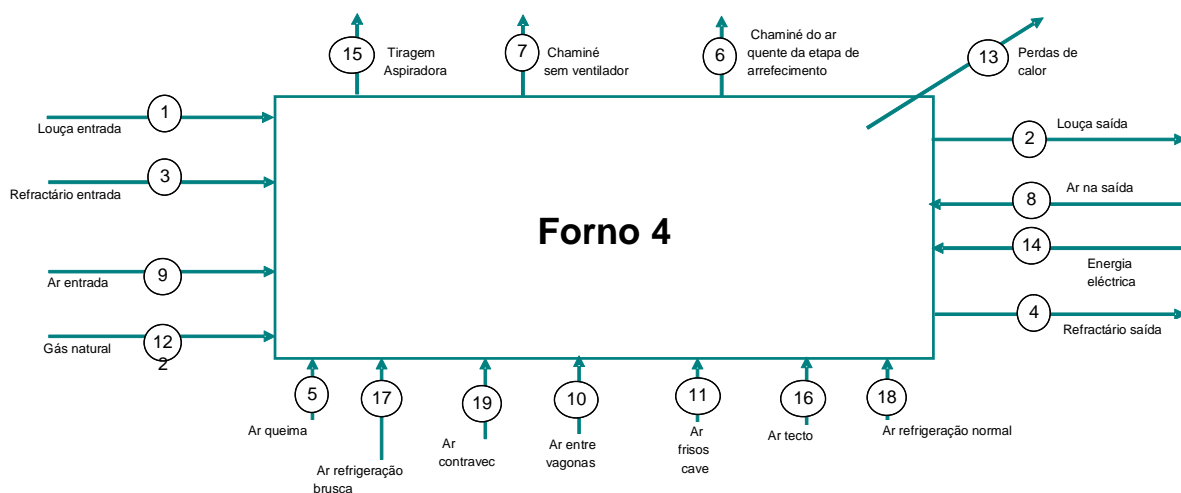


Figura 22 – Representação das correntes de entrada e saída no forno 4.

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

1 - Foram escolhidos dias a meio da semana, para evitar perturbações de mudança de marcha do forno no fim-de-semana.

2 - No momento da realização do balanço, foi recolhida uma lista completa das peças cozidas e da sua massa antes e após cozedura. Foi determinada a perda de massa ao fogo por parte das peças. Esta representa a percentagem de massa que a peça de louça perde devido à cozedura.

3 - Foi elaborada uma lista detalhada das peças refractárias que participam no ciclo de cozedura. Para o forno 4, foi inventariado todo o material a circular nas 65 vagonas. Quanto ao forno 3i, foram feitas duas contagens em cada um dos lados do mesmo. Os dados recolhidos constam na tabela A.5 do anexo A.

4 - Foram feitas leituras da energia eléctrica consumida.

Foi lida a intensidade de corrente eléctrica, dos vários equipamentos que compõem o forno, para posteriormente calcular a potência absorvida por cada um deles. No que diz respeito aos valores da voltagem e do $\cos \Phi$ estes são 380V e 0,98, respectivamente. O registo das leituras feitas, bem como os valores calculados encontram-se nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Valores usados para determinar a energia eléctrica consumida pelo forno 3i, no aquecimento e arrefecimento.

Arrefecimento	Intensidade corrente absorvida ventilador (A)	26
	Potência absorvida (kW)	17
	Tempo arrefecimento (h)	9,1
	Energia absorvida arref (kW.h)	152
Aquecimento	i absorvida queimadores + servo motores + ventilador (A)	35
	Potência absorvida (kW)	23
	Tempo aquecimento (h)	7,9
	Energia absorvida aquec. (kW.h)	177
Total Energia absorvida por ciclo (kW.h)		329
Nº ciclos por mês		43
Total Energia absorvida por mês (kW.h)		1,42x10⁴

Tabela 4 – Valores usados para determinar a energia eléctrica consumida pelo forno 4.

Intensidade corrente absorvida (A)	100
Potência absorvida por ciclo (kW)	65
Energia absorvida por mês (kW.h)	4,64x10⁴

5 - Foi realizada a leitura do gás consumido.

Foi feita a contagem do consumo de gás natural, no forno 3i durante um ciclo de cozedura e no forno 4 durante 24h. Foi também lida a pressão a montante do contador de gás, valor este que foi utilizado para a normalização do volume de gás natural. Com esse volume foi calculada posteriormente a energia de queima e o consumo específico dos fornos.

Os valores do caudal volumétrico normalizado de gás natural foram de 178 Nm³/h para o forno 3i e de 113 Nm³/h para o forno 4. Estes foram normalizados para uma temperatura e pressão de referência de 273 K e de 1 atm, respectivamente.

6 - Foram feitas leituras, em vários pontos, da temperatura exterior das paredes e do tecto do forno, para posteriormente calcular as perdas de calor pelas superfícies do mesmo.

As medições realizadas no forno 4, foram feitas de 3 em 3 metros nas paredes e de 7,5 em 7,5 metros no tecto, pelo que depois foi calculada a área da superfície onde foi feita a

medição. Os valores das temperaturas medidas, nas várias faces do forno, estão registados nas tabelas 5 e 6. A evolução da temperatura das paredes do forno também pode ser vista na figura A.1 do anexo A.

Tabela 5 – Registo das temperaturas da parede do lado esquerdo e direito do forno 4.

Comprimento Forno 4 (m)	Parede direita		Parede esquerda	
	Temperatura (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura média (°C)
0	23,3	-	24,4	-
3	22,9	23,1	25,5	25,0
6	25,2	24,1	28,2	26,9
9	30,6	27,9	35,1	31,7
12	28,4	29,5	36,0	35,6
15	39,9	34,2	39,3	37,7
18	38,1	39,0	38,7	39,0
21	44,6	41,4	56,2	47,5
24	45,1	44,9	45,4	50,8
27	36,2	40,7	33,3	39,4
30	35,3	35,8	33,6	33,5
33	37,1	36,2	35,0	34,3
36	38,4	37,8	37,9	36,5
39	38,1	38,3	36,2	37,1
42	35,3	36,7	35,4	35,8
45	33,0	34,2	36,0	35,7
48	30,8	31,9	33,1	34,6
51	28,0	29,4	31,1	32,1
54	28,7	28,4	29,7	30,4
57	34,1	31,4	35,7	32,7
60	29,7	31,9	34,0	34,9
63	30,9	30,3	32,3	33,2
66	28,0	29,5	28,7	30,5
69	24,0	26,0	27,4	28,1
72	24,2	24,1	27,7	27,6
75	23,0	23,6	25,2	26,5
78	23,6	23,3	24,3	24,8

Tabela 6 – Registo das temperaturas do tecto do forno 4.

Comprimento Forno 4 (m)	Temperatura tecto (°C)	Temperatura média tecto (°C)
0	30,1	-
7,5	36,8	33,5
15,0	50,0	43,4
22,5	69,0	59,5
30,0	79,0	74,0
37,5	99,0	89,0
45,0	85,0	92,0
52,5	49,0	67,0
60,0	52,0	50,5
67,5	33,0	42,5
75,0	25,0	29,0

Relativamente ao forno 3i, foram feitas medições da temperatura da superfície do mesmo nos 18 pontos indicados na figura 14, da representação do forno. Uma vez que a temperatura deste forno varia com a evolução da curva de cozedura, optou-se por efectuar medições da temperatura das paredes, quando a temperatura interna do forno atingisse os 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C e 1200°C. Este procedimento permitiu obter um modelo de ajuste aos dados calculados, para determinar as perdas térmicas em qualquer fase da cozedura. As medições feitas neste forno encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 – Registo das temperaturas das paredes que constituem o forno 3i, para diversas temperaturas internas.

		200°C				400°C				600°C				800°C				1000°C				1200°C			
		T (°C)		Tmédia (°C)	T (°C)		Tmédia (°C)	T (°C)		Tmédia (°C)	T (°C)		Tmédia (°C)	T (°C)		Tmédia (°C)	T (°C)		Tmédia (°C)	T (°C)		Tmédia (°C)			
Direito norte	T1	38,4	40,2	39,3	47,8	42,1	48,6	45,4	56,7	44,3	47,1	45,7	61,2	54,5	50,7	52,6	68,3	61,7	55,4	58,6	70,9	64,0	64,5	64,3	76,2
	T2	57,4	55,1	56,3		76,4	59,6	68,0		76,8	76,4	76,6		87,0	80,8	83,9		82,0	84,4	83,2		93,6	82,7	88,2	
	T3	47,5	48,7	48,1	54,2	50,0	67,9	59,0	62,0	50,3	53,7	52,0	54,8	54,0	56,3	55,2	59,4	58,6	62,2	60,4	63,3	74,5	77,6	76,1	77,8
	T4	60,5	59,9	60,2		61,5	68,6	65,0		58,7	56,5	57,6		64,1	63,3	63,7		67,2	65,3	66,3		77,8	81,1	79,5	
	T5	55,8	57,3	56,6	47,7	59,0	72,6	65,8	54,3	59,3	58,1	58,7	51,5	63,8	63,4	63,6	55,3	69,6	69,2	69,4	57,4	84,6	83,6	84,1	67,6
	T6	37,8	40,0	38,9		41,3	44,2	42,8		44,1	44,3	44,2		46,1	47,8	47,0		45,3	45,5	45,4		48,1	54,1	51,1	
Esquerdo norte	T7	37,2	39,5	38,4	46,8	39,3	44,3	41,8	46,8	41,4	38,6	40,0	48,0	44,1	44,0	44,1	49,3	47,0	47,9	47,5	51,9	55,8	56,3	56,1	61,4
	T8	53,2	57,1	55,2		53,0	50,6	51,8		58,3	53,5	55,9		53,5	55,6	54,6		57,3	55,5	56,4		65,9	67,5	66,7	
	T9	37,2	40,4	38,8	52,9	43,8	44,6	44,2	59,0	45,0	45,2	45,1	66,0	46,6	48,8	47,7	73,8	50,0	51,6	50,8	76,0	60,1	62,4	61,3	84,7
	T10	83,3	50,6	67,0		88,9	58,8	73,9		86,6	87,0	86,8		100,3	99,4	99,9		102,1	100,3	101,2		108,3	107,9	108,1	
	T11	45,4	42,5	44,0	41,8	56,3	47,8	52,1	46,8	51,6	53,2	52,4	47,2	58,0	57,7	57,9	51,0	63,7	62,7	63,2	55,2	71,6	75,0	73,3	63,0
	T12	38,7	40,7	39,7		41,0	42,1	41,6		42,3	41,6	41,95		44,2	44,1	44,2		46,8	47,6	47,2		52,8	52,5	52,7	
Tecto	T13	40,4	40,4	40,4	40,5	36,3	36,3	36,3	37,1	36,4	36,4	36,4	39,7	43,7	43,7	43,7	47,5	51,4	51,4	51,4	58,2	70,9	70,9	70,9	72,5
	T14	40,5	40,5	40,5		37,9	37,9	37,9		43,0	43,0	43,0		51,3	51,3	51,3		64,9	64,9	64,9		74,0	74,0	74,0	
	T15	39,7	39,7	39,7	40,4	36,5	36,5	36,5	37,5	40,4	40,4	40,4	40,4	48,0	48,0	48,0	46,9	53,2	53,2	53,2	52,3	81,0	81,0	81,0	78,5
	T16	41,0	41,0	41,0		38,4	38,4	38,4		40,4	40,4	40,4		45,8	45,8	45,8		51,3	51,3	51,3		75,9	75,9	75,9	
	T17	38,4	38,4	38,4	39,4	40,4	40,4	40,4	39,6	39,6	39,6	39,6	42,1	44,0	44,0	44,0	47,4	57,2	57,2	57,2	53,5	79,4	79,4	79,4	73,1
	T18	40,3	40,3	40,3		38,8	38,8	38,8		44,6	44,6	44,6		50,8	50,8	50,8		49,8	49,8	49,8		66,8	66,8	66,8	

7 – Contabilizou-se a quantidade de ar introduzida ou retirada do forno pelos ventiladores.

