



Racionalização Energética em Indústria Cerâmica

ANA SOFIA FARIA MOREIRA

Novembro de 2016

Racionalização Energética em Indústria Cerâmica

Ana Sofia Faria Moreira

**Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Otimização
Energética na Indústria Química**

Porto, novembro 2016

Orientação: Professora Doutora Anabela (Departamento de Engenharia Química)
Professora Doutora Paula Neto (Departamento de Engenharia Química)

Orientação na empresa: Engenheiro José Rocha Ferreira

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação, marca o momento onde se encerra mais um capítulo na minha vida. Capítulo este que inclui uma trajetória permeada por inúmeros desafios, os quais apenas foram conseguidos com o apoio, energia e força de várias pessoas que me acompanharam ao longo de todo este percurso.

Pela oportunidade de o assinalar, gostaria de beneficiar deste espaço para expressar todo o meu apreço e gratidão a todos aqueles que contribuíram para que este momento se tornasse uma realidade.

Gostaria por isso, em primeira estância de agradecer a toda a minha família, especialmente aos meus pais e irmã, pelo apoio incondicional, pelo carinho, pela educação e sobretudo pelo facto de me inculcaram a ideia de que tudo é possível.

Ao Patrick por toda a força, as conversas, os conselhos que me deu e por toda a compreensão que teve comigo durante toda esta etapa da minha vida.

Agradeço ao Engenheiro Rocha Ferreira e ao Engenheiro Henrique Barros por toda a atenção, disponibilidade, orientação e por tornarem possível a realização deste trabalho.

Desejo ainda expressar uma especial gratidão às minhas orientadoras Doutora Paula Neto e Doutora Anabela Guedes pela paciência, pelos ensinamentos que me transmitiram e por me direcionarem sempre para os melhores caminhos, quando por circunstâncias eles se tornavam inúmeros.

Um enorme agradecimento a TODOS os colaboradores da *ARCH* Valadares que sempre cheios de disponibilidade e constante boa disposição, contribuíram para o êxito na realização de todo este trabalho. É uma família que levo para a vida...

Agradeço também aos meus amigos de faculdade, Natália, Daniela, Isolete, Raquel, Dani, Sara e Rita por terem lutado sempre comigo ao longo desta caminhada. Jamais esquecerei os momentos por nós vividos... Jamais vos esquecerei.

Não posso também deixar de homenagear os meus amigos de longa data, Miguel, Isabel, Marlene, Mariana, Rafael, Miranda, João, Pedro, Lucas, Linhos pela amizade, pelo carinho, pelos momentos que passamos, pelo companheirismo, por TUDO...

A todos vocês quero manifestar os meus sinceros agradecimentos...

Resumo

Face aos elevados custos energéticos que o setor cerâmico patenteia, torna-se como vetor primordial a gestão energética, que revela ser um fator chave para evolução e sucesso destas empresas nos mercados atualmente tão exigentes.

O presente trabalho, foi realizado na empresa *ARCH* Valadares, com o objetivo de caracterizar e avaliar o modo como a energia é gerida numa das secções, a olaria 1.

Inicialmente foi feito um levantamento energético, tendo-se verificado que a utilidade mais consumida é o gás natural com 68%, e a restante parte corresponde a energia elétrica. Da energia elétrica consumida, a maior parte, 96%, é utilizada na iluminação, na ventilação e na renovação do ar, e uma pequena parte, 4%, é utilizada no vazamento das peças, sob a forma de ar comprimido. A obtenção destes dados permitiu direcionar este estudo no sentido da racionalização do consumo de gás natural.

Desta forma, foram estudadas e sugeridas algumas medidas de otimização energética a aplicar, quer nos geradores de calor, quer na olaria. Relativamente aos geradores, pelo facto destes apresentarem perdas térmicas entre 141 kW e 316 kW, sugeriu-se a sua verificação e manutenção. Em relação à cobertura da olaria, esta apresenta-se bastante danificada e por isso foi sugerido a sua substituição e/ou isolamento. Neste estudo foi avaliada a viabilidade económica procedendo ao seu isolamento com painéis semi-rígidos de lã de vidro, tendo-se obtido um tempo de retorno do investimento de cerca de 8 meses.

Foram também estudadas as características das peças cerâmicas em termos da sua humidade crítica e do tempo necessário à sua permanência na olaria. Para isso foram feitos ensaios experimentais com um provete do mesmo material obtendo-se o valor da humidade crítica de 15%, tendo-se verificado que o tempo permanência das peças estudadas é maior do que seria necessário.

Uma vez que a secagem é um processo fundamental no fabrico das peças sanitárias, foram reavaliadas as condições operatórias na olaria em termos de temperatura, humidade e renovação do ar, podendo-se concluir que as condições ótimas são 40°C, 80% e 1,3 m.s⁻¹.

Palavras-chave: Cerâmica, Otimização energética, Secagem

Abstract

Due to the high energy costs that the ceramic sector have shown, energy management is an essential vector that is a key of the evolution and success of these companies in today's demanding markets.

The present work was performed in *ARCH* Valadares company, with the purpose of characterizing and evaluating the way the energy is controlled in one of the sections, olaria 1.

Initially was made an energetic survey, were it was found that, the natural gas is the most utility consumed, with 68%, and the remaining part corresponds to electric energy. In all the electric energy consumed, the majority, 96%, is used in lighting, ventilation and air renewal, and a small part, 4%, is used in the casting of parts, in the form of compressed air. These data allowed to point this study towards rationalization of natural gas consumption.

To do this, some actions have been studied and suggested, not only in some actions to apply not only in heat generators equipment but also in the pottery space. As a result of the existence of heat losses between 141 kW and 316 kW, it was suggested that these equipments must be checked and maintained. In relation to the damaged pottery cover, a replacement and/or insulation has been suggested. The potential economic viability of the insulation with semi-rigid panels of glass wood was evaluated in this study, and the expected payback period is 8 months.

The characteristics of the ceramic pieces have been studied, in terms of their critical humidity and the time required for their permanence in the pottery space. In order to do this, experimental tests were carried out with a specimen of the same material, and it was verified that the time of permanence of the pieces is bigger than necessary.

Since drying is a fundamental process in the manufacture of sanitary ware, the operation conditions have been reviewed in terms of temperature, humidity and air renewal. It can be concluded that the optimum conditions are 40°C, 80% and 1.3 m.s⁻¹.

Key words: Ceramic, Energetic optimization, Drying

Abreviaturas, siglas e simbologia

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidades
A	-área	[m ²]
cp	-calor específico a pressão constante	[kJ/(kg.K)]
d	-diâmetro	[m]
D	-diagonal maior	[m]
d_i	-diagonal menor	[m]
F	-fator de conversão	adimensional
h	-coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/ m ² .C]
H	-entalpia	[kW]
j	-número de grandezas fundamentais	[unidades]
k	-condutividade térmica	[W/ (m.K)]
$k.$	-número de grupos adimensionais	[unidades]
L	-dimensão característica	[m]
m	-massa	[kg]
\dot{m}	-caudal mássico	[kg/s]
MM	-massa molecular	[kg/kmol]
n	-número de variáveis	[unidades]
N^o	-número	[unidades]
P	-pressão	[atm]
PCI	-poder calorífico inferior	[kWh/m ³]
PCS	- poder calorífico superior	[kWh/m ³]
q	-perdas de calor	[kW]
Q	-calor transferido	[kW]
$R.$	-constante dos gases perfeitos	[atm.cm ³ /(molK)]
R	-resistência à transferência de calor	[m ² .C/W]
t	-tempo	[s]
T	-temperatura	[°C]
U	-coeficiente global de transferência de calor	[W/ (m ² .C)]
\dot{v}	-caudal volumétrico	[m ³ /s]
\bar{v}	-velocidade média	[m/s]
V	-volume	[m ³]
X	-teor de humidade média de um sólido	[kg água/kg sólido seco]

Letras gregas

ϵ	-emissividade	[adimensional]
β	-coeficiente de expansão térmico	[K ⁻¹]
σ	- constante de <i>Stefan Boltzmann</i>	[W/(m ² K ⁴)]
Δ	-diferença	-
π	-grupo adimensional	[adimensional]
μ	-viscosidade	[Pa. s]
ρ	-densidade	[kg/m ³]

Subscritos

<i>ar</i>	-ar	<i>total mensal</i>	-total mensal
<i>Ar. Aquec.</i>	-ar que irá aquecer a olaria	<i>volumétrica</i>	-volumétrica
<i>Ar. Comb.</i>	-ar utilizado na combustão/comburente	<i>x</i>	-espessura
<i>ArF</i>	-ar frio	<i>w</i>	-água
<i>ArQ</i>	-ar quente		
<i>b_h</i>	-base húmida		
<i>b_s</i>	-bolbo seco		
<i>b_{se}</i>	-base seca		
<i>C</i>	-crítico		
<i>carga</i>	-carga		
<i>CC</i>	-capacidade do compressor		
<i>conduta</i>	-conduta		
<i>c. P</i>	-conversão de pressão		
<i>c. T</i>	-conversão de temperatura		
<i>e</i>	-entrada		
<i>eq</i>	-equilíbrio		
<i>esc</i>	-escoamento		
<i>esp</i>	-específico		
<i>ext.</i>	-exterior		
<i>F</i>	-fugas		
<i>f</i>	-final		
<i>GasesExhaust.</i>	-gases de exaustão		
<i>GN</i>	-gás natural		
<i>h</i>	-bolbo húmido		
<i>H_g</i>	-mercúrio		
<i>i</i>	-inicial		
<i>int.</i>	-interior		
<i>isolamento</i>	-isolamento		
<i>k</i>	-número de grupos adimensionais		
<i>linear</i>	-linear		
<i>los.</i>	-losango		
<i>M ou modelo</i>	-modelo		
<i>n</i>	-qualquer corrente		
<i>P ou protótipo</i>	-protótipo		
<i>produzido</i>	-produzido		
<i>r</i>	-relativa		
<i>reação</i>	-reação		
<i>ref</i>	-referência		
<i>S</i>	-contração		
<i>s</i>	-saída		
<i>s_e</i>	-sólido seco		
<i>sólido</i>	-sólido		
<i>sup.</i>	-superfície		
<i>telhas</i>	-telhas		
<i>total</i>	-total		

Parâmetros adimensionais

<i>Re</i>	-número de Reynolds
<i>Gr</i>	-número de Grashof
<i>Pr</i>	-número de Prandtl
<i>Nu</i>	-número de Nusselt

Abreviaturas

<i>FTSC</i>	-fase de taxa de secagem constante
<i>FTSD</i>	-fase de taxa de secagem decrescente
PTN	-pressão e temperatura normal
tep	-tonelada equivalente de petróleo

Índice Geral

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do trabalho	1
1.2 Apresentação da empresa	6
1.3 Objetivos do trabalho.....	8
1.4 Organização da dissertação	8
2. Caracterização da ARCH Valadares.....	11
2.1 O setor cerâmico	11
2.2 Processo produtivo das louças sanitárias.....	13
2.3 Descrição da olaria1	17
3. Levantamento e avaliação energética da olaria 1	23
3.1. Levantamento energético	23
3.1.1 Energia elétrica	23
3.1.2 Ar comprimido.....	25
3.1.3 Gás Natural.....	31
3.2 Consumos e custos específicos	33
3.3 Geradores de calor.....	35
3.3.1 Balanço de energia aos geradores de calor	36
3.3.2 Perdas associadas aos geradores de calor.....	38
4. A secagem de peças sanitárias	41
4.1 Noções gerais sobre a secagem de sólidos	43
4.1.1 Alguns conceitos importantes	44
4.1.2 Classificação dos materiais.....	44
4.1.3 Mecanismos de fixação da água em corpos cerâmicos	46
4.1.4 Curvas de secagem	47
4.1.5 Curvas de Bigot	49
4.2 A psicrometria	50
4.3 Análise dimensional	52
4.4 A secagem no interior da olaria 1	53
4.5 Estudo das condições ótimas de secagem na olaria	55
4.5.1 Ensaio experimentais: Determinação da humidade crítica	56
4.5.2 Curva de secagem para modelo e protótipo.....	59
4.5.3 Determinação do tempo ótimo de secagem.....	60