No forno 4, existem catorze ventiladores, seis dos quais estão nos seis grupos de queima, dois na tiragem aspiradora, um no ar de tecto, um como reserva do ar de combustão, um na refrigeração brusca, um na refrigeração normal, um no ar quente da etapa de arrefecimento e um no ar de contravec. Em todos estes ventiladores, exceptuando o do ar quente da etapa de arrefecimento e o da tiragem aspiradora, existem acoplados deprimómetros que dão o valor da diferença de pressão existente. Com esse valor e o da constante (c) característica para o ar / gás em cada ventilador, obtém-se o caudal volumétrico de passagem de ar / gás em cada um deles. Estes valores são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Valores das constantes (c; [7]) e do diferencial de pressão para o gás natural e ar, em todos os grupos de queima e ventiladores do forno 4.

	Constante – C (Nm ³ /(h.(mmca) ^{1/2}))	Dif. Pressão (mmca)
R1	12,02	0,00
Grupos de queima (Gás natural) *	R2	10,75
	R3	11,42
	R4	7,59
	R5	13,28
	R6	18,97
	Ar tecto	117,60
Arref. brusco	569,26	3,60
Contravec	3162,60	1,00
Arref. Normal	1054,30	0,96

* Grupos de queima definidos na figura 17 deste relatório.

O cálculo dos caudais de ar real no forno 4 é explicado na secção 3.5.

Para a determinação do caudal volumétrico de passagem de ar nos ventiladores do ar quente da etapa de arrefecimento e da tiragem aspiradora, foram utilizadas as curvas características dos mesmos. Com estas foi estimado o caudal de ar, em função dos valores

da potência absorvida por cada ventilador. Os valores destas são 25 kW e 10 kW para a tiragem aspiradora e para a chaminé do ar quente da etapa de arrefecimento, respectivamente. As referidas curvas encontram-se no anexo C, nas figuras C.1 e C.2.

No forno 3i, a determinação do caudal de ar foi feita de maneira diferente, uma vez que neste não existem deprimómetros, como no caso anterior. Este cálculo é explicado mais à frente na secção 3.6.

8 – Mediu-se a velocidade de ar à entrada e saída do forno / Determinou-se o caudal de ar parasita.

O forno 4 trabalha com uma ligeira depressão no primeiro terço do seu túnel, logo existem algumas correntes de ar parasita que penetram no forno em diversos locais. Para conhecer todos estes caudais de ar parasita que penetram no forno foram feitas medições da velocidade do ar, na entrada e saída do forno, utilizando o anemómetro LCA 6000 da AirFlow (Reino Unido, características no anexo D). Estas foram feitas na área livre (sem louça), isto é, na parte superior da vagona até ao tecto do forno. Esta zona representa 60% da área de entrada / saída do forno. Foram também realizadas medições nos 40% restantes, correspondendo à região acima do lastro onde há uma maior quantidade de louça a impedir a entrada do ar.

Além do ar que penetra pela entrada e pela saída do forno, ainda existe uma parte que entra pelos frisos da cave e pelos espaços entre as vagonas. Nestes casos não foi possível fazer uma medição da velocidade do ar parasita, tendo-se considerado um valor médio de 0,20 m/s. Segundo o manual de instruções do forno, fornecidas pelo fabricante, esta zona deve ter uma velocidade de entrada de ar entre 0 e 0,25 m/s, para que não haja alterações na cozedura das peças. Como o forno já apresenta algum desgaste devido ao número de anos de funcionamento admitiu-se que a velocidade deverá estar mais perto do limite superior do intervalo admitido (0,2 m/s).

Para o cálculo do caudal volumétrico de ar que entra pelos frisos da cave, considerou-se que a área por onde este entra foi determinada, para umas frinchas de 0,02m de largura, ao longo do comprimento da cave.

Relativamente ao ar que entra pelo espaço entre as vagonas, o seu caudal foi determinado considerando que este fenómeno ocorre apenas nas primeiras 35 vagonas

(local da cave e zona de depressão no forno) que se encontram no interior do forno. Admitindo que os espaços entre estas são de 0,005 m, pôde calcular-se então a área total do espaço entre essas 35 vagonas, com esse valor e com uma velocidade de 0,2 m/s, determina-se um caudal volumétrico de ar associado.

As velocidades de ar parasita medidas e estipuladas constam na tabela 9.

Tabela 9 – Valores da velocidade do ar na entrada, saída, nas frinchas da cave e no espaço entre vagonas, do forno 4.

	Velocidade Ar (m/s)	
Ar entrada forno	60%	1,49
	40%	0,50
Ar saída forno	60%	0,40
	40%	0,13
Ar frinchas cave	0,20 *	
Espaço entre vagonas	0,20 *	

* Valor estipulado de acordo com o manual do forno.

3.1.1 - Simulador elaborado

Com o levantamento das condições técnicas e operacionais dos equipamentos em estudo, descrita nos oito pontos citados anteriormente, foi elaborada uma ferramenta de simulação em Excel, para o balanço energético detalhado. Esta simulação serviu como base deste trabalho, para o diagnóstico da situação existente no processo de cozedura nos dois fornos.

No simulador constam os inventários realizados à louça e refractário em circulação na fase de cozedura, bem como todos os cálculos efectuados referentes ao balanço energético. Neste existe também uma parte que diz respeito à poupança económica resultante da proposta de substituição parcial do material refractário existente (cordierite) por elementos em carboneto de silício.

De seguida apresentam-se algumas fracções (Figura 23 e 24) do simulador citado:

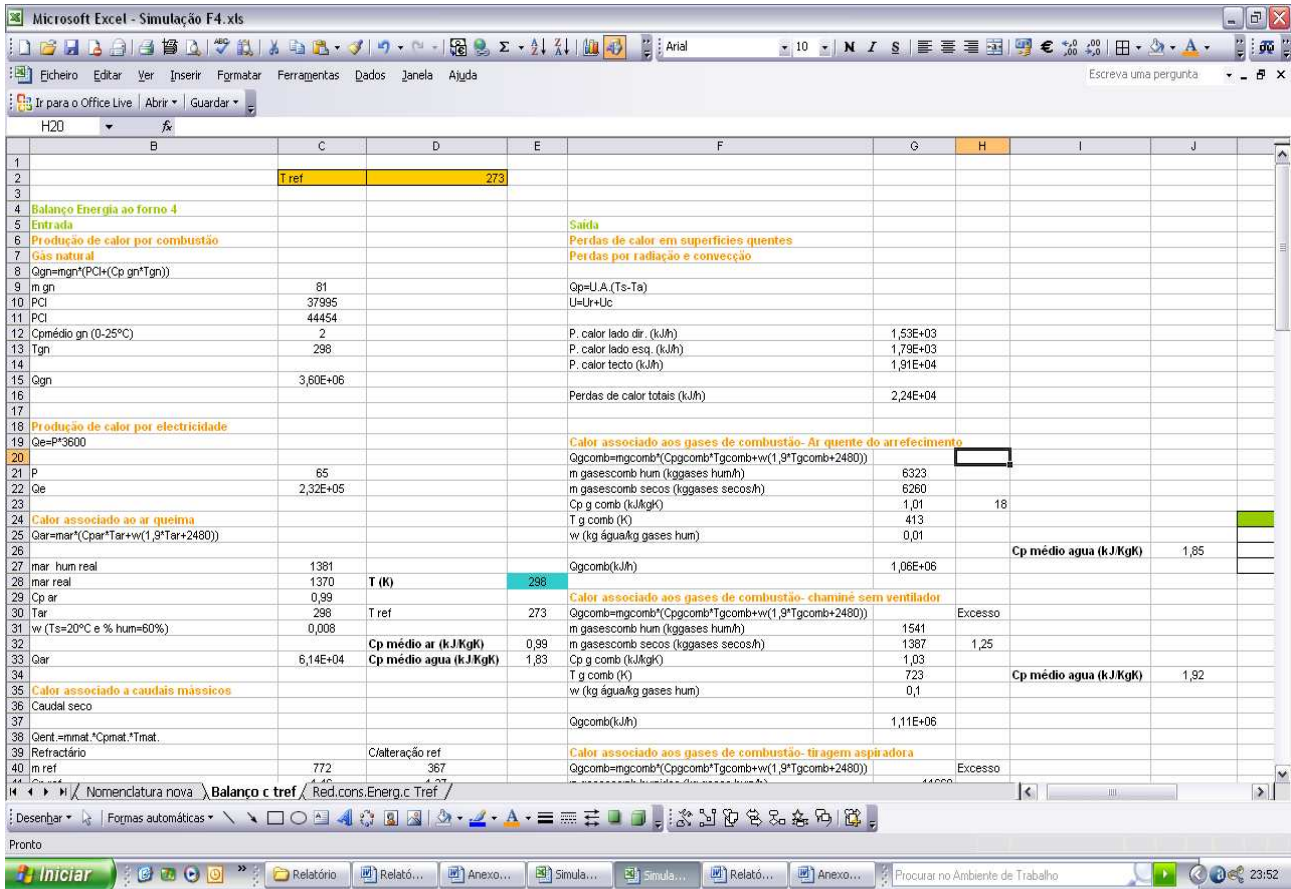


Figura 23 – Fracção da folha de cálculo do balanço energético ao forno 4.

	A	B	E	F	G	H	K	L	R	S	T	U	V
	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	Massa Mobília por Peça Lado Norte 1 (Kg)	Massa Mobília por Peça Lado Norte 2 (Kg)	# peças de mobília refractária no forno 3i lado Norte 1	# peças de mobília refractária no forno 3i lado Norte 2	Massa total Mobília ref lado norte 1(Kg)	Massa total Mobília ref lado norte 2 (Kg)	Massa refract c/ alterações p/ peça Lado Norte 1	Massa refract c/ alterações p/ peça Lado Norte 2	Massa total c alteração ref lado norte 1	Massa total c alteração ref lado norte 2	
366	70374	PLACA SMALL TOP 610 x 510 mm	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
367	70384	PLACA LARGE TOP 1170 x 510 mm	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
368	70390	PLACA DE REVESTIMENTO 750 x 500 mm	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
369	78615	PIA RECTANGULAR SINTRA	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
370	78616	PIA RECTANGULAR SILVES (C/ ABA)	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
371	78631	BASE DE CHUVEIRO 70 x 90 DANILO	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
372	78632	BASE DE CHUVEIRO 70 x 90 LUSA	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
373	78633	BASE DE CHUVEIRO 70 x 100 ARIS	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
374	78634	BASE DE CHUVEIRO 70 x 120 ARIS	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
375	78635	BASE DE CHUVEIRO 80 x 100 PÁDUA	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
376	78636	BASE DE CHUVEIRO 80 x 120 PÁDUA	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
377	78639	BASE DE CHUVEIRO 90 x 90 ÁGUA	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
378	78660	LAVA-ROUPA MOZELA	12,42	12,42	14	29	173,88	360,18	7,74	7,74	108,30	224,34	
379	78707	LAVATÓRIO GOÁ (GRESANIT)	9,71	9,71	0	0	0,00	0,00	9,71	9,71	0,00	0,00	
380	78711	LAVATÓRIO RIO 1 FURO (GRESANIT)		9,42	0	0	0,00	0,00	9,42	9,42	0,00	0,00	
381	78717	LAVATÓRIO BOSTON (GRESANIT)	3,72	3,72	0	0	0,00	0,00	2,29	2,29	0,00	0,00	
382	78727	LAVATÓRIO TUNIS (GRESANIT)	9,71	9,71	0	0	0,00	0,00	9,71	9,71	0,00	0,00	
383	78737	LAVATÓRIO MALIBU (GRESANIT)	6,70	6,70	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
384	78747	LAVATÓRIO PALENA (GRESANIT)	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
385	78761	LAVATÓRIO RECIFE PLUS 1 FURO (GRESANIT)	8,33	8,33	32	25	266,56	208,25	4,35	4,35	139,11	108,68	
386	78791	LAVATÓRIO P/ DEFICIENTES 1 FURO (GRESANIT)	7,80	7,80	0	0	0,00	0,00	4,24	4,24	0,00	0,00	
387	78811	LAVATÓRIO ISIS 1 FURO (GRES.) S/ FIX PAR	13,65	13,65	0	0	0,00	0,00	12,30	12,30	0,00	0,00	
388	78812	LAVATÓRIO ISIS 1 FURO (GRES.) C/ FIX PAR ESQ.	13,65	13,65	0	0	0,00	0,00	12,30	12,30	0,00	0,00	
389	78813	LAVATÓRIO ISIS 1 FURO (GRES.) C/ FIX PAR DIR.	13,65	13,65	0	0	0,00	0,00	12,30	12,30	0,00	0,00	
390	78821	LAVATÓRIO GALLERY (DIREITO) 1 FURO (GRES.)	10,28	10,28	0	0	0,00	0,00	4,97	4,97	0,00	0,00	
391	78831	LAVATÓRIO GALLERY (ESQUERDO) 1 FURO (GRES.)	10,28	10,28	0	0	0,00	0,00	4,97	4,97	0,00	0,00	
392							830 Kg	851 Kg			462 Kg	541 Kg	
393													

Figura 24 – Fração da folha de cálculo do inventário às peças cozidas no lado norte do forno 3i.

3.2 - Dados recolhidos para os cálculos

Os valores referidos nas tabelas seguintes, que foram necessários para os vários cálculos realizados, tem várias proveniências, estes foram calculados, medidos ou retirados das diversas referências bibliográficas.

A razão estequiométrica de ar foi determinada através dos cálculos efectuados para a combustão estequiométrica do gás natural (estes encontram-se sintetizados na tabela A.7 do anexo A, e foram realizados para a composição volumétrica que consta na tabela A.8 do anexo A).

No que diz respeito aos caudais de ar estequiométrico, estes foram calculados com base no valor da razão estequiométrica de ar, que consta na tabela 10, e no caudal de gás consumido na cozedura em cada forno.

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 E).

O valor da capacidade calorífica da louça foi fornecido pelo laboratório da fábrica, este é resultante de ensaios anteriormente realizados.

O calor específico do refractário actual foi conseguido através de consulta das fichas técnicas dos materiais refractários, recebidas dos fornecedores. Considerou-se para este o valor da capacidade calorífica da cordierite, uma vez que, este é o material que constitui a maioria da mobília refractária. Quanto ao valor do calor específico do refractário após as alterações, este foi determinado através do inventário realizado à mobília refractária em circulação nos fornos. Com este inventário e sabendo as peças de mobília refractária que foram substituídas por SiC, pôde ser determinada a percentagem de mobília em cordierite e em carboneto de silício. Posteriormente calculou-se uma capacidade calorífica ponderada, para cada forno. No forno 3i, a percentagem de cordierite é de 63% e a de carboneto de silício é de 37%. Já no forno 4 a cordierite representa 65% e o carboneto de silício 35%.

As capacidades caloríficas do ar e da água foram determinadas utilizando os dados existentes na bibliografia [8], para um intervalo de temperaturas entre os 273K e a temperatura média da corrente.

Os valores dos calores específicos das correntes dos gases de combustão também foram calculados com consulta do livro referido anteriormente [8], através da composição mássica dos gases e para um intervalo de temperaturas entre os 273K e a temperatura média da corrente.

As temperaturas da louça e do refractário, à entrada e à saída, foram medidas com um termómetro de infra-vermelhos. As que dizem respeito aos gases de combustão da chaminé do ar quente da etapa de arrefecimento, da chaminé sem ventilador e a da tiragem aspiradora, encontravam-se registadas no computador do forno ou constavam nos relatórios das medições realizadas periodicamente aos gases de combustão do forno. As restantes temperaturas apresentadas na tabela 12 foram estipuladas.

A percentagem de humidade das correntes de gases de combustão foi determinada através do valor de excesso de ar presente em cada caso, consultando a tabela A.9 do anexo A.

Relativamente à humidade do ar, este valor foi obtido através da consulta de uma carta psicrométrica, considerando que o ar tem uma humidade relativa de 60% e uma temperatura seca de 20°C.

Os dados utilizados nos cálculos efectuados, encontram-se nas tabelas 10 a 12.

Tabela 10 – Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados: fornos 3i e 4.

	Razão estequiométrica de ar ($\text{kg}_{\text{Ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$)	15,40
	Poder calorífico Inferior (kJ/m^3) (273K)	37995
	Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	20
	Calor latente de vaporização da água (kJ/kg) [8]	2480
	Temperatura de referência (K)	273
	Gás natural (273-298K)	2,00
Capacidade calorífica média (kJ/kgK)	Louça	1,90
	Água (273K-298K)	1,84
	Refractário antes substituição	1,46
	Refractário após substituição no forno 3i	1,36
	Refractário após substituição no forno 4	1,37

Tabela 11 – Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados: forno 3i.

Caudal de ar estequiométrico (kg Ar/h)	2303
Capacidade calorífica média do ar queima / ar arrefecimento (kJ/kgK) (273K-298K)	0,99
$T_{gn}=T_{arq}=T_{refe}=T_{loue}=T_{aa}$ (K)	298
$W_{arq}=W_{aa}=W_{ga}$ (kg _{água} /kg _{arseco})	0,0080

Tabela 12 – Valores dos dados utilizados nos cálculos efectuados: forno 4.

	Caudal de ar estequiométrico (kg Ar/h)	1245
Capacidade calorífica média (kJ/kgK)	$Cp_{ar}=Cp_{arq}=Cp_{aef}=Cp_{asf}=Cp_{aev}=Cp_{afc}=Cp_{art}=Cp_{arb}=Cp_{arn}=Cp_{arc}$ (273K-298K) *	0,99
	Gases combustão chaminé do ar quente do arrefecimento (273K-413K) *	1,01
	Gases combustão chaminé sem ventilador (273K-723K) *	1,03
	Gases combustão chaminé tiragem aspiradora (273K-393K) *	1,02
Temperatura (K)	$T_{gn}=T_{arq}=T_{refe}=T_{loue}=T_{aef}=T_{asf}=T_{aev}=T_{afc}=T_{art}=T_{arb}=T_{arn}=T_{arc}$	298
	Gases chaminé do ar quente da etapa de arrefecimento	413
	Gases chaminé sem ventilador	723
	Gases chaminé tiragem aspiradora	393
	Louça à saída	306
	Refractário à saída	315
Humidade (kg _{água} /kg _{arseco})	$T_{max.ref}$	1473
	$W_{arq}=W_{aef}=W_{asf}=W_{aev}=W_{afc}=W_{art}=W_{arb}=W_{arn}=W_{arc}$	0,0080
	Gases chaminé do ar quente do arrefecimento	0,010
	Gases chaminé sem ventilador	0,10
	Gases chaminé tiragem aspiradora	0,030

* Valores calculados com os referidos intervalos de temperaturas, através dos dados da figura F1 do anexo F, retirados da referência bibliográfica [8].

3.3 – Consumos energéticos

- Percentagem de perda de massa ao fogo:

Para determinar a percentagem média de perda de massa ao fogo (% pmf), foram escolhidas algumas peças, cuja pesagem se fez antes e após a cozedura.

- Energia de queima:

Para calcular a energia de queima (EQ; [9]), foi necessário determinar previamente o volume de gás consumido normalizado (V_{norm}) durante a cozedura e utilizar o poder calorífico inferior do gás natural (PCI). O cálculo foi realizado através da equação seguinte:

$$EQ = PCI \times V_{norm} \quad (1)$$

- Consumo específico de energia do forno:

O consumo específico do forno ($Cons_{.esp}$; [9]) foi determinado para os dois fornos, utilizando o valor de energia de queima, calculado anteriormente, e o da massa de louça à entrada do forno (m_{loue}). Este é dado pela expressão seguinte:

$$Cons_{.esp} = \frac{EQ}{m_{loue}} \quad (2)$$

3.4 – Redução de massa de refractário

- Cálculo da redução de massa de refractário:

O primeiro cálculo efectuado foi o da massa volúmica do carboneto de silício (ρ_{SiC}) e da cordierite (ρ_{cord}). Esta foi determinada através do volume e da massa de uma peça de material refractário escolhida. Posteriormente, com o valor da massa das restantes peças de material refractário de cordierite, calcularam-se os volumes respectivos (V_{cord}) a partir da sua massa volúmica.

Depois de se determinar o volume actual das peças de cordierite, bem como a sua espessura (Esp_{cord}), foi calculado o volume que estas teriam se fossem feitas de carboneto de silício (V_{SiC}) com 8 mm de espessura.

Este volume foi determinado pela seguinte expressão:

$$V_{SiC} = \frac{8 \times V_{cord}}{Esp_{cord}} \quad (3)$$

A massa do refractário substituto (m_{SiC}), foi calculada por:

$$m_{SiC} = V_{SiC} \times \rho_{SiC} \quad (4)$$

- Percentagem de redução de massa de refractário:

Depois de ser calculada a massa do refractário após as alterações efectuadas no mesmo, foi determinada a percentagem de redução de massa ($\%_{Red.massa}$), utilizando os valores da massa de refractário actual (m_{refact}) e a que este terá após a substituição parcial no mesmo ($m_{refalter}$).

3.5 – Caudais de ar real e parasita: forno 4

- Caudal de ar parasita

No forno 4, houve a necessidade de determinar as correntes de ar parasita que existem no mesmo: o caudal de ar parasita penetra no interior do forno pela entrada, pela saída, pelos frisos da cave e pelos espaços entre as vagonas.

Os caudais de ar parasita foram calculados com as velocidades referidas na tabela 9.