4.5.4 Escolha das condições operatórias para o processo de secagem na olaria 1	66
4.6 Formulação empírica de um modelo de secagem	69
5. Otimização energética	73
5.1 Medidas de otimização a implementar nos geradores de calor	73
5.1.1 Limpeza das superfícies de transferência de calor no interior dos geradores de calor.	73
5.1.2 Limpeza das superfícies de transferência de calor dos geradores de calor.	74
5.1.3 Manutenção do interior dos geradores de calor	75
5.2 Medidas de otimização a implementar na olaria	76
5.2.1 Isolamento da cobertura da olaria	77
5.2.2 Alteração das condições operatórias de secagem	77
5.3 Identificação medidas de redução das fugas de ar comprimido.	80
6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.	85
Bibliografia	89
Anexos	93
A. Anexo A-Resultados obtidos no levantamento energético	95
B. Anexo B-Balanco energético aos geradores de calor	101
C. Anexo C-Resultados obtidos e calculados para a secagem das peças cerâmicas	109
D. Anexo D- Medidas de otimização energética	115

Índice de Figuras

Figura 1.1-Evolução em percentagem, da dependência energética em Portugal (DGEG, 2016).....	2
Figura 1.2- Evolução do consumo total de energia primária (tep) e respetiva comparação entre o ano de 2005 e 2014 para Portugal (DGEG, 2016).....	3
Figura 1.3- Evolução do consumo total de energia final por setor de atividade (tep) e respetiva comparação entre o ano de 2005 e 2014 para Portugal (DGES, 2016)	5
Figura 1.4-Planta topográfica da empresa	7
Figura 2.1-Fluxograma do processo de produção das louças sanitárias	15
Figura 2.2- Planta da Olaria 1	17
Figura 2.3-Fotografia da olaria, com apresentação de uma bateria e respetiva banca de acabamento	18
Figura 2.4-Layout da olaria 1 com respetivo circuito de pasta.....	18
Figura 2.5- Layout da olaria 1 com respetiva energia térmica	19
Figura 3.1- Layout t da olaria 1 com respetivo circuito elétrico.....	24
Figura 3.2-Consumo de energia elétrica na olaria 1 em relação ao consumo total faturado	25
Figura 3.3- Comparação entre o consumo médio de energia utilizada na produção de ar comprimido e a energia elétrica total faturada(média) para os meses de maio e junho.....	26
Figura 3.4-Layout da Olaria 1 com respetivo circuito de ar comprimido	27
Figura 3.5- Percentagem de fugas de ar comprimido na instalação.....	30
Figura 3.6- Repartição média do consumo mensal efetivo de ar comprimido pelas diversas secções	31
Figura 3.7- Layout da olaria 1 com respetivo circuito de Gás Natural	32
Figura 3.8- Consumo de gás natural na olaria 1 em relação ao consumo total	32
Figura 3.9- Consumo médio, em tep das diferentes utilidades na olaria1 para os dois meses de análise.....	33
Figura 3.10- Consumo médio, em tep, das diferentes formas de energia na olaria1 para os dois meses de análise.....	33
Figura 3.11- Ilustração de um gerador de calor com respetivo circuito de ar de aquecimento	35
Figura 3.12- Identificação das correntes consideradas no balanço energético.....	37
Figura 4.1-Humidade de um sólido em função do tempo de secagem Adaptado de Smith et al, (1993)	47
Figura 4.2 Taxa de evaporação em função da humidade do sólido Adaptado de Smith et al, (1993)	48
Figura 4.3-Curva típica de Bigot (Mancuhan et al,2016)	49
Figura 4.4- Carta psicrométrica baseada numa pressão total igual à atmosférica Adaptado de Althouse e Turnquist (1956).....	51
Figura 4.5-Fotografia de uma bacia opus.....	56
Figura 4.6-Fotografia de um provete estudado em laboratório.....	56
Figura 4.7-Metodologia utilizada na concretização da curva de Bigot	57
Figura 4.8-Curvas de Bigot obtidas experimentalmente para o modelo às temperaturas de 35, 40 e 45°C.....	58

Figura 4.9-Curvas de secagem obtidas experimentalmente para o modelo às temperaturas de 35, 40 e 45°C	60
Figura 4.10-Apresentação dos resultados obtidos para a secagem a 35°C do modelo (provete) e do protótipo (bacia opus)	64
Figura 4.11-Propriedades psicrométricas do ar da olaria 1 durante a secagem realizada no dia sete de outubro	67
Figura 4.12-Propriedades psicrométricas do ar com o valor de umidade relativa sugerido.....	68
Figura 4.13-Ajuste do modelo aos resultados experimentais para T=35°C	71
Figura 4.14- Ajuste do modelo aos resultados experimentais para T=40°C	71
Figura 4.15- Ajuste do modelo aos resultados experimentais para T=45°C	71
Figura 5.1-Sujamento presente na entrada de ar para aquecimento da olaria	74
Figura 5.2-Sujamento presente na entrada de ar para a combustão.....	74
Figura 5.3-Sujamento presente nas condutas terrestres de distribuição de ar pela olaria.....	75
Figura 5.4-Reposicionamento dos geradores de calor na olaria	76
Figura 5.5-Sugestão a implementar na olaria, para efetuar a secagem das peças	79
Figura 5.6 Layout geral da empresa com respectivo circuito de ar comprimido	81
Figura 5.7 Layout geral da empresa com respectivo circuito de ar comprimido e medidas de eficiência a adotar na linha	82
Figura B.1-Representação da secção do ventilador, por entra o ar que será usado como comburente na combustão.....	102
Figura B.2- Representação da secção, por entra o ar que será usado no aquecimento da olaria.....	103
Figura B.3-Representação da secção por onde são expelidos os gases de exaustão, com as respectivas dimensões.....	106
Figura B.4-Representação esquemática de uma partida de funcionamento para o gerador 4	107
Figura C.1-Determinação do ponto crítico para a experiência realizada a 35°C.....	109
Figura C.2-Determinação do ponto crítico para a experiência realizada a 40°C.....	109
Figura C.3-Determinação do ponto crítico para a experiência realizada a 45°C.....	110
Figura C.4-Representação da divisão da olaria por pontos.....	110

Índice de Tabelas

Tabela 3.1-Resultados obtidos para os consumos e custos específicos de cada utilidade envolvidos na Olaria 1	34
Tabela 3.2- Perdas associadas a cada gerador de calor	38
Tabela 4.1-Resultados obtidos para a variação de humidade das peças na olaria 1 com o tempo, e após saída da estufa no mês de junho	54
Tabela 4.2-Valores médios medidos para a temperatura do ar de aquecimento da olaria 1 à entrada e à saída do gerador de calor.....	55
Tabela 4.3-Resumo dos valores de contração obtidos até ao PC ao final da secagem	59
Tabela 4.4-Valor estimados para os tempos de secagem no protótipo para as temperaturas de 35°C, 45°C e 45°C	65
Tabela 4.5-Resumo das propriedades de secagem (tempo, contração e consumo) de uma bacia, a diferentes temperaturas.....	66
Tabela A.1- Resultados obtidos e calculados usados na determinação da parcela de ar comprimido consumido, em relação ao consumo elétrico total	96
Tabela A.2-Resultados obtidos e calculados, usados na quantificação da percentagem e dos custos associados às fugas de ar comprimido	97
Tabela A.3-Resultados obtidos referentes aos consumos de ar comprimido por cada seção no período de vazamento	98
Tabela A.4-Consumos de gás natural por gerador para os meses de maio e junho .	100
Tabela B.1-Valores medidos de temperatura e velocidade à entrada do ar utilizado na combustão	102
Tabela B.2-Valores medidos de temperatura e velocidade para o ar que entre no gerador	104
Tabela B.3- Valores medidos de temperatura e velocidade dos gases de combustão	105
Tabela C.1- Registos psicrométricos do ar na olaria ao longo do dia 19-05-2016.....	111
Tabela C.2-Registos psicrométricos do ar na olaria ao longo do dia 23-05-2016.....	112
Tabela C.3-Determinação do consumo de gás natural requerido na secagem das peças opus	113
Tabela D.1-Previsão da poupança obtida com a implementação da medida referente à manutenção do interior dos geradores de calor	116
Tabela D.2-Valores de temperatura selecionados para a região de Valadares (Clima Data, 2016).....	117
Tabela D.3-Resultados obtidos das perdas energéticas na olaria, com e sem isolamento, e respetiva temperatura de aquecimento do ar para manter a temperatura ambiente a 25°C.	118
Tabela D.4--Previsão da poupança obtida com a implementação da medida referente às reduções das fugas de ar comprimido.....	119

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem inicialmente, como propósito, retratar a importância da otimização energética na indústria.

Seguidamente é feita uma breve apresentação da unidade industrial onde foi desenvolvido o projeto, e retratada a importância da necessidade de racionalização energética neste contexto.

Por fim, é apresentada a estrutura e organização da dissertação.

1.1 Enquadramento do trabalho

Desde o aparecimento do Homem e associado à sua evolução, está subjacente o uso de energia (Schwarz, 2007).

Mas na verdade, só a partir da revolução industrial, em meados do século XVIII, é que a procura e os consumos energéticos aumentaram consideravelmente. Até então, os principais recursos eram do tipo renovável e consistiam em grosso modo nas energias hídrica, eólica e na biomassa (sobretudo na queima de madeira), não considerando a força humana e animal.

Após revolução, as fontes de energia renováveis foram dando progressivamente lugar a um novo regime energético caracterizado pelo uso de combustíveis fósseis. Daí em diante, as condições de vida humana tornaram-se largamente dependentes destes recursos, que de certo modo, potencializaram o desenvolvimento quer económico quer tecnológico contribuindo estes, por sua vez, para o desenvolvimento populacional. Este período foi suportado inicialmente pelo uso de carvão, que foi sendo destronado pelo aparecimento de outros combustíveis fósseis como o petróleo e o gás natural, que tinham a vantagem de armazenarem grandes quantidades de energia, de serem de fácil utilização e o facto de serem formas de energias relativamente baratas (Novais, 1995; Kleinbach, 2003).

Porém, no fim de 1973 dá-se a primeira crise petrolífera, que se repetiu posteriormente em 1979, onde os preços do petróleo aumentaram subitamente que advertiu para o facto da escassez deste recurso, gerando um desequilíbrio político-económico, fazendo com que o petróleo deixasse de ser um recurso barato e abundante. Houve, a partir desta época, a necessidade de adotar medidas de redução dos consumos energéticos, bem como o incentivo à retoma do regime anterior. Mas a situação de grande

dependência que a sociedade rapidamente atingiu, impossibilitou o retorno desta situação, uma vez que estes recursos de certa forma, a libertou de trabalhos penosos tornando os seus esforços mais produtivos.

Daí em diante, e até aos dias de hoje, as sociedades enfrentam dois grandes desafios: por um lado o medo do escassear destes recursos e por outro as inquietações ambientais relacionadas com o aquecimento global, a chuvas ácidas e com a produção de resíduos, estando cada um destes temas relacionado com uma má utilização da energia (Schwarz, 2007; Novais, 1995; Hinrichs e Kleinbach, 2003).

O Panorama Energético

Um dos grandes problemas com que a economia portuguesa se depara é a elevada dependência energética exterior. Atualmente essa dependência situa-se entre os 70% e os 80%, figura 1.1.

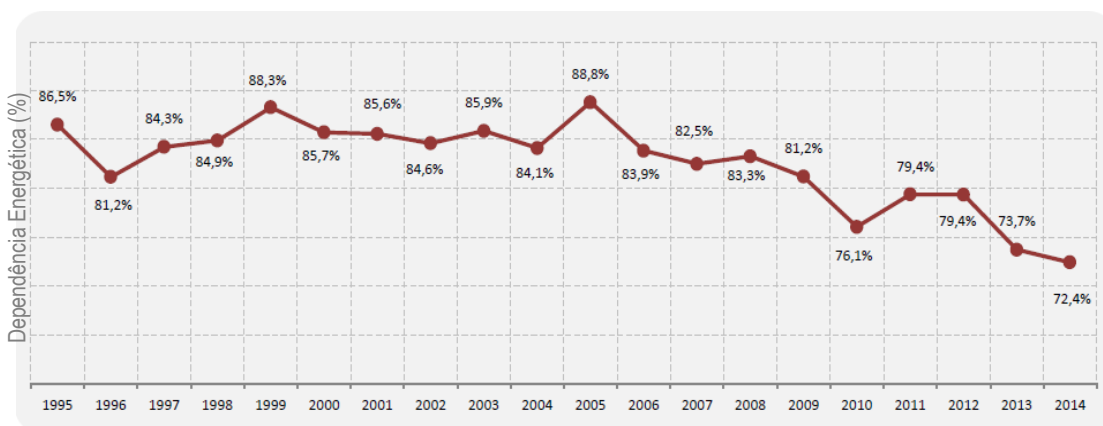


Figura 1.1-Evolução em percentagem, da dependência energética em Portugal (DGEG, 2016)

Portugal desde sempre dependeu do exterior para obter a energia necessária e assegurar os seus consumos, sendo isto fruto da inexistência de produção nacional de fontes de energia fósseis, tais como o petróleo, o carvão e o gás natural, que têm um peso significativo no consumo energético, ver figura 1.2 (DGEG, 2016).

Nos últimos anos, Portugal tem apostado na eficiência energética e no aproveitamento do seu potencial nas energias renováveis, numa tentativa de contrariar a dependência do nosso país relativamente à importação energética.

Ainda com pouca expressão, já se refletem esses esforços, quando se comparam os consumos entre o ano 2005 e 2014 como se pode ver na figura 1.2. Constata-se que em 2005 as três principais fontes de energia primária eram de origem fóssil, dominando o petróleo com 59%, seguido do gás natural com 14% e do carvão com 12%. Mas em 2014, as energias renováveis já ocuparam o segundo lugar, com 26%, seguido do gás

natural com 17%. Porém, embora se encontre em constante redução, a realidade é que o petróleo continua a dominar a primeira posição dos consumos energéticos, com 43%, o que contribui negativamente para a economia do nosso país.

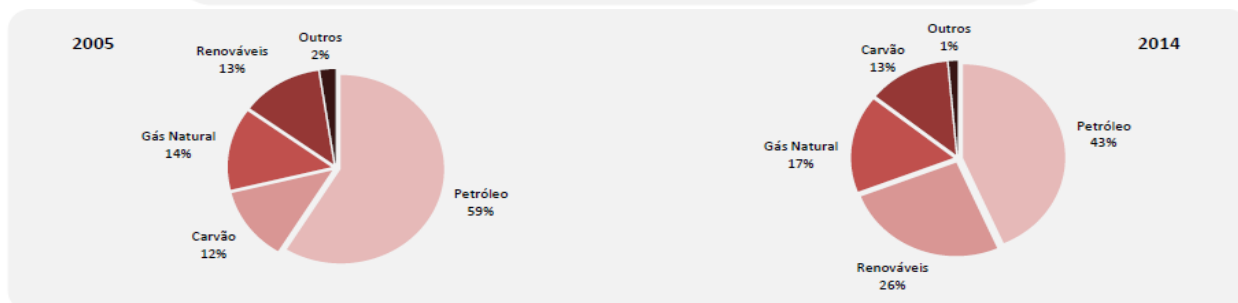
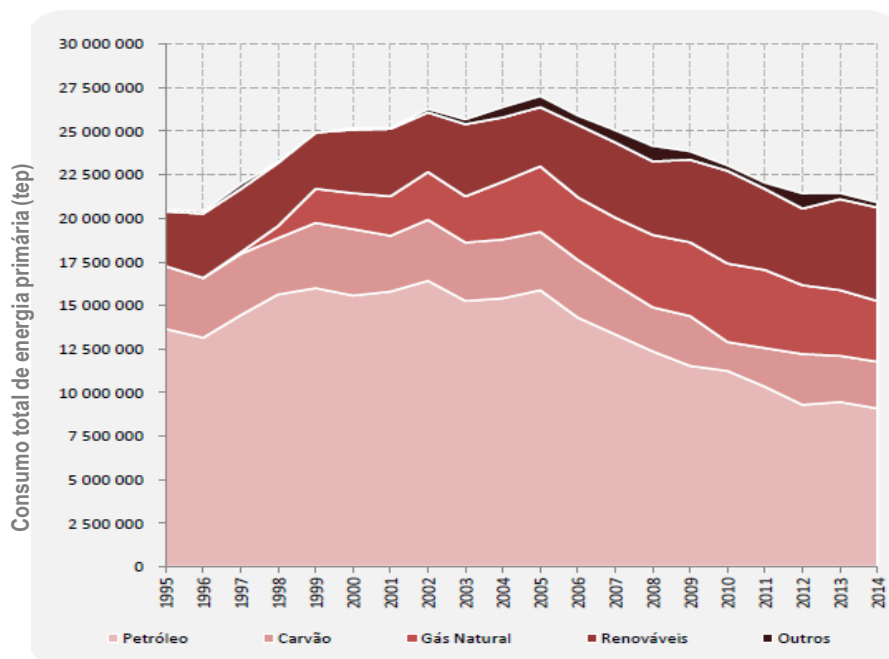


Figura 1.2- Evolução do consumo total de energia primária (tep) e respetiva comparação entre o ano de 2005 e 2014 para Portugal (DGEG, 2016)

Esforços têm sido feitos, no sentido da disseminação das energias renováveis para que liderem o ranking energético português, no sentido de diminuir essa dependência. Mas esta questão apresenta ainda muitas barreiras importantes a superar, que passam por diminuir os custos de investimento e por desenvolver melhor tais tecnologias (APREN, 2016).

Para além desta situação de elevada dependência energética com que Portugal se depara, existem ainda problemas relacionados com os impactos ambientais, sobretudo com as alterações climáticas. Face a este cenário, torna-se cada vez mais imperativo a definição de políticas energéticas e ambientais que estejam cada vez mais em concertação entre estes dois assuntos (DGEG, 2016).

O Pacote Energia-Clima é um exemplo de uma estratégia da União Europeia lançada em 2010, que foi acordada por todos os estados membros, assumindo cumprir um conjunto de prioridades e metas até ao ano de 2020. Este pacote estabelece prioridades e ações com vista à melhoria da competitividade, sustentabilidade e segurança energética. O objetivo é que a União Europeia apresente uma redução, até ao ano de 2020, de 20% do consumo de energia primária mediante um aumento da eficiência energética, reduza em 20% as emissões dos gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990 e por fim, que aumente em 20% a quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto. Estes objetivos comuns são traduzidos em objetivos nacionais tendo em conta a situação específica de cada país. “Portugal 2020”, é a designação do acordo de parceria adotado entre Portugal e a Comissão Europeia, e é nele onde se estabelecem os objetivos definidos para o nosso país. Estes passam pela redução em 25% no consumo de energia primária e em 1% das emissões dos gases com efeito de estufa, e ainda, devido ao seu potencial, pelo aumento em 31% dos consumos finais de energia proveniente apenas de recursos renováveis. De entre os três indicadores, o peso das energias renováveis no consumo total de energia no país tem apresentado uma evolução positiva, sendo o seu valor igual 19,2% em 2004 evoluindo para 24,6% até ao ano de 2012. No entanto existe ainda um longo percurso, para que Portugal atinja as suas metas (Fonseca, *et al*, 2015; Europa 2020, 2014; Portugal 2020, 2016).

Com base nos argumentos ambientais e político-económicos até aqui apresentados, existe a necessidade de mobilização da sociedade portuguesa, para a racionalização de energia, sobretudo nos vários setores de atividade. Na figura 1.3 está apresentado, o contributo dos todos os setores de atividade, no consumo final de energia.

Ao longo dos anos, o setor dos transportes foi aquele que mais contribui para os elevados consumos energéticos, registando para o ano de 2014 um peso de 36%. Já o setor industrial ocupa a posição número dois, apresentando um consumo igual a 31% para esse ano. Este último setor mantém também a sua posição durante todo o período de registo, verificando-se que desde 2005 até 2014 o seu consumo apresentou uma taxa de crescimento negativo no valor de -3,5%.

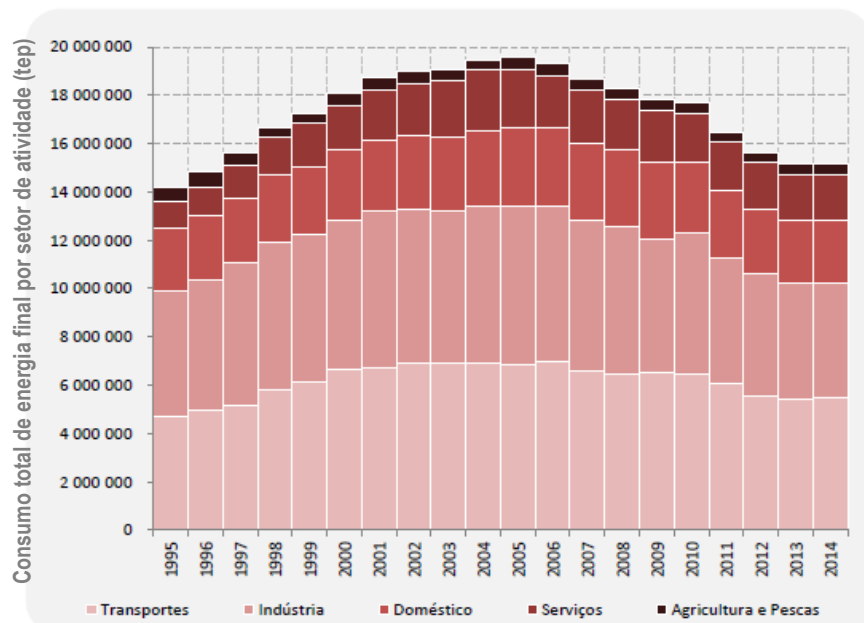


Figura 1.3- Evolução do consumo total de energia final por setor de atividade (tep) e respetiva comparação entre o ano de 2005 e 2014 para Portugal (DGES, 2016)

Mesmo com esta redução, a verdade é que a sua contribuição para os consumos totais ainda é bastante significativa, sendo ainda que grande parte desses consumos geram desperdícios, devido à falta de eficiência na sua utilização, que se traduzirão em custos sem benefícios.

Face a isto, atualmente as empresas começam a adotar estratégias que conduzem a bons desempenhos a nível energético, percebendo que a redução dos respetivos consumos é um fator imperativo na competitividade de uma empresa no mercado atual. As poupanças de energia, e consequentemente dos respetivos custos, surgem como uma das alternativas mais atrativa e viável, para ir ao encontro das exigências de redução de energia e das emissões de gases a ela associada.