- Caudal mássico real de ar nos grupos de queima

Foram calculados inicialmente os caudais estequiométricos de ar (\dot{m}_{arest}) e o caudal de gás natural (\dot{m}_{gn}). Este último foi determinado através do caudal volumétrico de gás natural (\dot{V} ; [7]) (equação 5), que foi calculado através das leituras dos diferenciais de pressão (ΔP) e da constante característica do medidor de caudal do gás (c ; [7]) (Tabela 8).

$$\dot{V} = c \times \sqrt{\Delta P} \quad (5)$$

Quanto ao caudal estequiométrico de ar, este foi calculado para a combustão estequiométrica do gás natural, com a composição que se encontra presente na tabela A.8 do anexo A. A síntese dos cálculos realizados para a combustão em causa, estão descritos na tabela A.7 do anexo A.

Com base no caudal estequiométrico de ar, necessário para a queima do caudal de gás natural consumido e dado que os grupos de queima deste forno trabalham com 10% de excesso de ar, foi calculado o caudal de ar real que entra no mesmo. Os valores dos caudais mássicos estequiométricos e reais dos seis grupos de queima encontram-se na tabela A.10 do anexo A.

A determinação dos caudais de ventilação e de ar de combustão tem como objectivo conhecer a massa de ar que circula no forno. Para esse fim, foi definida uma matriz (resultante da diferença de pressão negativa existente no mesmo) para calcular o caudal de ar que sai por uma chaminé existente neste forno, que não tem ventilador para expulsar os gases. Para se determinar o valor deste caudal de gases procedeu-se a um balanço de

massa ao forno 4, após serem conhecidos todos os outros caudais de ar e gases que circulam no forno. Na tabela 13 encontram-se os valores de caudais envolvidos no forno 4.

Tabela 13 – Valores da massa molecular, temperatura, pressão, massa volúmica, caudal volumétrico e mássico das respectivas correntes de ar e gases do forno 4.

	Fluido	M (g/mol)	T (K)	Pressão (bar)	ρ_f (kg/m ³)	Caudal volumétrico (m ³ /h)	Caudal mássico (kg/h)
Ar Queimadores	Ar	28,9	298	1,09	1,29	1073	1381
Ar tecto	Ar	28,9	298	1,06	1,25	318	399
Ar arrefecimento brusco	Ar	28,9	298	1,06	1,25	1113	1393
Ar arrefecimento normal	Ar	28,9	298	1,03	1,22	1095	1333
Ar contravec	Ar	28,9	298	1,01	1,19	3425	4080
Ar entrada forno	Ar	28,9	298	1,00	1,18	6203	7331
Ar frisos cave	Ar	28,9	298	1,00	1,18	1123	1327
Ar espaço entre vagonas	Ar	28,9	298	1,00	1,18	265	313
Ar saída forno	Ar	28,9	298	1,00	1,18	1665	1968
Ar tiragem aspiradora	Gases	28,4	393	1,06	0,93	12500	11660
Chaminé do ar quente da etapa de arrefecimento	Ar	28,9	413	1,06	0,90	7000	6323
Chaminé sem ventilador	Gases	28,0	723	1,00	0,47	-	1541

3.6 – Caudal de ar nos grupos de queima: forno 3i

Para fazer este cálculo, foi tomada em consideração a curva de composição de Oxigénio no interior do forno, durante um ciclo de cozedura, com o objectivo de determinar o excesso de ar presente ao longo da cozedura. Este gráfico encontra-se na figura C.3, do anexo C. Foi determinada essa percentagem para as primeiras 10 horas de cozedura (aquecimento).

Com essa percentagem e através da tabela A.9 do anexo A, foi determinado o excesso de ar para cada tempo. Utilizando o valor do excesso de ar e do caudal de ar estequiométrico, previamente calculado com o coeficiente de ar estequiométrico e com o caudal de gás consumido, determinou-se o caudal de ar de queima a entrar no forno durante o aquecimento (\dot{m}_{arq}). Este foi determinado pela expressão seguinte:

$$\dot{m}_{arq} = E \times \dot{m}_{arest} \quad (6)$$

Os valores calculados do caudal de ar de queima deste forno encontram-se na tabela 14.

Tabela 14 – Valores da temperatura média interna do forno, da percentagem de oxigénio, do excesso de ar, bem como dos caudais de combustível, de ar estequiométrico e de ar real, para vários tempos do aquecimento no forno 3i.

Tempo segmento (h)	Tempo acumulado (h)	Temperatura média segmento (K)	% O ₂	Excesso	Caudal de combustível (kg/ciclo)	Caudal de ar estequiométrico (kg/ciclo)	Caudal de ar queima (kg/ciclo)
0,00	0,00				0	0	0
0,75	0,75	398	20,0	7,00	112	1727	12092
1,00	1,75	473	15,9	3,50	150	2303	8061
2,00	3,75	648	11,0	2,25	299	4607	10365
2,75	6,50	848	7,6	1,60	411	6334	10134
0,33	6,83	948	4,1	1,20	50	768	921
0,75	7,58	1073	2,8	1,15	112	1727	1987
0,83	8,42	1273	2,8	1,15	125	1919	2207
0,40	8,82	1411	3,1	1,15	60	921	1060
0,25	9,07	1448	4,1	1,20	37	576	691

3.7 – Balanço de Energia aos fornos:

o Forno 4 – Correntes de entrada

Para o cálculo do caudal térmico de combustão do gás natural (Q_{gn} ; [9]) foi necessário conhecer o valor do caudal mássico (\dot{m}_{gn}), do poder calorífico inferior (PCI), da capacidade calorífica (Cp_{gn}), da temperatura do gás natural (T_{gn}) e da temperatura de referência (T_r). Assim, Q_{gn} foi determinado pela equação seguinte:

$$Q_{gn} = \dot{m}_{gn} \times [PCI + (Cp_{gn} \times (T_{gn} - T_r))] \quad (7)$$

Quanto ao caudal térmico da energia eléctrica (Q_e ; [9]), foi calculado pela seguinte expressão utilizando a potência eléctrica (P_e):

$$Q_e = P_e \times 3600 \quad (8)$$

A potência eléctrica (P_e ; [10]) foi calculada através da equação (9), usando os valores da intensidade da corrente (i_{abs}), o factor potência ($\cos \phi$) e a voltagem ($Volt$):

$$P_e = i_{abs} \times \cos \phi \times \sqrt{3} \times Volt. \quad (9)$$

O caudal térmico associado ao ar de queima, calculou-se através da equação 10 [9], com os valores do caudal mássico (\dot{m}_{arq}), da capacidade calorífica (Cp_{arq}), da temperatura (T_{arq}), da humidade do ar de queima (w_{arq}) 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:

$$Q_{arq} = Q_{arq(base\ sec\ a)} + Q_{vap.H_2O} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Q_{arq} = (\dot{m}_{arq(bs)} \times Cp_{arq} \times (T_{arq} - T_r)) + (\dot{m}_{vap.H_2O} \times Cp_{vap.H_2O} \times (T_{vap.H_2O} - T_r)) + (\dot{m}_{vap.H_2O} \times \lambda_{vap.H_2O})$$

Sendo:

$$w_{arq} = \frac{\dot{m}_{vap.H_2O}}{\dot{m}_{arq(bs)}}$$

$$T_{vap.H_2O} = T_{arq}$$

Após a substituição, obtém-se a expressão seguinte:

$$Q_{arq} = (\dot{m}_{arq(bs)} \times Cp_{arq} \times (T_{arq} - T_r)) + (\dot{m}_{arq(bs)} \times w_{arq} \times Cp_{vap.H_2O} \times (T_{vap.H_2O} - T_r)) + (\dot{m}_{arq(bs)} \times w_{arq} \times \lambda_{vap.H_2O}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Q_{arq} = \dot{m}_{arq(bs)} \times [Cp_{arq} \times (T_{arq} - T_r) + w_{arq} \times (Cp_{vaporH_2O} \times (T_{arq} - T_r) + \lambda_{vaporH_2O})] \quad (10)$$

O caudal térmico associado ao refractário à entrada do forno, foi determinada pela expressão 11 [9], usando os valores do caudal de refractário à entrada (\dot{m}_{refe}), da capacidade calorífica (Cp_{ref}) e da temperatura (T_{refe}).

$$Q_{refe} = \dot{m}_{refe} \times Cp_{ref} \times (T_{refe} - T_r) \quad (11)$$

Para calcular o caudal térmico associado à louça na entrada (Q_{loue} ; [9]) foi necessário conhecer esse caudal mássico à entrada (\dot{m}_{loue}), a sua capacidade calorífica (Cp_{lou}), a temperatura (T_{loue}), o caudal mássico de água (\dot{m}_{H_2O}) e a sua capacidade calorífica (Cp_{H_2O}). À entrada do forno a louça ainda contem uma pequena percentagem de água, logo esta tem que ser incluída no cálculo associado ao caudal mássico de louça:

$$Q_{loue} = (\dot{m}_{loue} \times Cp_{lou} + \dot{m}_{H_2O} \times Cp_{H_2O}) \times (T_{loue} - T_r) \quad (12)$$

No que diz respeito aos restantes caudais térmicos associados ao ar, nomeadamente o que está associado ao ar na entrada e saída forno, ao ar entre vagonas, ao ar que entra pelos frisos da cave, ao ar de tecto, ao ar de refrigeração brusca e normal, bem como ao do ar do contravec, o cálculo foi feito de igual modo ao realizado para o ar de queima (equação 10), mudando apenas os valores das variáveis presentes na equação.

o Forno 4 – Correntes de saída

Para o cálculo das perdas de calor por radiação e convecção, foi necessário determinar o coeficiente global de transferência de energia por radiação (U_r , [9]; eq - 13) e convecção (U_c , [9]; eq - 14). Para realizar os cálculos citados anteriormente foi necessário conhecer os valores da emissividade da parede (ϵ), da sua temperatura exterior média (T_{pdmed}), da temperatura ambiente (T_{amb}) e da constante característica da superfície (B_p).

$$U_r = 20,4 \times \epsilon \times \frac{\left(\frac{T_{pdmed} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{amb} + 273}{100}\right)^4}{(T_{pdmed} - T_{amb})} \quad (13)$$

$$U_c = B_p \times (T_{pdmed} - T_{amb})^{0,25} \quad (14)$$

Assim, pôde ser determinado o coeficiente global de transferência de calor da parede direita (U_{pd}) (eq.15; [9]), que foi utilizado para o cálculo do caudal térmico perdido pela parede direita (\dot{Q}_{pd}), numa determinada área (A_{pd}).

$$U_{pd} = U_r + U_c \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{pd} = U_{pd} \cdot A_{pd} \cdot (T_{pdmed} - T_{amb}) \quad (16)$$

Foram depois somadas todas as parcelas das perdas de calor, do restante comprimento do forno. Os resultados calculados referentes às perdas de calor neste forno encontram-se nas tabelas A.11 e A.12 do anexo A.

É de notar que as expressões acima encontram-se referidas para a parede direita do forno. Para as outras paredes, o cálculo foi feito do mesmo modo, mudando apenas o valor da constante característica da superfície (B_p).

Os caudais térmicos associados aos gases de combustão, que saem pela chaminé do ar quente da etapa de arrefecimento (Q_{caqa}), aos que saem pela chaminé sem ventilador e os da tiragem aspiradora foram calculados pela equação 10, mudando apenas os valores das variáveis presentes na mesma.