1.2 Apresentação da empresa

Foi no concelho de Vila Nova de Gaia, no dia 25 de Abril de 1921 que foi fundada a indústria cerâmica denominada “Fábrica Cerâmica de Valadares”.

Desde o início da sua existência, a empresa cresce sólida e organizadamente com uma produção dedicada exclusivamente a artigos de barro vermelho como tijolos, telhas entre outros.

Por volta dos anos 30 iniciou a fabricação e comercialização de louça de faiança (louças decorativas, azulejos, louças sanitárias entre outras) e permaneceu deste modo durante cerca de vinte anos. Este período ficou marcado pelo prestígio e pelo requinte da louça decorativa portuguesa.

A partir da década de 80, a Cerâmica de Valadares dedica toda a sua atividade apenas à produção de louças sanitárias e outros acessórios de quartos de banho, com o intuito de seguir tendencialmente o mercado, tendo como foco a inovação e especialização dos seus produtores.

No ano de 2008 a empresa recebe um título de prestígio, por parte da *Tektónica* (feira nacional dedicada à inovação de materiais de construção) pelo mérito na concretização de um material inovador, o qual designaram por *Gresanit*. Este material tornou possível conceber peças com menor peso e simultaneamente com maior resistência mecânica, o que não era possível até então (Valadares, 2016).

Entre os anos de 2011 e 2012 a Fábrica Cerâmica de Valadares caminhou gradualmente, com os seus altos e baixos, numa fase mais crítica da sua vida, condicionando a sua existência e acabando mesmo por encerrar em 2012. Mas em setembro de 2015, a força de vontade ditou a nova realidade que foi a recuperação de uma empresa já quase centenária. A retoma da atividade industrial e a reconquista da marca Valadares, fruto de uma longa história, são o foco principal da atual *ARCH* (*Advanced Research Ceramic Heritage*).

A inovação preenche com sucesso o primeiro ano de atividade da *ARCH*, e esta afirma-se com o desenvolvimento de outro novo material, o Highcer. Este material tem interesse no revestimento de superfícies ou na formulação de peças cujos requisitos de aplicação sejam exigentes. Tendo como base este material, novos produtos serão criados e comercializados já a partir deste ano.

De hoje em diante a *ARCH* Valadares está orientada para percorrer um longo percurso de criação e inovação, potencializada não só pela sua capacidade industrial, como

também pelo acesso à excelente, experiente e qualificada mão de obra de todos os seus colaboradores.

A ARCH Valadares atualmente é constituída por 3 fábricas, 1,2 e 3, realçadas a laranja, verde e vermelho, respetivamente, na planta topográfica apresentada na figura 1.4.

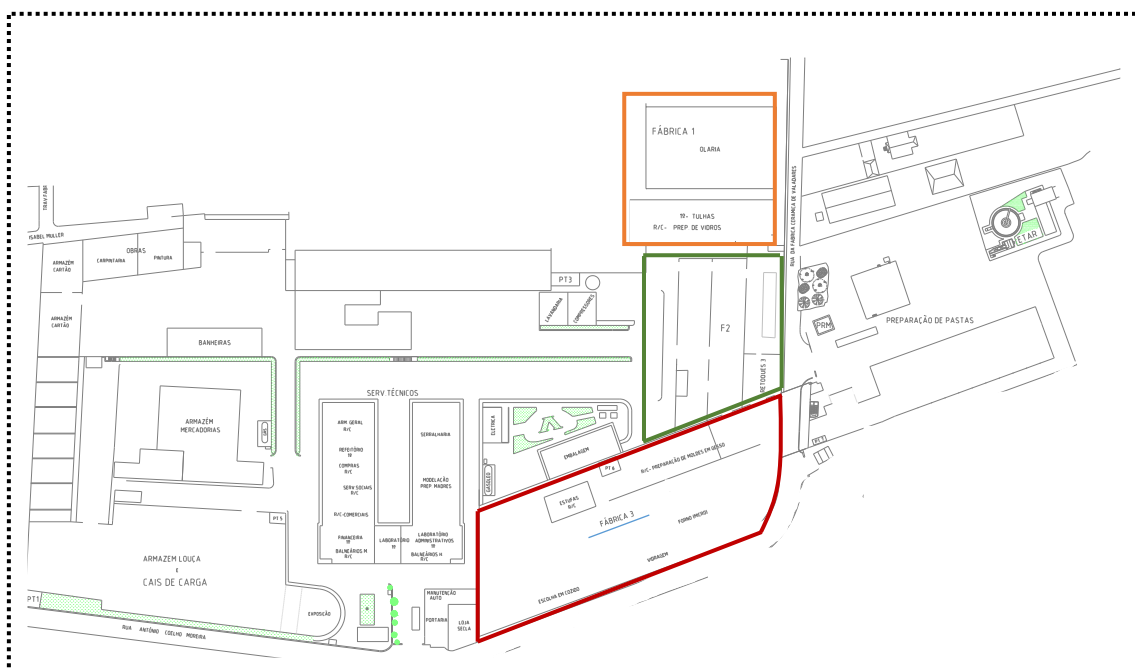


Figura 1.4-Planta topográfica da empresa

A fábrica 1 é constituída por uma olaria, onde se processam os artigos sanitários constituídos por *Vitreous China* ou porcelana sanitária (bacias, bidés, lavatórios, entre outros). É também nesta que se produz o vidro que é enviado para as cabines de vidragem localizados na fábrica 3. Aqui existe ainda um forno descontínuo, que é usado para efetuar o recozimento das peças após retoque a quente.

Na fábrica 2 existem duas olarias (olaria 2 e olaria 2.2) que produzem louças em *Gresanit*. Na fábrica 3 não existem olarias em funcionamento, porém, é nesta onde se concentra grande parte das secções de produção, como a vidragem, a preparação dos moldes, a escolha, o retoque, o forno e as estufas, efetuando-se nestes dois últimos a cozadura e a secagem das peças respetivamente.

Ainda é possível constatar, na figura 1.4, a parte da preparação de pastas no lado direito, o armazém no lado esquerdo e por fim, numa zona mais central, os serviços técnicos, como a comercial, a financeira, entre outros.

A empresa labora com um ciclo operacional semanal de cinco dias, estando grande parte da produção a laborar das 8h às 17h, excluindo a secção da olaria que possui um

período de funcionamento das 7h às 16h. Os serviços técnicos, em geral laboram entre as 9h e as 18h.

1.3 Objetivos do trabalho

A indústria cerâmica é um dos setores industriais que apresenta maiores consumos de energia. Isto significa que o processamento dos seus produtos requer grandes quantidades de energia, sendo que os custos associados a esta parcela representam cerca de 30% a 40% dos custos totais industriais. Esta parcela representa, pois, uma das principais condicionantes pela fraca competitividade industrial, tornando-se impreterível a racionalização da energia nesta área, através da redução dos custos associados aos consumos energéticos, mantendo, no entanto, o mesmo nível de produção.

Atendendo ao historial da empresa (reabriu em setembro de 2015), o principal objetivo deste trabalho foi, numa primeira fase, proceder a um levantamento energético de todas as utilidades consumidas. O levantamento energético pode ser interpretado como a primeira radiografia ao desempenho da secção em estudo. Através deste, é possível avaliar os consumos e a forma como a energia está a ser utilizada.

O segundo objetivo consistiu na identificação de medidas que permitem traçar um plano de redução dos consumos de gás natural (utilidade esta que apresenta maiores consumos). Todas as medidas propostas, visam a redução dos respetivos consumos, sem comprometer, obviamente, a qualidade do produto final.

O terceiro objetivo deste trabalho, consistiu no estudo e na identificação das condições operatórias (temperatura, humidade e velocidade do ar), a implementar na olaria de modo a que o processo de secagem nela ocorrido, seja o mais eficiente possível.

Todo este trabalho, teve incidência apenas na Olaria 1, e como tal, todos os resultados e medidas que são aqui apresentados referem-se apenas a esta secção. Este trabalho tem por base os meses de maio e junho de 2016 (tempo no qual foi feito o levantamento energético), e setembro a outubro de 2016 (período no qual se efetuou o estudo do processo de secagem).

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação apresenta-se dividida em seis capítulos.

Neste primeiro capítulo é feita uma introdução à necessidade de promover a eficiência energética, no âmbito industrial. É ainda apresentada a *ARCH* Valadares, empresa na

qual incidiu todo este estudo. Por fim, são mencionados os principais objetivos desta dissertação bem como a sua estruturação.

No segundo capítulo, é inicialmente enquadrado o setor cerâmico e posteriormente é feita uma descrição mais detalhada sobre o processo produtivo que o constitui. De seguida é apresentada uma descrição mais pormenorizada da olaria 1, secção na qual teve incidência todo este trabalho.

No terceiro capítulo é apresentado o levantamento energético das diferentes utilidades consumidas na olaria 1. Neste capítulo são também avaliados os geradores de calor, equipamentos necessários à manutenção das condições de operação na olaria 1.

No quarto capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos que ajudam a compreender melhor a operação de secagem, e de seguida é descrito o modo como se procedeu à determinação das condições operatórias.

As propostas de melhorias que visam a otimização do consumo de gás natural são apresentadas no capítulo 5. São ainda apresentadas neste ponto, as vantagens na adoção das medidas usadas, bem como as ações ou investimentos que as suportam.

Finalmente, no sexto e último capítulo, são expostas as conclusões gerais do presente trabalho, e são apresentadas as sugestões de trabalho futuro a desenvolver, como complemento deste estudo.

Capítulo 2

Caracterização da ARCH Valadares

A ARCH Valadares, descrita na generalidade na subsecção 1.2, é neste capítulo caracterizada. Mais concretamente, será descrito o seu processo produtivo, bem como as etapas que o constitui. Previamente ao que foi dito será ainda feito um breve enquadramento ao setor em questão e por fim, será apresentada e descrita a secção da olaria 1.

2.1 O setor cerâmico

A ciência que se ocupa do estudo e da diferenciação dos diversos materiais é a ciência dos materiais, e tem como principal ferramenta a repartição destes em classes.

São três as principais classes dos materiais sólidos, entre as quais se distinguem os metais, os polímeros e os cerâmicos. Esta classificação tem em conta os tipos de átomos envolvidos, assim como o tipo de ligação química formada entre eles. Devido à sua importância em engenharia, é ainda frequente considerar o grupo dos materiais compósitos e eletrónicos. Neste trabalho apenas vão ser abordados os materiais referentes ao grupo dos cerâmicos (Ayache et al, 2010; Carter *et al*, 2013).

Derivado do grego, a expressão “*Keramos*” foi a primeira designação dada aos materiais cerâmicos, que significa “terra queimada” e era comumente utilizada para descrever todos os materiais cujas propriedades eram adquiridas através de tratamento térmico a altas temperaturas.

Os materiais cerâmicos, de acordo com Reh (2007), na Europa Continental são definidos como:

“Materiais não metálicos, inorgânicos, com uma estrutura cristalina de pelo menos 30%, insolúveis em água e que obtiveram a sua microestrutura como resultado da ação da temperatura”.

Em geral os materiais cerâmicos apresentam características muito peculiares, tais como grande fragilidade e dureza, elevada resistência à compressão, elevada resistência química, bom isolamento térmico e elétrico, entre outras.

Devido às diferenças nas ligações químicas, os materiais cerâmicos apresentam diferentes propriedades, fazendo com que esta classe seja ainda dividida em dois grandes grupos: os cerâmicos técnicos e os cerâmicos tradicionais. Os materiais do primeiro grupo incluem peças relativamente pequenas e com custos elevados, enquanto

que os cerâmicos tradicionais são geralmente constituídos por peças de grande volume e a preços mais reduzidos, quando comparados com os do primeiro tipo. Os materiais cerâmicos técnicos são habitualmente compostos puros ou relativamente puros, de óxidos, carbonetos ou nitretos. O óxido de alumínio (Al_2O_3), o carboneto de silício (SiC) e o nitreto de silício (Si_3N_4) são alguns exemplos destes materiais e são aplicados apenas em tecnologias de ponta, como por exemplo na engenharia espacial, na base de constituição de painéis de vaivéns espacial, como o *space shuttle* (Smith *et al*, 1998). Já os cerâmicos tradicionais, são normalmente obtidos a partir de três componentes básicos: a argila, a sílica e o feldspato, que por se tratarem de materiais mais simples e abundantes, são aplicados em situações mais comuns. As telhas, os tijolos, os jarros decorativos e as louças sanitárias são alguns exemplos pertencentes a esta categoria. Neste trabalho são apresentados os materiais cerâmicos tradicionais, e em particular o subsector de produção de louças sanitárias.

Constituição das louças sanitárias

Os diversos materiais que estão na base de constituição das louças sanitárias são resultado das várias combinações possíveis entre as respetivas matérias primas. O produto delas resultante toma a designação de pasta ou barbotina. Atualmente, a *ARCH* predispõe de dois tipos de materiais, a porcelana sanitária e o *Gresanit*. Existe ainda um terceiro tipo, o *Highcer*, que foi criado recentemente e que se encontra já em fase de lançamento.

O *Vitreous China* é uma porcelana cerâmica, que necessita ser cozida a uma temperatura que ronda os 1200°C . Após cozedura, adquire uma tonalidade amarela, quase branca, apresentando uma taxa de absorção de água inferior a 0,5% em massa o que confere, de certo modo, grande resistência mecânica e boa resistência ao ataque químico e bacteriológico. Porém, o facto de apresentar elevado potencial de contração e deformação durante o fabrico fazem com que este material seja inadequado à produção de artigos com grandes dimensões.

Muitos produtores utilizam assim o *Fine FireClay* (Grés fino) como alternativa ao *Vitreous China*, para a produção de artigos mais complexos e de grandes dimensões. Porém, os artigos dele resultante, apresentam baixa resistência mecânica e química, destacando-se os sérios problemas que apresentam de fendilhamento, o que limita, de certa maneira, a sua utilização (Tom e Ibis, 2010).

Foi neste sentido que, em 2004, a Valadares concebeu o *Gresanit*, que veio imediatamente dar resposta à necessidade de produzir artigos de grandes dimensões, tendo como exemplo as bases de chuveiro, demonstrando simultaneamente

propriedades interessantes quer de resistência química, como também de resistência mecânica. A absorção de água por este tipo de material ronda os 4,5%.

Recentemente, a empresa desenvolveu um novo material, bastante peculiar, designado por *Highcer*. Este terceiro material destaca-se de todos os outros pelas suas propriedades antiderrapantes e de impermeabilidade, elevada resistência mecânica e ainda propriedades de hidrorrepelência (ARCH, 2016).

De entre os três componentes básicos, a argila é a matéria prima principal, que está na base de constituição das barbotinas. Esta, ao ser misturada com a água, adquire plasticidade, propriedade esta que é importante no momento da moldagem das peças. Para além destes componentes básicos, outros materiais podem ser adicionados, para produzir barbotina dotada das características pretendidas. Exemplos deles são os antiplásticos, que reduzem o encolhimento das argilas durante a secagem e os fundentes que reduzem a temperatura de vitrificação.

Independente do tipo de material que está na base de constituição das louças sanitárias, a base dos processos de fabricação é comum a todos eles. De um modo geral, esta compreende as seguintes etapas:

- Preparação das barbotinas;
- Conformação das peças;
- Vidragem;
- Tratamento térmico;
- Acabamento.

2.2 Processo produtivo das louças sanitárias

O facto do processo de fabrico das louças ser extenso e completo, faz com que os seus artigos sejam integralmente desenvolvidos e produzidos na própria empresa, evitando assim, a subcontratação de qualquer serviço, para disponibilizar ao cliente a(s) peça(s) pretendida(s).

Para além disto, a empresa disponibiliza serviços próprios de manutenção, que cooperam na conservação de todos os locais e equipamentos existentes, como também proporcionam o desenvolvimento de diversas soluções tecnológicas que visam responder às necessidades do processo fabril.

O layout do processo de fabricação é, devido a tudo o que foi dito, bastante complexo, como pode ser observado no esquema da figura 2.1.

Desde a idealização até à industrialização de uma nova peça sanitária, é necessário percorrer diversas etapas preliminares de grande importância, que condicionam, de certo modo, a qualidade do produto final.

Numa primeira fase é então feito um esboço da peça que se pretende criar. De seguida, é produzido um modelo dessa peça, com uma determinada dimensão, que tenha em conta as contrações que se verificarão posteriormente na mesma. Logo após isto, é produzido um primeiro molde. Com este molde, também designado por molde original, produzem-se um conjunto de peças, que são todas elas sujeitas a testes com o intuito de se verificar certos requisitos técnicos e funcionais. Enquanto estes requisitos não são cumpridos, o molde vai sofrendo continuamente alterações. Normalmente, só após algumas tentativas é que se obtém um molde capaz de produzir peças que não apresentem qualquer tipo de imperfeições.

Só após o momento em que o molde original cumpre todos os requisitos, é que se pode avançar para a etapa seguinte, a produção das madres. As madres são peças que partem do molde original e vão ser utilizadas para construir novos moldes, com características iguais àquele que lhe deu origem. Por outras palavras, uma madre é basicamente um “molde” usada para a produção de moldes. Estas peças, dependendo do tipo de louça, da complexidade da mesma e até mesmo dependendo de fatores económicos, podem ser construídas a partir de três tipos de materiais: gesso, borracha ou resina.

Após concluídos, os moldes são encaminhados para o interior das olarias, onde são normalmente empilhados em série, formando assim as baterias. A etapa do processo de fabrico realizada nesta secção é designada por conformação, e é aqui onde se dá forma às peças.

Esta etapa inicia-se com o enchimento dos moldes com a barbotina e, após isto, é realizado o seu vazamento. O vazamento consiste na injeção de ar comprimido para o interior do molde, que fará com que a barbotina presente em excesso seja removida, e ainda que a restante barbotina, a que vai dar forma à peça, seja projetada contra as bordas do molde, de modo a que a peça fique definida. Após isto, as peças ficam em repouso, no interior do molde, durante um período de tempo e, no final, elas são extraídas para bancadas, onde nelas permanecerão sujeitas a determinadas condições de temperatura. Nesta secção é apenas feita uma pré-secagem, designada por secagem verde, conseguindo-se nesta um abaixamento de humidade nas peças até cerca de 13%.

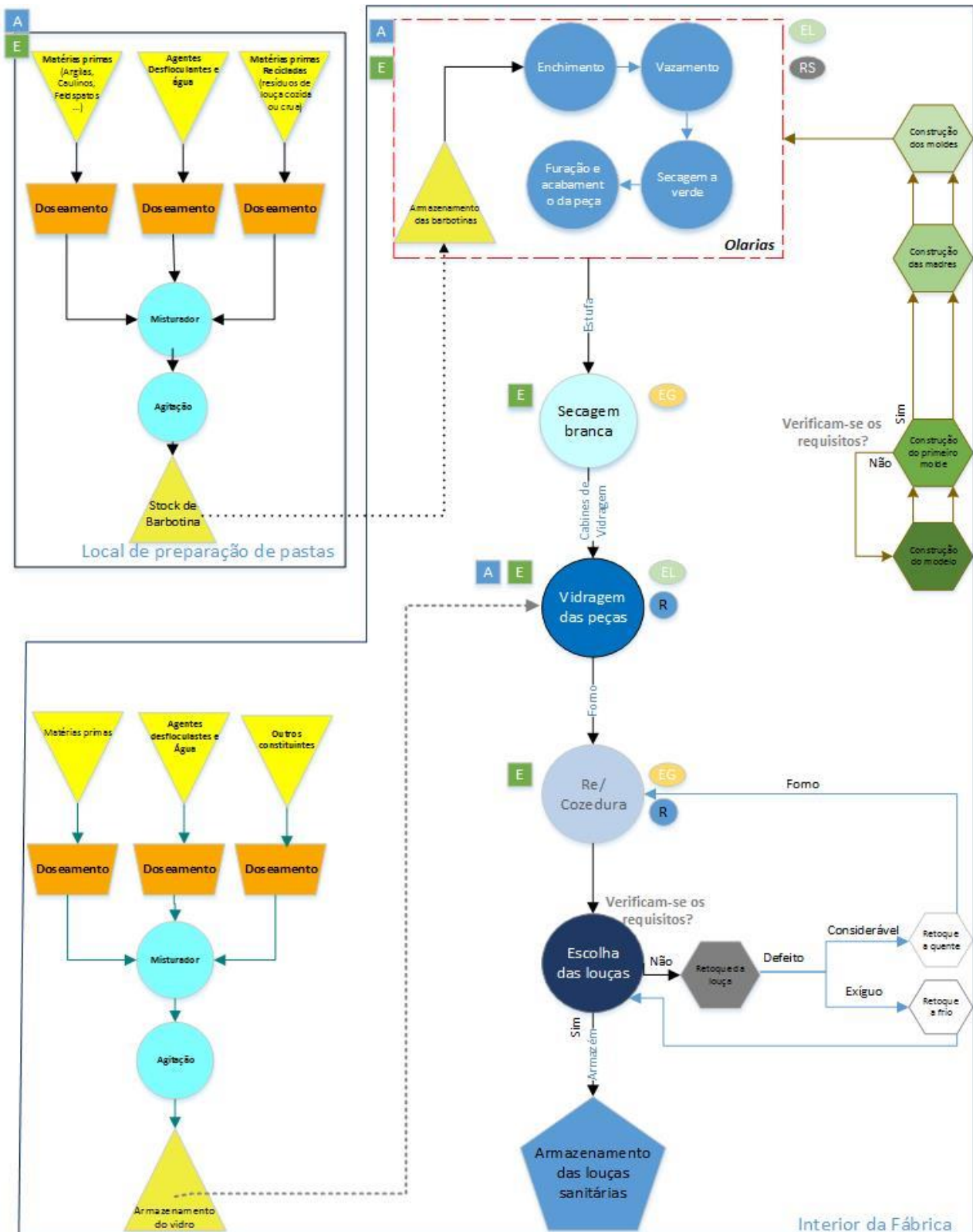


Figura 2.1-Fluxograma do processo de produção das louças sanitárias

Posteriormente, as peças são encaminhadas para as estufas, nas quais se dá continuidade ao processo de secagem (secagem branca). Estas têm como objetivo fazer com que as peças adquiram um estado seco, ou muito próximo desse, com uma humidade remanescente de cerca de 1%. Só após atingido este valor é que as peças estão em condições de serem cozidas, pois caso contrário estas podem fendilhar ou até mesmo rebentar durante a cozedura. Mas, previamente à cozedura, as peças ainda são enviadas para a secção de vidragem.

A vidragem consiste no revestimento das peças com um esmalte rico em sílica, que na presença de outros constituintes e durante o tratamento térmico, é capaz de formar o vidro. Este revestimento, para além de alterar a aparência das peças, é responsável por conferir impermeabilidade e melhorar a dureza e a resistência química das mesmas. Este processo é efetuado manualmente, em cabines de vidragem, com o uso de pistolas providas de ar comprimido. A cor ou a combinação de cores que se confere às peças são obtidas associando pigmentos ao vidro. Após isto, as peças são colocadas em transportadores com prateleiras e armazenadas temporariamente junto ao forno para posterior cozedura.