Para calcular o caudal térmico associado aos gases de combustão da chaminé sem ventilador (Q_{csv}) foi necessário conhecer o caudal mássico desses gases (\dot{m}_{csv}), no entanto como não existe um medidor que registe esse valor, o cálculo foi efectuado fazendo um balanço mássico ao ar e aos gases de combustão que entram e saem do forno:

$$\dot{m}_{csv} = (\dot{m}_{arq} + \dot{m}_{art} + \dot{m}_{arb} + \dot{m}_{arn} + \dot{m}_{arc} + \dot{m}_{aef} + \dot{m}_{asf} + \dot{m}_{afc} + \dot{m}_{aev}) - (\dot{m}_{cta} + \dot{m}_{caqa}) \quad (17)$$

O caudal térmico associado ao refractário à saída (Q_{refS}), foi determinado da mesma forma que na entrada (equação 11), mudando apenas a temperatura do mesmo.

O caudal térmico associado à louça na saída (Q_{lous} ; [9]) foi calculado pela equação 18, sendo \dot{m}_{lous} o caudal mássico de louça à saída, Cp_{lou} a sua capacidade calorífica e T_{lous} a sua temperatura.

$$Q_{lous} = \dot{m}_{lous} \times Cp_{lou} \times (T_{lous} - T_r) \quad (18)$$

o Forno 3i – Corrente de entrada

Neste caso, os caudais térmicos a registar, durante o aquecimento, na entrada do forno são o da combustão (Q_{gn}), da energia eléctrica (Q_e) e o associado ao ar de queima (Q_{arq}). Durante o arrefecimento, considerou-se o caudal térmico do ar de arrefecimento e o da energia eléctrica.

o Forno 3i – Correntes de saída

Neste caso os caudais térmicos considerados na saída do balanço de energia, durante o aquecimento, foram provocados pelas perdas de calor nas superfícies do forno ($Q_{per.aquec}$), pelo caudal associado aos gases de combustão (Q_{gc}), ao refractário ($Q_{ref.aquec}$) e à louça. No processo de arrefecimento, são de assinalar o calor perdido pelas superfícies do forno ($Q_{per.arref}$) e o caudal térmico associado aos gases de arrefecimento ($Q_{gasesarref}$).

O balanço energético ao forno 3i foi feito de uma forma um pouco diferente, uma vez que, neste caso não foram determinados os valores dos caudais térmicos que entram e saem do forno. Foi calculado o caudal térmico total transferido durante as 16 horas e 50 minutos do ciclo deste forno. Assim, foram determinadas as várias parcelas do caudal térmico transferido nos diferentes intervalos de tempo dos patamares de cozedura. Para efectuar este cálculo, foram feitas leituras na curva de cozedura, de modo a saber a temperatura inicial e final de cada segmento. O cálculo foi ainda dividido em aquecimento e arrefecimento.

Relativamente ao cálculo do caudal térmico associado ao refractário e à louça, foi utilizada a diferença entre as temperaturas inicial e final do respectivo patamar. Isto para se ter conhecimento da variação do caudal térmico associado ao refractário e louça em cada patamar da cozedura e não de um valor absoluto calculado apenas com a temperatura média do patamar.

No que diz respeito ao cálculo das perdas de calor por radiação e convecção, este foi feito de modo semelhante ao efectuado no caso do forno 4. Calculou-se o calor perdido (Q_{pd} ; eq 19) nos diferentes segmentos do ciclo, que correspondem a um tempo de cozedura (t_{ciclo}), em vez de determinar o fluxo de calor perdido durante a cozedura (\dot{Q}_{tpd}) (tabelas A.13 a A.18 do anexo A).

$$Q_{pd} = \dot{Q}_{tpd} \times t_{ciclo} \quad (19)$$

Foram depois adicionadas todas as fracções do calor perdido, para todas as temperaturas interiores do forno (tabela A.19 do anexo A). Com os valores das perdas de calor totais para todas as superfícies, foi feita uma representação da variação das perdas de calor com a temperatura interna do forno e traçada a linha de tendência da mesma. Determinou-se assim a perda total de calor, para as várias temperaturas internas do forno, dos patamares de tempo estabelecidos.

Quanto ao caudal térmico associado aos gases de combustão (Q_{gc}), este foi calculado com um valor de capacidade calorífica variável, conforme a temperatura interna do forno nos vários patamares de tempo e a respectiva composição dos gases de combustão. Esta

composição foi conseguida através da tabela A.9 no anexo A, com o valor de excesso de ar para cada intervalo de tempo.

Para determinar Q_{gc} , foi necessário conhecer o valor do caudal mássico de gases de combustão (\dot{m}_{gc}). Este foi calculado através da soma dos caudais do ar de queima (\dot{m}_{arq}) e do combustível (\dot{m}_{comb}).

Para calcular o caudal térmico associado ao ar de arrefecimento ($Q_{ararref}$), foi preciso determinar inicialmente o caudal de ar de arrefecimento ($\dot{m}_{ararref}$). Para tal foi calculado o caudal térmico que era necessário retirar ao refractário e à louça durante a cozedura nesta fase ($Q_{ret.arref}$), pela expressão (20), sendo \dot{m}_{refact} o caudal de refractário actual, \dot{m}_{lous} o de louça cozida, Cp_{ref} a capacidade calorífica do refractário e Cp_{lou} a da louça e as temperaturas iniciais (T_i) e finais (T_f) do patamar de cozedura.

$$Q_{ret.arref} = Q_{ret.ref} + Q_{ret.lou} = (\dot{m}_{refact} \times Cp_{ref} \times (T_i - T_f)) + (\dot{m}_{lous} \times Cp_{lou} \times (T_i - T_f)) \quad (20)$$

Este valor é então utilizado para determinar o caudal mássico de ar de arrefecimento ($\dot{m}_{ararref}$), do seguinte modo, utilizando a capacidade calorífica do ar (Cp_{aa}) e a temperatura de entrada do ar (T_{entar}):

$$\dot{m}_{ararref} = \frac{Q_{ret.arref}}{Cp_{aa} \times (T_i - T_{entar})} \quad (21)$$

3.8 - Poupanças resultantes da substituição do material refractário

Para avaliar a viabilidade económica da substituição parcial de mobília refractária nos fornos, foi feita uma análise económica, com o objectivo de determinar o período necessário para recuperar o investimento efectuado.

3.8.1 - Ganhos energéticos

Ao proceder à substituição parcial do refractário, há uma redução do caudal térmico consumido durante a cozedura (Red_{ctc}).

Para o forno contínuo 4, a redução foi calculada através da diferença entre os valores dos caudais térmicos associados ao refractário, antes ($Q_{ref.act}$) e após a substituição efectuada no mesmo ($Q_{ref.alt}$), $T_{max.ref}$ é a temperatura máxima que o refractário atinge durante a cozedura, $\dot{m}_{ref.alt}$ é o caudal mássico de refractário à entrada; $Cp_{ref.alt}$ a capacidade calorífica do refractário, ambos após a substituição do mesmo.

$$Red_{ctc} = (\dot{m}_{refe} \times Cp_{ref} \times (T_{max.ref} - T_r)) - (\dot{m}_{ref.alt} \times Cp_{ref.alt} \times (T_{max.ref} - T_r)) \quad (22)$$

Para o forno 3i, o cálculo da redução do caudal térmico consumido foi feito de modo semelhante, com a única diferença que neste caso se utiliza a diferença entre as temperaturas de entrada e saída de cada patamar, isto no arrefecimento e aquecimento. A redução de consumo de energia durante o aquecimento foi utilizada para calcular a poupança relativa ao gás natural, pois este recurso só é utilizado nesta fase, já a redução durante o arrefecimento serviu para determinar a poupança em energia eléctrica.

A redução no consumo de energia vai proporcionar uma diminuição do tempo do ciclo de cozedura ($t_{novociclo}$). Este foi calculado entrando em consideração com a redução do tempo no aquecimento e no arrefecimento. O valor da redução no tempo de aquecimento ($Redtempo_{aquec}$) foi determinado pelas seguintes expressões:

$$C.tér_{aquec.act.} = \frac{Q_{ref.aquec.} + Q_{lou.aquec.} + Q_{per.aquec.}}{t_{aquec.act.}} \quad (23)$$

$$t_{aquec.alt.} = \frac{Q_{ref.aquec.alt.} + Q_{lou.aquec.} + Q_{per.aquec.}}{C.tér_{aquec.act.}} \quad (24)$$

$$Red.tempo_{aquec.} = t_{aquec.act.} - t_{aquec.alt.} \quad (25)$$

Relativamente à redução de tempo, na fase de arrefecimento esta calculou-se de modo semelhante. Neste caso, para determinar o caudal térmico actual no arrefecimento ($C.tér_{arref.act.}$) e o tempo de arrefecimento após a alteração de refractário ($t_{arref.alt.}$), as perdas de calor ($Q_{per.arref.}$) subtraem-se aos caudais térmicos do refractário ($Q_{ref.arref.}$) e da louça ($Q_{lou.arref.}$). O calor perdido ajuda no processo de arrefecimento, o que não acontece durante o aquecimento, razão pela qual as perdas de calor têm que ser compensadas com uma maior duração do aquecimento do forno.

O passo seguinte foi calcular o novo número de ciclos que podem ser efectuados ($n^{\circ}ciclos_{alt.ref.}$), com esta redução de tempo ($t_{novociclo}$):

$$n^{\circ}ciclos_{alt.ref.} = \frac{n^{\circ} dias_{funcionamento} / mês \times n^{\circ} horas_{funcionamento} / dia}{t_{novociclo}} \quad (26)$$

É de notar que o cálculo da redução do tempo de duração do ciclo apenas foi realizado para o forno 3i, uma vez que este é limitado pela capacidade de arrefecimento, devido à grande quantidade de massa a arrefecer. Interessava então observar a diminuição do tempo de cozedura proporcionada pela substituição do refractário.

Depois de ter sido calculada a redução do caudal térmico consumido durante o aquecimento (Red_{ctcaq}) e de determinar o aumento do número de ciclos de cozedura, havia que contabilizar o volume de gás natural (V_{gecon} , eq. 27) (na etapa de aquecimento em ambos os fornos) e de energia eléctrica (no arrefecimento do forno 3i) que se economiza durante a cozedura.

$$V_{gecon.} = \frac{Red_{ctcaq}}{PCI} \quad (27)$$

A energia eléctrica poupada no arrefecimento do forno 3i, é dada pelo valor da redução do consumo da mesma nesta fase da cozedura (Red_{ctcar}).

Os valores da redução do caudal térmico consumido, no arrefecimento e aquecimento da cozedura, foram calculados através da diferença entre os caudais térmicos associados ao refractário antes e após as alterações no mesmo. É de notar que estes podem variar conforme o caudal mássico de refractário após a substituição.

3.8.2 - Ganhos técnicos

Com a utilização de refractário de SiC, prevê-se uma redução de peças com defeito, em resultado de um suporte mais eficiente das mesmas durante a cozedura. Considerando que i) 1,2% das peças que são cozidas, ficam com defeito de enforna e/ou deformação ($\%def_{lou.coz}$), e que ii) o valor comercial médio por peça ($Valor_{com.peças}$) é de aproximadamente 28,00 €, conclui-se que a substituição do material refractário proporciona um acréscimo de 15% ao número de peças que podem ser vendidas ($Aumento_{peçasaprov.}$) devido à diminuição do número de peças com defeitos após a cozedura.

No final, foram somadas as parcelas da poupança resultante da troca de refractário, provenientes da redução de consumo de energia eléctrica (arrefecimento do forno 3i), do gás natural (aquecimento dos dois fornos) e ainda da diminuição do número de peças com defeito após a cozedura (para os dois fornos).

3.9 – Avaliação Económica

- Investimento em refractário

O valor total investido em refractário, foi determinado pela quantidade de placas a encomendar, estipulada de modo a suprir as necessidades de material refractário para o forno 3i e 4. É de notar que a substituição de refractário é apenas parcial.

- Tempo de retorno do investimento

O tempo de retorno do investimento feito em material refractário, é dado por:

$$t_{\text{retorno inv.}} = \frac{\text{Investimento}_{\text{ref.}}}{\text{Poupança}_{\text{total}}} \quad (28)$$

- Valor actual líquido

O valor actual líquido (VAL; [11]) é um critério de avaliação do projecto, que resulta do somatório dos *fluxos de caixa* (FC) anuais actualizados (para o ano zero) a uma determinada taxa (i) e é dado pela expressão seguinte:

$$VAL = \sum_{k=M}^{Nt} \frac{(FC)_k}{(1+i)^k} \quad (29)$$

- Taxa interna de rentabilidade

A taxa interna de rentabilidade (TIR; [11]) é a taxa à qual se anula o valor dos somatórios dos *fluxos de caixa* actualizados para o ano zero, isto é, quando o VAL é igual a zero.

$$\sum_{k=M}^{Nt} \frac{(FC)_k}{(1+TIR)^k} = 0 \quad (30)$$

4 - Resultados e Discussão

4.1 – Resultados técnicos

4.1.1 - Perdas de calor no forno 3i

Neste forno, como já foi referido, foi estudada a evolução da quantidade de calor perdido no decorrer do aquecimento do forno (figura 25a). Somando as várias parcelas das quantidades de calor perdido pelas faces do forno, para as diferentes temperaturas, obteve-se o valor total do calor perdido por cada superfície, durante o aquecimento (Figura 25b).

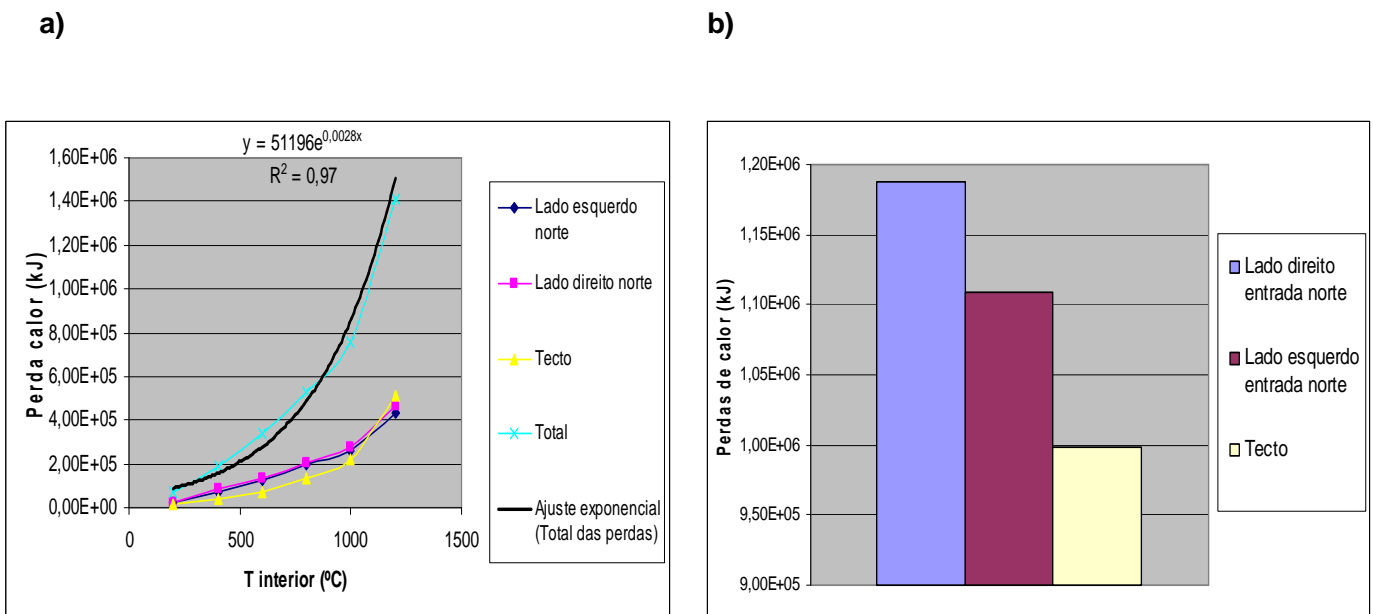


Figura 25 – a) Perdas de calor pelas superfícies, do forno 3i; **b)** total das perdas de calor pelas superfícies do forno 3i.

Através da observação da figura 25a, pode-se verificar que como era de esperar há um incremento do calor perdido com o aumento da temperatura do interior do forno. Consta-se também que as paredes do lado direito e esquerdo, em relação à entrada norte do forno, têm uma quantidade de calor perdido semelhante, sendo ligeiramente superior no caso da parede do lado direito. No caso do tecto, o calor perdido é sempre inferior ao das restantes superfícies, exceptuando-se a temperatura de 1200°C.

Nota: A linha de tendência existente na figura anterior serviu para fazer uma extrapolação da quantidade de calor perdido para as diferentes temperaturas do interior do forno 3i.

Com a figura 25b pode-se observar que não existem diferenças significativas entre as quantidades de calor perdido pelas superfícies do forno, uma vez que estas são de $1,19 \times 10^6$ kJ para a parede direita, de $1,11 \times 10^6$ kJ para a parede esquerda e de $9,98 \times 10^5$ kJ para o tecto.

4.1.2 – Caudal térmico perdido pelas paredes no forno 4

No estudo realizado em relação ao caudal térmico perdido pelas paredes do forno 4, após serem calculados os caudais perdidos por todas as faces, representou-se a evolução dos mesmos ao longo do comprimento do forno (Figura 26a) e os valores médios das perdas por face (Figura 26b).

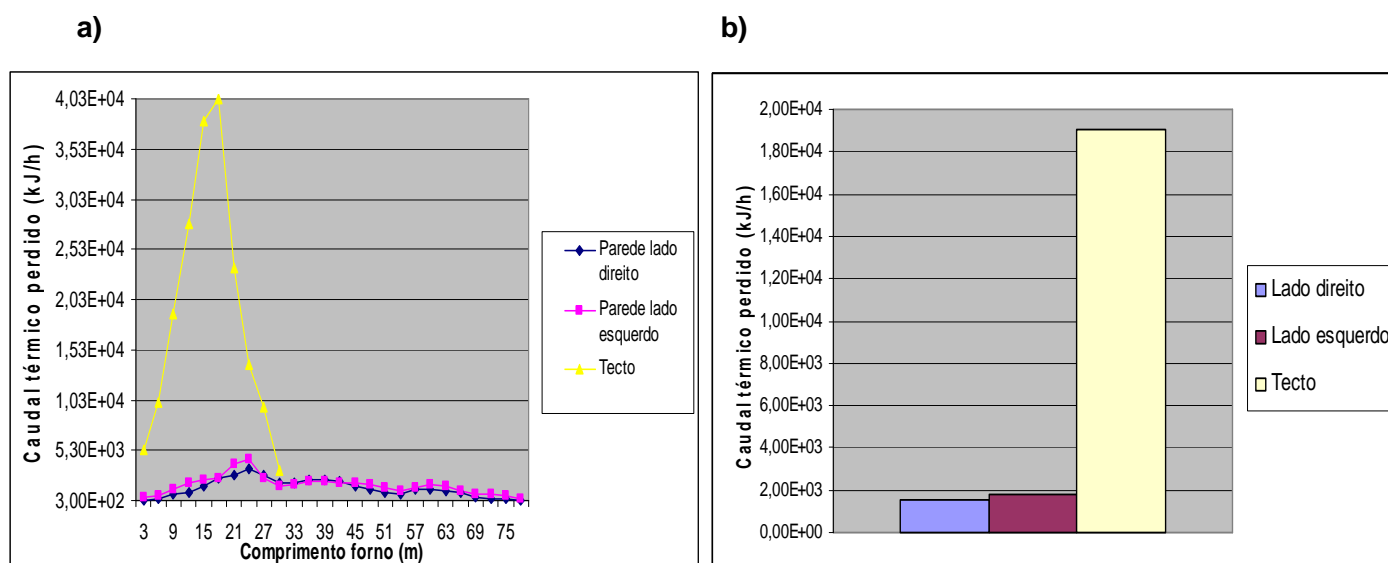


Figura 26 – a) Caudal térmico perdido pelas faces do forno 4 em função do seu comprimento; **b)** caudal térmico médio que é perdido nas três faces do forno 4.

Constata-se, através da figura 26a, que a parede do tecto é a que apresenta um maior caudal térmico perdido, sendo este largamente superior ao das restantes faces do forno.

Quanto à parede do lado esquerdo e à do direito, estas têm um comportamento muito semelhante, embora a parede do lado esquerdo tenha na maioria dos comprimentos do forno um caudal térmico ligeiramente superior ao que flui pela parede direita. O valor do caudal térmico máximo é transferido pelo tecto, sendo este de cerca de $4,03 \times 10^4$ kJ/h, e o mínimo é de aproximadamente $3,30 \times 10^2$ kJ/h e é perdido pela parede direita do forno.

Na figura 26 b) pode-se observar que a superfície por onde é perdido o maior caudal térmico é a do tecto, cerca de $1,9 \times 10^4$ kJ/h, seguindo-se a parede esquerda, aproximadamente $1,8 \times 10^3$ kJ/h, e por fim a do lado direito, com um caudal térmico de cerca de $1,5 \times 10^3$ kJ/h.

4.1.2 - Balanço energético ao forno 3i

Neste balanço energético foram calculados todos os caudais térmicos envolvidos no forno 3i, que constam no esquema que se encontra na figura 21. Inicialmente determinaram-se, como já foi referido, todos os caudais térmicos à entrada e saída para cada patamar de cozedura para o aquecimento (tabela 15) e arrefecimento (tabela 16). Os valores dos caudais térmicos respeitantes a cada patamar foram no final somados, estes são os valores que constam posteriormente na tabela 17.