As peças na cozedura são sujeitas a temperaturas que rondam os 1200°C em ciclos com duração de cerca de 17h. É nesta etapa final que ocorrem alterações físicas e químicas que conferem às peças as propriedades e características pretendidas, como a resistência mecânica, a resistência à água e a substâncias químicas, entre outras, sendo por isso de extrema importância, o controlo das condições técnicas da cozedura.

Esta fase é determinante para as louças, uma vez que os defeitos ocorridos nas etapas anterior, e não detetáveis, são aqui reconhecidos, pois é durante a cozedura que tais defeitos são ampliados. Os defeitos resultantes desta etapa são mais caros do que os mesmos ocorridos nas etapas anteriores, pois estes englobam grande parte dos custos de produção. É por estas razões que existe ainda uma etapa entre a vidragem e a cozedura que consiste na avaliação do estado das peças, de modo a evitar que as peças que apresentam defeitos prossigam para a esta etapa.

Por fim, as peças são sujeitas a testes de escolha, com o intuito de separar as peças com e sem defeito. As peças que se apresentem hábeis, são enviadas para o armazém onde são embaladas e vendidas. As peças que apresentam imperfeições, são avaliadas. Se o defeito apresentado for irrecuperável, as peças são imediatamente descartadas, enquanto que, se os defeitos forem possíveis de serem eliminados, as peças são enviadas para o retoque. No retoque, as peças podem ser recuperadas por duas vias, a quente ou a frio. A opção por cada uma destas vias depende de tipo de

irregularidade a tratar. Se esta for grande ou profunda, terá de ser por via quente, caso esta seja minuciosa, então o mesmo poderá ser feito por via fria. Estas duas metodologias diferem principalmente no facto das peças tratadas por via quente necessitarem de serem recozidas para que esse defeito seja completamente eliminando, o que justifica a sua designação.

2.3 Descrição da olaria1

Neste ponto será feita uma descrição mais pormenorizada do espaço físico onde incidiu todo este estudo, a olaria 1. Para melhor compreensão, do que irá ser abordado, é apresentado, na figura 2.2, a planta interior desta secção. Ainda neste ponto será feita uma descrição da etapa do processo que é executada nesta secção, a conformação.

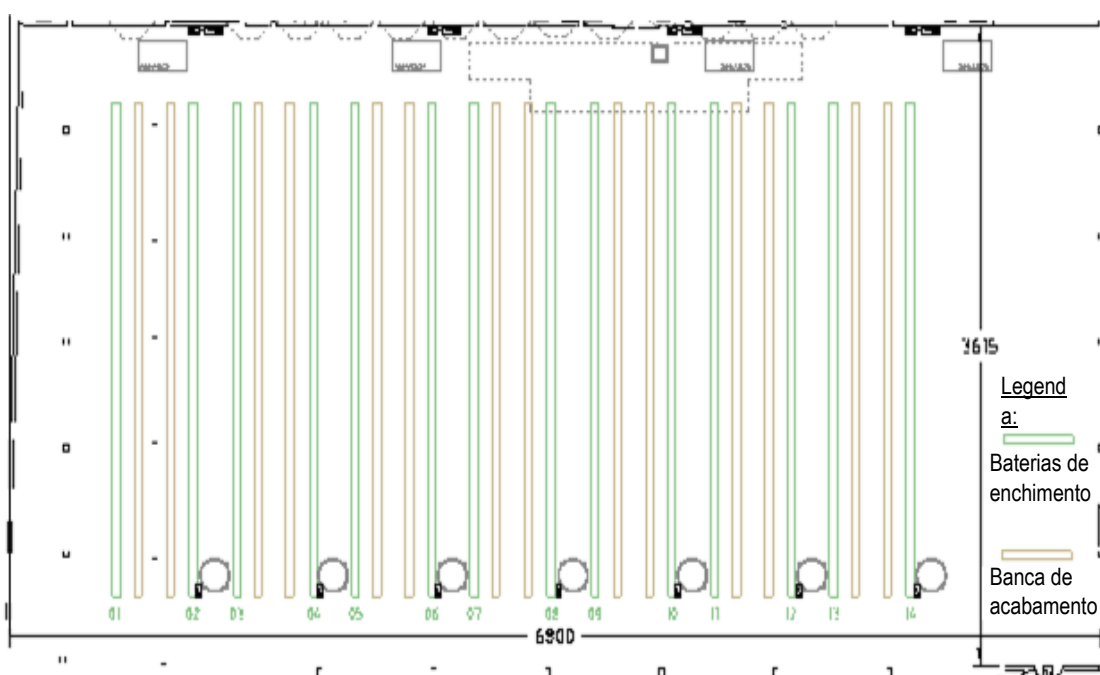


Figura 2.2- Planta da Olaria 1

Esta secção ocupa uma área que ronda os 2500 m² e é constituída por 14 baterias, representadas a cor verde na figura 2.2. A cor castanha estão representadas as bancadas de acabamento. A cada bateria está associada uma banca deste tipo, e estas, como já referido, são utilizadas para colocar as peças após desmoldagem figura 2.3.

Uma vez preparada a pasta, na secção de preparação de pastas, esta é enviada e armazenada em tanques de grandes dimensões, que se encontram no exterior da olaria (representados a cinza escuro, na parte superior da figura 2.4). Posteriormente, esta pasta é bombada a partir destes tanques, em direção a reservatórios mais pequenos, que se encontram localizados e distribuídos uniformemente ao longo da olaria.



Figura 2.3-Fotografia da olaria, com apresentação de uma bateria e respetiva banca de acabamento

Este circuito de enchimento dos reservatórios está representado na figura 2.4 a cor de rosa e os reservatórios são apresentados na mesma figura a cinza claro em forma circular.

Durante o período de enchimento, a pasta armazenada no interior dos reservatórios é encaminhada para as baterias, para proceder ao enchimento dos respetivos moldes. Cada reservatório sustenta duas baterias, como se pode observar na figura 2.4.

Depois de concluído o enchimento e vazamento das baterias, e de modo a reutilizar a pasta, o seu excesso é encaminhado para um tanque de resíduos que se encontra também situado no exterior da olaria. O circuito de retorno encontra-se representado a tracejado azul na figura 2.4. Posteriormente a barbotina é submetida a alguns processos, de modo a que fique apta a ser novamente usada.

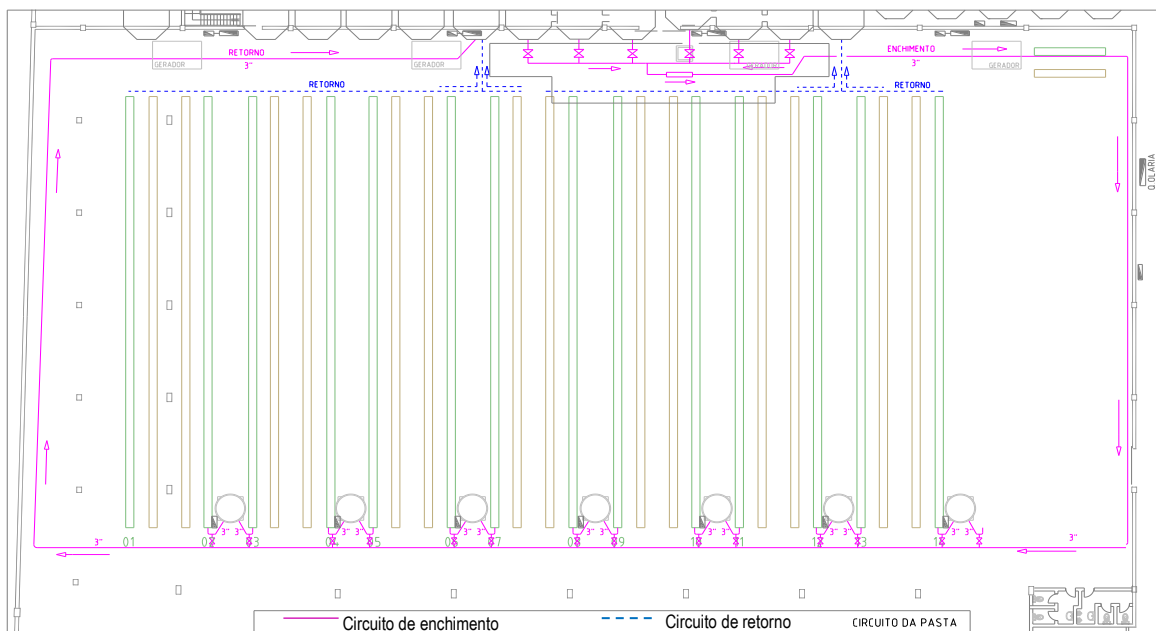


Figura 2.4-Layout da olaria 1 com respetivo circuito de pasta

Para alcançar as condições de temperatura necessárias à pré-secagem das peças e à respetiva secagem dos moldes, a olaria 1 está equipada com quatro geradores de calor, cujo funcionamento será apresentado no ponto 3.3. Estes equipamentos encontram-se distribuídos uniformemente ao longo de toda a olaria, e o ar por eles aquecido, é encaminhado através de condutas para todas as baterias, como mostra a figura 2.5. Em geral, cada gerador fornece calor a quatro baterias.

O ar quente em cada bateria circula pela parte inferior dos moldes, através de uma estrutura metálica perfurada (espécie de grelha). De modo a evitar diferenças de aquecimento entre o primeiro e o último molde da bateria, parte deste ar é encaminhado através de uma conduta fechada, pela parte superior e que entrará no lado oposto.

No interior da olaria não existe qualquer tipo de controlo da humidade. O teor de humidade no ar varia apenas como resultado do processo de secagem. Isto significa que a quantidade de água nele contida vai aumentando progressivamente, como consequência da secagem das peças.

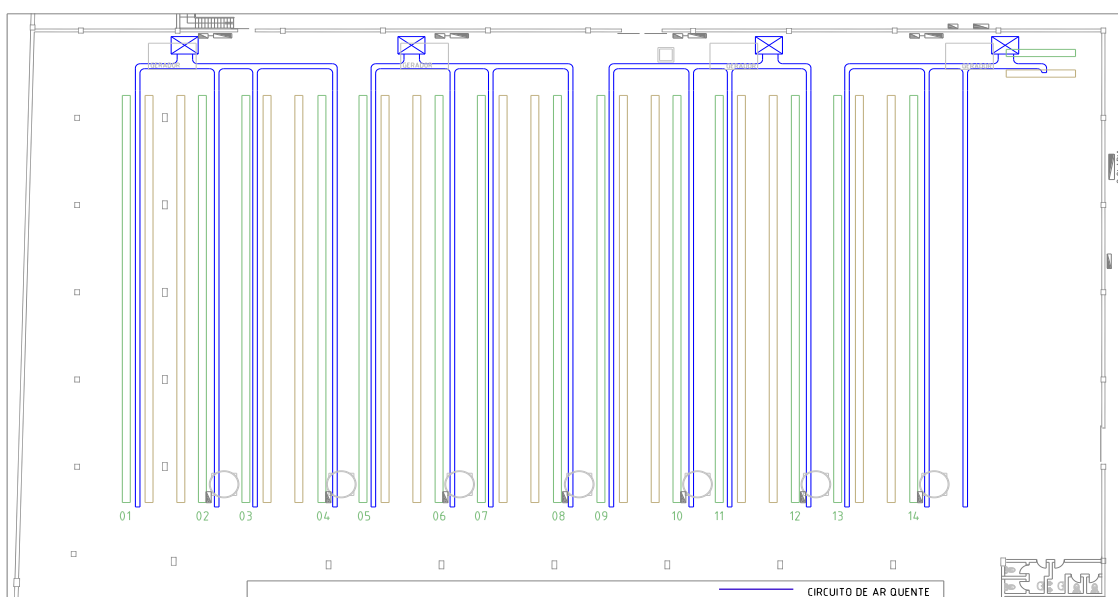


Figura 2.5- Layout da olaria 1 com respetiva energia térmica

De maneira a renovar o ar da olaria, existem ventoinhas de insuflação e extração que se encontram ao nível mais superior (no teto) e igualmente distribuídas ao longo da sua área. As ventoinhas do primeiro tipo fazem a introdução de ar novo e as restantes são responsáveis pelo encaminhamento do ar presente no interior da olaria para o exterior. O funcionamento destas ventoinhas é induzido manualmente, e é efetuado de acordo com a sensibilidade dos operadores, não existindo um tempo definido para a sua realização.