Tabela 15 – Valores calculados das entradas e saídas do balanço energético ao forno 3i, para cada intervalo de tempo da fase de aquecimento da cozedura.

t acum. (h)	W _{gc} (kg H ₂ O/kg gases secos)	ṁ _{gc} (kg/ciclo)	Entrada (kJ/ciclo)			Saída (kJ/ciclo)			
			Q _{gn}	Q _e	Q _{arq}	Q _{ref..act.}	Q _{lou..aquec.}	Q _{gc}	Q _{per..aquec.}
0,00		0,00							
0,75	0,030	12204	5,28x10 ⁶	6,10x10 ⁴	5,44x10 ⁵	9,11x10 ⁴	6,17x10 ⁵	2,54x10 ⁶	5,45x10 ⁴
1,75	0,040	8211	7,04x10 ⁶	8,13x10 ⁴	3,63x10 ⁵	1,82x10 ⁵	1,23x10 ⁶	2,62x10 ⁶	8,96x10 ⁴
3,75	0,060	10664	1,41x10 ⁷	1,63x10 ⁵	4,70x10 ⁵	4,56x10 ⁵	3,09x10 ⁶	6,23x10 ⁶	2,93x10 ⁵
6,50	0,080	10546	1,93x10 ⁷	2,23x10 ⁵	4,63x10 ⁵	2,73x10 ⁵	1,85x10 ⁶	9,53x10 ⁶	7,04x10 ⁵
6,83	0,11	971	2,35x10 ⁶	2,71x10 ⁴	4,22x10 ⁴	9,11x10 ⁴	6,17x10 ⁵	1,12x10 ⁶	1,13x10 ⁵
7,58	0,11	2099	5,28x10 ⁶	6,10x10 ⁴	9,15x10 ⁴	3,64x10 ⁵	2,47x10 ⁶	2,79x10 ⁶	3,61x10 ⁵
8,42	0,11	2332	5,86x10 ⁶	6,77x10 ⁴	1,02x10 ⁵	3,64x10 ⁵	2,47x10 ⁶	3,76x10 ⁶	7,02x10 ⁵
8,82	0,11	1119	2,81x10 ⁶	3,25x10 ⁴	4,94x10 ⁴	1,37x10 ⁵	9,26x10 ⁵	2,03x10 ⁶	4,95x10 ⁵
9,07	0,11	728	1,76x10 ⁶	2,03x10 ⁴	3,23x10 ⁴	0	0	1,36x10 ⁶	3,44x10 ⁵
		Total	6,38x10⁷	7,37x10⁵	2,16x10⁶	1,96x10⁶	1,33x10⁷	3,20x10⁷	3,15x10⁶

Tabela 16 – Valores calculados das entradas e saídas do balanço energético ao forno 3i, para cada intervalo de tempo da fase de arrefecimento da cozedura.

t acum. (h)	Ti (K)	Tf (K)	T média (K)	Qretirar arrefecimento (kJ/ciclo)	Caudal ar arrefecimento (kg/ciclo)	Entrada (kJ/ciclo)		Saída (kJ/ciclo)	
						Qe.	Qar arref.	Qgases Arref.	Qper.,arref.
9,90	1448	1173	1311	3,62x10 ⁶	3182	5,03x10 ⁴	1,43x10 ⁵	3,47x10 ⁶	7,79x10 ⁵
11,23	1173	923	1048	3,29x10 ⁶	3801	8,05x10 ⁴	1,71x10 ⁵	3,11x10 ⁶	5,98x10 ⁵
14,07	923	723	823	2,63x10 ⁶	4258	1,71x10 ⁵	1,91x10 ⁵	2,50x10 ⁶	6,77x10 ⁵
15,15	723	573	648	1,98x10 ⁶	4696	6,54x10 ⁴	2,11x10 ⁵	1,91x10 ⁶	1,58x10 ⁵
16,25	573	423	498	1,98x10 ⁶	7257	6,64x10 ⁴	3,26x10 ⁵	1,83x10 ⁶	1,06x10 ⁵
16,92	423	353	388	9,22x10 ⁵	7451	4,02x10 ⁴	3,35x10 ⁵	1,03x10 ⁶	4,71x10 ⁴
Total						4,74x10⁵	1,38x10⁶	1,38x10⁷	2,37x10⁶

Tabela 17 – Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético ao forno 3i.

	Nº	Caudal térmico - Entrada		Nº	Caudal térmico - Saída	
	corrente	(kJ/ciclo)		corrente	(kJ/ciclo)	
Aquecimento	5	Combustão	6,38x10 ⁷	9	Perdido pelas superfícies quentes	3,15x10 ⁶
	8	Energia eléctrica	7,37x10 ⁵	7	Gases de combustão	3,20x10 ⁷
	6	Ar queima	2,16x10 ⁶	2	Refractário	1,96x10 ⁶
				1	Louça	1,33x10 ⁷
	TOTAL Entrada Aquec.		6,67x10⁷	TOTAL Saída Aquec.		5,04x10⁷
Arrefecimento	Nº	Caudal térmico - Entrada		Nº	Caudal térmico - Saída	
	corrente	(kJ/ciclo)		corrente	(kJ/ciclo)	
	10	Ar de arrefecimento	1,38x10 ⁶	9	Perdido pelas superfícies quentes	2,37x10 ⁶
	8	Energia eléctrica	4,74x10 ⁵	7	Gases de combustão	1,38x10 ⁷
TOTAL Entrada Arref.		1,85x10⁶	TOTAL Saída Arref.		1,62x10⁷	
TOTAL Entradas Ciclo		6,85x10⁷	TOTAL Saídas Ciclo		6,66x10⁷	

Através da observação da tabela anterior, verifica-se que quanto às correntes de entrada o maior caudal diz respeito à combustão do gás natural, e o de menor pertence ao caudal térmico associado à energia eléctrica.

No caso das correntes de saída, o maior caudal térmico apresentado é o resultante dos gases de combustão, e o menor corresponde ao caudal térmico associado ao refractário.

A diferença entre o somatório do caudal térmico das correntes entradas e o das de saída é de aproximadamente 3%.

4.1.3 - Balanço energético ao forno 4

Neste balanço energético foram calculados todos os caudais térmicos envolvidos no forno 4, que constam no esquema que se encontra na figura 22. Todos os valores calculados para as correntes de entrada e saída encontram-se na tabela 18.

Tabela 18 – Quadro com as entradas e saídas referentes ao balanço energético realizado ao forno 4.

Nº corrente	Caudal térmico - Entrada (kJ/h)		Nº corrente	Caudal térmico - Saída (kJ/h)	
12	Combustão	$3,60 \times 10^6$	13	Perdido pelas superfícies quentes	$2,24 \times 10^4$
14	Energia eléctrica	$2,32 \times 10^5$	6	Gases de combustão- chaminé do ar quente da etapa de arrefecimento	$1,06 \times 10^6$
5	Ar queima	$6,14 \times 10^4$	7	Gases de combustão- chaminé sem ventilador	$1,11 \times 10^6$
3	Refractário	$2,82 \times 10^4$	15	Gases de combustão - tiragem aspiradora	$2,30 \times 10^6$
1	Louça	$3,31 \times 10^4$	4	Refractário	$4,74 \times 10^4$
9	Ar a entrar na entrada forno	$3,26 \times 10^5$	2	Louça	$4,08 \times 10^4$
8	Ar a entrar na saída forno	$8,75 \times 10^4$			
10	Ar entre vagonas	$1,39 \times 10^4$			
11	Ar frisos cave	$5,90 \times 10^4$			
16	Ar tecto	$1,77 \times 10^4$			
17	Ar refrigeração brusca	$6,20 \times 10^4$			
18	Ar refrigeração normal	$5,93 \times 10^4$			
19	Ar contravec	$1,81 \times 10^5$			
	TOTAL Entrada	$4,76 \times 10^6$		TOTAL Saída	$4,58 \times 10^6$

Através da observação desta tabela, verifica-se que quanto às correntes de entrada o maior caudal corresponde ao da combustão do gás natural, e que o menor diz respeito caudal térmico associado ao ar entre vagonas.

No caso das correntes de saída, o maior caudal térmico apresentado é o resultante dos gases de combustão que saem pela chaminé da tiragem aspiradora, e o menor corresponde ao caudal térmico perdido pelas paredes para o exterior.

No que diz respeito ao caudal térmico associado ao refractário, este é superior na saída pois, apesar do caudal ser mantido constante, à saída da cozedura a temperatura do mesmo é mais elevada do que à entrada.

A diferença entre o somatório do caudal térmico das correntes de entrada e o das de saída é de aproximadamente 4%.

4.2– Resultados económicos

4.2.1 - Redução da massa de refractário

Quanto ao estudo da substituição parcial da mobília refractária que é utilizada nas vagonas, a cordierite, por uma constituída por um material mais leve, o carboneto de silício, foi determinada a influência que esta mudança originaria na massa total de material refractário. Esta troca foi feita apenas nas placas de mobília refractária das peças, uma vez que o restante material ou já era de carboneto de silício, ou a troca não era viável por motivos de resistência estrutural. Para isso, foi calculada a massa que as placas de carboneto de silício teriam com as mesmas dimensões das placas anteriormente utilizadas de cordierite. Os valores da massa de material refractário e de louça, na cozedura nos dois fornos, encontram-se registados nas tabelas 19 e 20, bem como a massa da mobília refractária depois desta alteração.

Como já foi referido, no forno 3i, foram feitos dois inventários, a cada um dos lados do forno, por isso no final foram calculadas as massas médias, que estão indicadas na tabela 19.

Tabela 19 – Valores das massas de mobília refractária, de louça crua e cozida e do material refractário que constitui as vagonas, que entram e saem do forno 3i durante um ciclo.

	Massa	Sem alteração de refractário (kg)	Com alteração de refractário (kg)
Entrada	Mobília refractária	1127	540
	Louça crua	6419	6419
	Vagonas	3639	3639
	Total	11185	10597
Saída	Mobília refractária	1127	540
	Louça cozida	5974	5974
	Vagonas	3639	3639
	Total	10740	10153

Tabela 20 – Valores das massa de mobília refractária, de louça crua e cozida e do refractário que compõe as vagonas, que entram e saem do forno 4 durante um período de 24h.

	Massa	Sem alteração de refractário (kg)	Com alteração de refractário (kg)
Entrada	Mobília refractária	9103	5812
	Louça crua	16718	16718
	Vagonas	20044	20044
	Total	45865	42573
Saída	Mobília refractária	9103	5812
	Louça cozida	15624	15624
	Vagonas	20044	20044
	Total	44771	41480

Com esta alteração no material refractário consegue-se, como seria de esperar, uma apreciável redução na massa de refractário utilizado na cozedura. Esta mudança proporciona uma redução de massa de 52% e 36% para os fornos 3i e 4, respectivamente. É de notar que no forno 3i há uma maior redução de massa de refractário em relação ao forno 4, uma vez que neste há um maior número de placas de cordierite que serão substituídas pelas de carboneto de silício. A redução de massa de refractário no forno intermitente 3i proporciona uma redução do tempo de duração do ciclo de 1,21 h, o que possibilita um aumento do número de ciclos executados por mês. Com esta substituição, podem ser realizados mais três ciclos durante o mês, passando a 46 ciclos por mês em vez dos 43 feitos actualmente.

4.2.2 - Redução do caudal térmico consumido

A redução da massa de mobília refractária referida anteriormente, faz com que haja também uma diminuição do caudal térmico consumido pelos fornos, e conseqüentemente da energia de queima e do consumo específico do forno.

Com os valores do volume de gás consumido nos fornos foram calculadas as energias de queima e os valores do consumo específico dos fornos 3i e 4. Estes valores, para a cozedura actual e para a cozedura após a substituição do material refractário dos dois fornos, encontram-se na tabela 21.

Tabela 21 – Valores da energia de queima, do consumo específico do forno e da redução do mesmo, após a alteração no refractário para os fornos 3i e 4.

	Forno 3i	Forno 4
Energia de queima (MJ)	61432	103140
Consumo específico (kJ/kg)	9571	6169
Energia de queima, após a alteração no refractário (MJ)	60353	85159
Consumo específico do forno, após a alteração no refractário (kJ/kg)	9403	5094
% Redução do consumo específico (kJ/kg)	2%	17%

Nesta tabela pode ver-se que o forno 4 tem uma maior energia de queima, mas um consumo específico menor, uma vez que neste é consumido um maior volume de gás e é cozida uma maior quantidade de louça, do que no forno 3i. Após a substituição parcial do material refractário e com a conseqüente redução do consumo de gás natural, há também uma diminuição da energia de queima e do consumo específico dos fornos. O forno 4 continua a ter uma maior energia de queima e um menor consumo específico, mas a diferença entre os valores da energia de queima é menor enquanto que a dos consumos específicos dos dois fornos é maior. No forno 4, há uma maior diminuição da energia de queima e do consumo específico, uma vez que este tem também uma maior redução no consumo de gás natural. A diferença entre a redução do consumo específico dos dois fornos deve-se ao diferente regime de trabalho (contínuo / descontinuo) e à maior massa do forno 3i.

A redução de massa de refractário registada nas tabelas 19 e 20, proporciona uma redução no caudal térmico consumido associado ao mesmo, estes valores encontram-se na tabela 22. Nesta constam também os valores do caudal térmico consumido actualmente e o que passará a ser consumido, depois da alteração na constituição do material refractário.

Tabela 22 – Valores da redução do caudal térmico consumido, para o forno 3i e 4.

	Forno 3i		Forno 4
	Aquecimento	Arrefecimento	Aquecimento
Caudal térmico consumido antes da alteração do refractário (kJ/h)	2,16x10 ⁵	2,54x10 ⁵	1,35x10 ⁶
Caudal térmico consumido após alteração refractário (kJ/h)	9,71x10 ⁴	1,14x10 ⁵	6,03x10 ⁵
Redução do caudal térmico consumido (kJ/h)	1,19x10 ⁵	1,40x10 ⁵	7,49x10 ⁵
Total da redução do caudal térmico consumido (kJ/h)	2,59x10⁵		7,49x10⁵

No que diz respeito ao aquecimento, o forno que tem um maior consumo nesta fase é o forno 4. Esta situação mantém-se após a alteração no refractário e a redução do caudal térmico consumido é também superior no caso do forno 4.

Os valores que constam na tabela anterior perfazem uma poupança de 1,01x10⁶ kJ/h.

4.2.3 – Poupanças resultantes

A substituição de material proporciona uma poupança de gás natural na etapa de aquecimento de ambos os fornos de 8,68x10⁵kJ/h (o equivalente a 22,8 m³/h) e de potência eléctrica na etapa de arrefecimento do forno 3i de 1,40x10⁵ kJ/h, como se pode ver na tabela 22. A economia que se encontra descrita na tabela 23 foi calculada para um preço de gás natural de 0,29€/Nm³ e de energia eléctrica de 0,07€/kW.h.

A alteração da constituição do material refractário permite também uma poupança em relação à produção de artigos com defeito. Esta foi calculada para um preço médio das peças de 28€.

Tabela 23 – Valores das poupanças resultantes da substituição parcial do material refractário nos dois fornos.

	Poupança (€/ano)		
	Gás natural	Energia eléctrica	Produção de defeituosos
Forno 3i	4149	10766	7484
Forno 4	45290	-----	21622
Sub total	49438	10766	29106
Total		89310	

Em relação às poupanças de gás natural, o forno que tem a maior economia é o forno 4, porque é o que apresenta uma maior redução do caudal térmico consumido durante a fase de cozedura durante a qual é consumido o gás natural.

Quanto às economias resultantes da diminuição da produção de peças com defeitos, a maior poupança diz respeito ao forno 4, uma vez que neste são cozidas um maior número de peças por ano do que no outro forno.

A parte mais representativa destas poupanças é a resultante da economia de gás natural, representando cerca de 55%, seguindo-se a da produção de defeituosos, aproximadamente 33% e por fim, a poupança em energia eléctrica que representa 12%.

4.2.4 – Avaliação económica

No sentido de obter um orçamento do material necessário, foi elaborada uma lista das placas com as medidas, desenho e quantidades a encomendar. A lista em questão encontra-se descrita no anexo A, na tabela A.20. Depois de ter sido feita a prospecção do mercado, determinou-se o valor do investimento que é necessário fazer em material refractário, este será pago imediatamente (ano zero). Foi realizado um mapa do investimento, no qual constam os benefícios económicos alcançados com a alteração do refractário, os valores dos fluxos de caixa líquidos, os fluxos de caixa líquidos actualizados e o somatório dos mesmos. Este mapa, encontra-se na tabela 24 e foi utilizado para determinar dois critérios de avaliação do projecto, o TIR e o VAL.

Tabela 24 – Mapa com os dados do investimento, do benefício, do fluxo de caixa líquido e do fluxo de caixa líquido actualizado.

Anos	0	1	2	3
Investimento (€)	101832	-	-	-
Benefício (€)	0	89310	89310	89310
Fluxo de caixa líquido (€)	-101832	89310	89310	89310
Fluxo de caixa líquido actualizado a uma taxa de 6% (€)	-101832	84225	79486	74987
Somatório do fluxo de caixa líquido actualizado (€)	-101832	-17577	61909	136895

Adicionando todos os valores dos fluxos de caixa líquidos actualizados, apresentados na tabela anterior, calculou-se o valor actual líquido (VAL), tendo-se obtido um valor de 136895€. Observa-se que o projecto é economicamente viável pois o investimento é recuperado, o capital é remunerado e ainda é gerado um excedente. A taxa interna de rentabilidade (TIR) é de 70%. Uma vez que este valor é superior ao da taxa de actualização dos capitais (6%), consegue-se gerar uma taxa de rentabilidade superior ao custo de oportunidade do capital, indicando que o projecto que é viável em termos económicos.

Relativamente ao tempo de retorno do investimento resultante deste investimento, este é de 1,14 anos.

5 - Conclusões:

O trabalho desenvolvido consistiu na optimização energética associada à melhor selecção e uso de materiais refractários que servem de apoio à cozedura de peças de cerâmica.

A execução deste trabalho foi suportada pelo estudo operacional dos diferentes tipos de fornos cerâmicos industriais da *Fábrica Cerâmica de Valadares S.A.* e orientada para uma forte componente de aplicação concreta dos resultados obtidos. Para tal, 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 a prospecção de mercado, para elaboração do estudo económico da implementação das medidas sugeridas, nomeadamente, a substituição parcial do material refractário utilizado na cozedura, maioritariamente constituído por cordierite por elementos em carboneto de silício. Selecionou-se este material uma vez que é adequado à utilização como mobília refractária e possui uma menor inércia térmica, maior resistência à oxidação a alta temperatura e à flexão e empeno, que o material refractário utilizado actualmente (cordierite).

Ao elaborar o estudo em questão foi calculado o consumo específico de cada forno, este é aproximadamente 9571 kJ/kg_{louça}, para o forno 3i, e 6169 kJ/kg_{louça}, para o forno 4. Com a alteração da constituição do material refractário estes valores vão ser reduzidos para 9403 kJ/kg_{louça} e 5094 kJ/kg_{louça}, para o forno 3i e 4 respectivamente. Este facto é devido à redução do caudal térmico consumido, resultante da diminuição de massa de refractário utilizada na cozedura.

Com esta substituição conseguiu-se uma apreciável redução da massa de mobília refractária utilizada na etapa de cozedura, de 52% para o forno 3i e 36% para o forno 4, sendo a redução média de massa de cerca de 44%.

A substituição de material proporciona conseqüentemente uma poupança de gás natural na etapa de aquecimento de ambos os fornos de $8,68 \times 10^5$ kJ/h (o equivalente a $22,8 \text{ m}^3/\text{h}$) e de potência eléctrica na etapa de arrefecimento do forno 3i de $1,40 \times 10^5$ kJ/h.

A troca de material provocou também uma redução do caudal térmico consumido de $7,49 \times 10^5$ kJ/h no forno 4 e de $2,59 \times 10^5$ kJ/h no forno 3i, resultando numa redução total de $1,01 \times 10^6$ kJ/h.

A redução do consumo de energia origina uma poupança de 49438 €/ano em gás natural, de 10766 €/ano em energia eléctrica e de 29106 €/ano na diminuição do número de peças cozidas com defeito. Resultando assim numa poupança total de 89310 €/ano.

Sendo o investimento necessário em material refractário de 101832 €, e tendo em conta a poupança anual referida anteriormente, o período de recuperação do investimento é de 1,14 anos (aproximadamente 14 meses).

Quanto aos critérios de avaliação económica do projecto, TIR e VAL, os valores obtidos foram de 70% e 136895 €, respectivamente. Como o resultado do VAL é positivo e o valor do TIR é superior à taxa de actualização dos capitais (6%), significa que o projecto é economicamente viável, pois o investimento é recuperado, o capital é remunerado e é gerado um excedente.

É de salientar que a modificação no material refractário, não traz apenas grandes benefícios económicos e energéticos, mas também possibilita um elevado ganho na qualidade do produto final.

6 - Sugestões para trabalhos futuros:

Como sugestões para trabalhos futuros nesta área são de referir os estudos energéticos que poderão ser realizados noutras secções da fábrica, como por exemplo no enchimento e na secagem, de modo a que haja uma utilização cada vez mais eficiente da energia consumida.

Refere-se ainda que o simulador criado pode ser utilizado para o estudo mais expedito de uma substituição real do material refractário. Neste pode ser inserido o tipo de material refractário que se pretende adquirir e deste modo verificar a redução de massa que advém dessa troca, bem como, a redução do caudal térmico consumido e a poupança económica resultante e o tempo de retorno do investimento.

7 - Lista de Referências:

- [1] - www.valadares.com (acedido em 19/11/2008).
- [2] - www.apicer.pt (acedido em 11/02/2008).
- [3] - Fortuna, Domenico, "Ceramic Technology Sanitaryware", Gruppo Editoriale Faenza Editrice s.p.a, 2000.
- [4] - CHRISTOS, A., THEOCHARIS, T. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. Applied Thermal Engineering, v.21, p. 1231-1249, 2001.
- [5] - Felisart, O., "Évolution des produits réfractaires pour fours ceramiques", L'Industrie Céramique & Verrière, nº953/11, Janeiro 2000.
- [6] - ARBINI, M., BROWNE, M. The newest Generation of Lightweight, low-mass kiln furniture can help pottery producers save energy, improve productivity- and increase profits. Ceramic Industry, March p 3-6, 2004.
- [7] – Manual do forno 4, Riedhammer Industrieofen (1976).
- [8] - Hougen, Watson, Ragatz, "Princípios dos processos químicos - I parte", Lopes da Silva Editora, 1984.
- [9] - 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.
- [10] – Silva, Manuel, "Introdução aos circuitos eléctricos e electrónicos", Fundação Calouste Gulbenkian, 1989.
- [11] – Gil, M. Gabriela, "Dimensionamento e optimização de equipamentos e utilidades", 2005/2006.