Outro aspeto importante a realçar sobre a constituição da olaria 1 é sobre a sua cobertura. A olaria não possui qualquer tipo de isolamento térmico, apresentando para além disto, uma cobertura bastante danificada, o que induz neste espaço uma grande suscetibilidade face às condições exteriores. Isto acarreta, por sua vez, consequências negativas, quer no que diz respeito aos consumos de gás, como também na possível perda de qualidade das peças, durante o processo de secagem.

Como já referido, a etapa do processo que se efetua na olaria é a conformação, e é nesta onde se dá a forma que se pretende às peças. De seguida serão apresentadas as principais etapas que a constituem:

Enchimento dos moldes

O enchimento é caracterizado pela entrada da barbotina no molde. Esta é feita de um modo convencional, através da força gravítica, uma vez que a pasta escoar de reservatórios que se encontram a um nível superior, relativamente aos moldes. Para que isto seja possível, torna-se importante que a pasta apresente características de escoamento compatíveis com a técnica de conformação, ou seja, que exiba grande plasticidade. Por ser um método de conformação convencional, este carece de pouca energia para o enchimento, mas devido aos requisitos pretendidos para a pasta, serão necessárias grandes quantidades de energia para efetuar o posterior processo de secagem.

Formação de espessura

Após injeção da pasta, esta permanece nos moldes durante algum tempo (dependendo da espessura requerida para a peça). Quanto maior o tempo de permanência, maior a espessura adquirida pela peça. Isto é conseguido devido ao material poroso que está na base de constituição dos moldes, o *plaster of paris* (gesso de paris). Este material extrai a água da barbotina através de sucção capilar formando assim uma parede com alguma dureza, na interface entre a pasta e o molde.

Remoção do excesso de pasta

Este processo é também designado por vazamento, e consiste na remoção do excesso de pasta para o exterior do molde através do seu arrastamento com ar comprimido. Esta etapa é também importante, pois o ar utilizado fará com que a pasta seja projetada contra as bordas do molde, de modo a que a peça adquira a sua forma.

Endurecimento, abertura do molde e desmoldagem

Com a contínua absorção de água pelo gesso, a barbotina vai ganhando consistência até que seja possível a sua extração do molde para as bancadas de acabamento.

Furação e acabamento

Por fim, as peças ficam em repouso na olaria, sujeitas a determinadas condições de temperatura. Esta fase, denominada por secagem verde é, sob o ponto de vista industrial, uma fase de extrema relevância e simultaneamente delicada. Nesta, ocorrem fenómenos diferentes que, em conjunto são responsáveis pelo primeiro abaixamento do teor de água nas peças cerâmicas. O objetivo desta é então reduzir o teor de água nas peças, de modo a que, elas abandonem esta unidade, com um teor de água que ronde os 13%.

Durante este período, são feitas todas as reparações necessárias, como por exemplo furos, de maneira a que a peça fique funcional. As peças permanecem no interior da olaria durante um período que varia entre três e quatro dias. No final deste período, estas são submetidas à fase de acabamento, processo este que consiste em aperfeiçoar as peças para que possam ser enviadas para as etapas seguintes.

O fornecimento de energia térmica à olaria tem vários objetivos, que em conjunto são responsáveis pelo sucesso da etapa de conformação e secagem. Estes objetivos serão resumidos de seguida:

- Promover a secagem dos moldes durante a noite, de modo a que no dia seguinte estes estejam aptos a serem utilizados numa nova etapa de conformação. Ainda nesta etapa, o calor desempenha um papel importante, pois este promove um ligeiro aquecimento dos moldes, de maneira a que durante a introdução da barbotina não haja choque térmico entre esta e o molde;
- Contribui para o aumento da velocidade de formação de espessura da pasta em contacto com o molde;
- O contínuo fornecimento de calor contribui para o posterior endurecimento da peça, de modo a que possa ser extraída do interior do molde;
- Por fim, o calor fornecido contribui para que haja a secagem verde das peças. O modo como esta é realizada coopera no aumento da qualidade, justificando a necessidade da existência de controlo quer de temperatura, quer de humidade, nas condições da olaria. Caso não exista qualquer controlo, a secagem poderá ser desigual de ponto para ponto, originando contrações descontínuas ao longo

da peça e influenciando negativamente este fator. Posteriormente, será demonstrado que esta situação se verifica nas peças da olaria em estudo.

Devido à relação direta que existe entre os mecanismos de transferência de calor e massa nos processos de secagem, torna-se imprescindível complementar este trabalho com o estudo de secagem das peças. Este estudo será apresentado no capítulo 4

Capítulo 3

Levantamento e avaliação energética da olaria 1

Neste capítulo é feito o levantamento energético da situação atual da secção da olaria. Este estudo constitui uma importante etapa na definição dos aspetos a melhorar, para a posterior elaboração de um plano de racionalização da utilização de energia.

Neste capítulo são apresentados e analisados os valores dos consumos de cada um dos recursos energéticos, eletricidade e gás natural na olaria, sendo estes comparados em simultâneo com os respetivos consumos globais da empresa.

Esta análise foi feita tendo por base dois meses (maio e junho de 2016), e como tal não pode ser tomada como referência aos outros meses do ano, pois a produção, em consequência do atual relançamento da empresa, sofre periodicamente alterações. Para além da caracterização dos consumos desta unidade, serão ainda apresentados os respetivos custos energéticos.

Por fim, será ainda apresentado o balanço energético a cada um dos quatro geradores presentes na Olaria 1.

3.1. Levantamento energético

Não é possível avaliar e atuar sobre aquilo que não se conhece. Assim, o ponto de partida foi conhecer as diferentes utilidades energéticas da empresa, usadas para suprimir as necessidades de fabrico da olaria em estudo. Após algumas visitas ao local, averiguou-se que as utilidades consumidas por esta secção eram sobretudo o gás natural, a energia elétrica e ainda ar comprimido. Apesar do ar comprimido consumido corresponder a uma parte da energia elétrica, este terá aqui uma abordagem isolada.

A inexistência de um historial de consumos de algumas destas utilidades na empresa, nomeadamente de ar comprimido e de gás natural, levou à necessidade de complementar este estudo com a realização de um levantamento energético. Este foi então o ponto de partida de todo este trabalho, e consistiu em grosso modo em efetuar (numa base diária durante os meses de estudo) todos os registos necessários, bem como medições no local. De seguida, são apresentados os consumos destas utilidades na olaria 1, bem como os respetivos procedimentos adotados na sua quantificação.

3.1.1 Energia elétrica

Na olaria 1 a energia elétrica, como pode ser observado na figura 3.1, é empregue na iluminação (quer das baterias, quer dos tetos), nas ventoinhas de circulação e ainda nas ventoinhas de extração e insuflação.

Na figura 3.1 destaca-se a cor de rosa a iluminação das baterias, a vermelho a iluminação dos tetos, e a cinzento as ventoinhas.

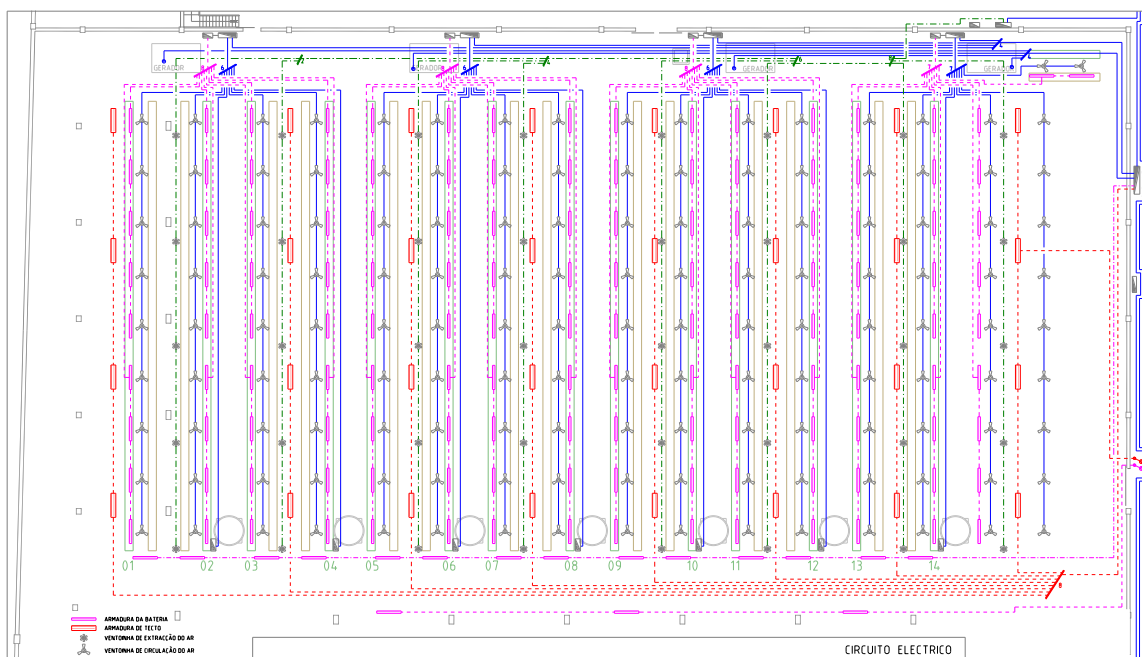


Figura 3.1- Layout t da olaria 1 com respetivo circuito elétrico

O valor do consumo mensal para esta utilidade foi de fácil obtenção, pois este é registado num contador. Foram contabilizados para os dois meses praticamente o mesmo valor de consumo mensal, que é igual a 11 200 kWh. De forma a comparar o consumo da olaria1 com o consumo global, recorreu-se à ferramenta que melhor traduz o consumo geral de uma instalação, a respetiva fatura elétrica. Na figura 3.2 apresenta-se a percentagem do consumo elétrico referente à olaria relativamente ao consumo total da empresa. Apresenta-se no anexo A.1 os resultados que estão na base da sua determinação.

Apenas uma pequena parte do consumo total de energia elétrica, 17%, é consumido pela olaria em estudo. Importa recordar que este consumo diz apenas respeito à iluminação e ventoinhas. Ainda se consome ar comprimido que faz parte desta parcela e não foi incluído. Este será apresentado no ponto seguinte.

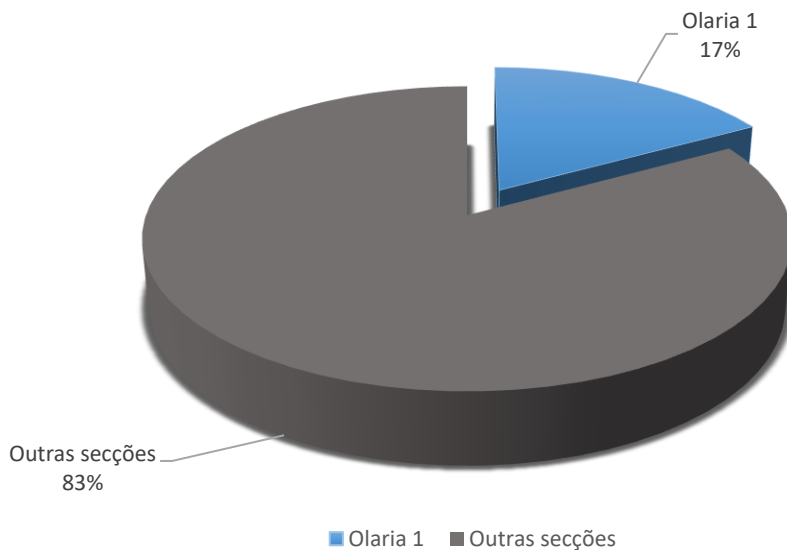


Figura 3.2-Consumo de energia elétrica na olaria 1 em relação ao consumo total faturado

3.1.2 Ar comprimido

Da energia elétrica consumida numa indústria, segundo Magueijo *et al.* (2011), cerca de 10% é utilizada para “trocar eletricidade por pressão”, ou seja, para produzir ar comprimido.

O ar comprimido adquiriu, já desde a segunda metade do século XIX, grande importância para os processos industriais, tornando-os dependentes. Esta forma de energia permanece até aos dias de hoje insubstituível, revelando ser a segunda energia mais cara de todas.

A produção de ar comprimido, em termos tecnológicos, é realizada em compressores, sendo estes equipamentos acionados através de motores elétricos. Os motores elétricos estão continuamente a rodar por razões económicas e de segurança, funcionando segundo um controlo carga/vazio. O facto de o motor estar em constante movimento não significa que o compressor permanece ininterruptamente a comprimir ar. Enquanto a pressão mínima de funcionamento não é atingida, o compressor permanece em vazio (não compressão). Pelo contrário, quando a pressão a jusante deste atinge a pressão mínima, ele entra em carga (em compressão) e isto permanecerá até que se atinja o limite de pressão máximo.

O facto de se considerar o ar atmosférico uma matéria prima disponível no meio ambiente, leva muitas pessoas a pensar que esta energia é/ou poderá ser gratuita, mas esquecem-se que os maiores custos estão associados à sua conversão. Esta

descontração faz com que esta energia seja a mais deficientemente tratada, o que vem a justificar a sua posição a nível de custos.

Tudo o que foi dito até aqui sobre esta utilidade corrobora a decisão de conceder ao ar comprimido, um tratamento especial, e separado das restantes formas de energia elétrica.

A produção de ar comprimido na *ARCH* é assegurada somente por um compressor, da marca *Atlas Copco*, que se apresenta centralizado numa unidade de produção, que alimenta a totalidade da fábrica. Atualmente, este permanece em funcionamento cerca de onze horas por dia (aproximadamente entre as 6h30 e as 17h30) sendo a respetiva variação de pressão igual a 6,5 - 7 bar. De forma a compensar flutuações de pressão na rede, existe um reservatório instalado a jusante do compressor.

A fração do consumo elétrico total, inerente à produção de ar comprimido para a empresa, está apresentada na figura 3.3. A sua determinação teve por base a média dos resultados medidos nos dois meses de estudo. Esta encontra-se demonstrada no anexo A.2.1.

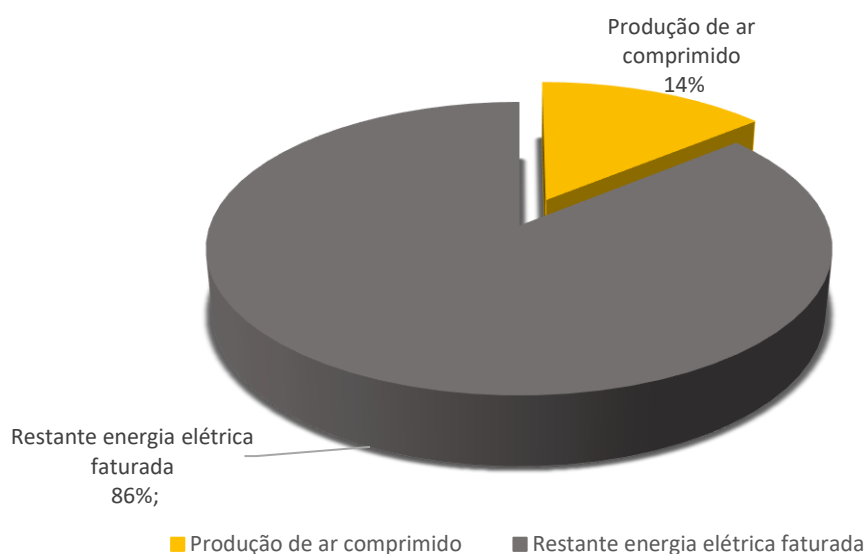


Figura 3.3- Comparação entre o consumo médio de energia utilizada na produção de ar comprimido e a energia elétrica total faturada(média) para os meses de maio e junho

Como sugerido por Magueijo *et al.* (2011), o consumo de energia elétrica referente à produção de ar comprimido representa cerca de 14% da energia elétrica industrial global, valor este que está ligeiramente acima da média.

O ar comprimido é uma utilidade muito importante e até mesmo insubstituível para a empresa, uma vez que este tem interferência direta nas várias secções ao longo do

processo produtivo, como pode ser comprovado através da figura 3.4. Nesta figura, está representado o circuito de ar comprimido na olaria em estudo.

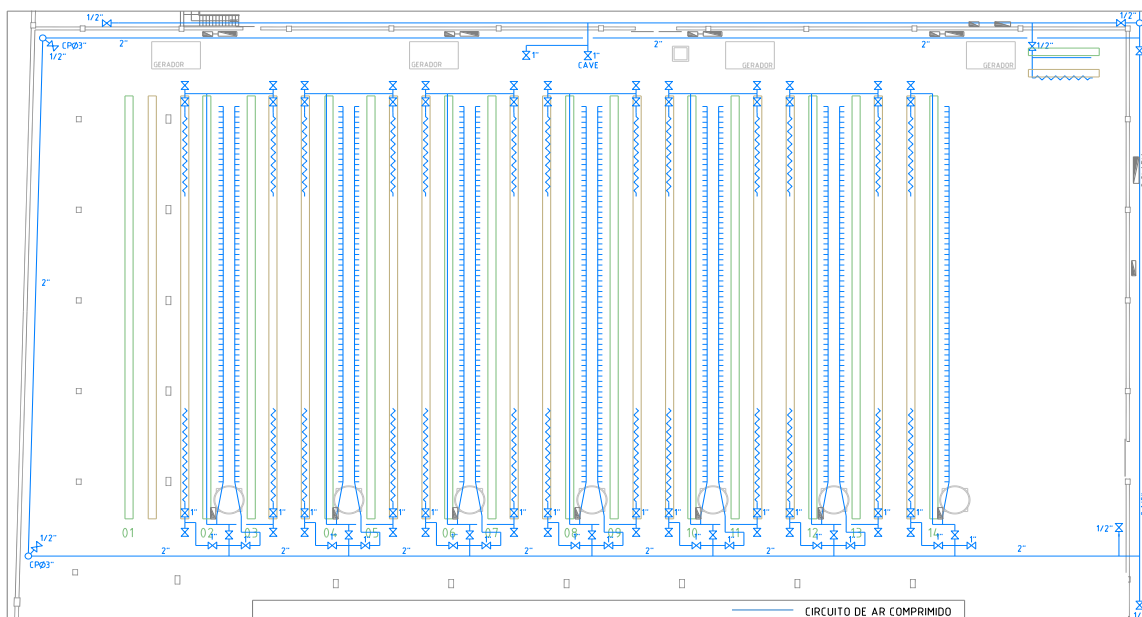


Figura 3.4-Layout da Olaria 1 com respetivo circuito de ar comprimido

Nesta secção, esta utilidade é empregue por quase todas as baterias de enchimento (representado a tracejado contínuo azul apresentado na figura 3.4), e tem como objetivo efetuar os vazamentos das peças. Esta utilidade, ainda é aplicada em diversos pontos, nas pistolas de ar (tracejado azul descontínuo ao longo das bancadas de acabamento apresentado na figura 3.4), com a função de auxiliar a desmoldagem e também na limpeza dos moldes.

Tendo como objetivo a determinação dos consumos de ar comprimido apenas pela olaria 1, e devido à inexistência de contadores, várias análises tiveram de ser feitas neste sentido.

Posto isto, e tendo a informação de que os maiores consumos referentes a esta utilidade se verificam no período dos vazamentos das peças, ou seja, numa parte da manhã, então o procedimento adotado, consistiu em registar o tempo para o qual o compressor está a comprimir, ou seja, o tempo de carga durante esse mesmo período. Sabendo isto e tendo a informação de que a capacidade do compressor ronda os $8 \text{ m}^3\text{min}^{-1}$ (nas condições PTN), então facilmente se determinou o consumo de ar comprimido durante esse período. Este seria o consumo de ar comprimido pela olaria 1, se mais nenhum utilizador usufrísse desta utilidade em simultâneo. Mas a verdade é que, durante este período, existem também vazamentos na olaria 2 e na olaria 2.2 e ainda grande parte deste consumo é utilizado também pelas pistolas pressurizadas nas cabines de

vidragem. À partida seria um problema difícil de resolver, mas com algum trabalho conseguiu-se facilmente desagregar este consumo pelas diferentes secções. Para tal, o que se fez em primeiro lugar foi procurar saber o consumo de ar comprimido pelas pistolas na vidragem. Este valor foi adquirido, como sendo em média igual a 30,5 m.³h⁻¹. Tomando este valor como ponto de partida, determinou-se então, para cada vidrador, o tempo necessário para vidrar cada tipo de peça respeitante obviamente ao período de tempo referido. Posteriormente, sabendo o número de peças vidradas de cada tipo nesse período, facilmente se determinou também o consumo total de ar comprimido para esta secção. Deduzindo este valor ao consumo total, obtém-se o consumo referente às 3 Olarias. A partir daqui, e no sentido de desagregar o mais corretamente possível este consumo pelas três olarias, o que se fez foi calcular o consumo específico de ar comprimido. Para tal, foi necessário saber o número de peças vazadas durante aquele momento por cada uma das secções. É evidente que este resultado será um valor médio, pois nem todas as peças necessitam quer do mesmo tempo, quer da mesma quantidade de ar comprimido para efetuar o respetivo vazamento.

Por fim, partindo deste consumo específico e sabendo o número de peças vazadas na olaria 1, facilmente se determinou o consumo total mensal para esta secção.

Análise das fugas de ar comprimido

O procedimento referido anteriormente para estimar o consumo de ar comprimido é válido para um sistema onde todo o ar comprimido produzido é consumido, não tendo em conta a existência de fugas. Mas, na verdade estas existem sempre num sistema de ar comprimido. Na prática é impossível ter-se um sistema totalmente isolado, sendo que as fugas de ar comprimido representam em média cerca de 20% do total de ar comprimido produzido (Magueijo *et al.* 2011).

É pertinente destacar que a sua determinação é muito importante para a empresa, pois não existe perceção desta parcela no total faturado. Uma vez que as fugas “consomem” ar comprimido ininterruptamente, isto fará com que a empresa esteja a pagar mensalmente uma fração que corresponde à conversão de energia que não irá usufruir.

Para ter uma ideia dos consumos que as fugas detêm, apresentam-se em seguida dois exemplos simples que são comparados com exemplos familiares, que ajudarão a perceber a realidade: a potência requerida para sustentar uma fuga de ar à pressão de 6 bar, através de um orifício com apenas 1 mm, ao fim de uma hora é de cerca de 0,3 kW, sendo este valor equivalente a ter 5 lâmpadas, de 60 W cada, em funcionamento durante o mesmo período. O mesmo se passa, por exemplo, para uma fuga nas mesmas condições, mas através de um orifício com 3mm, onde ao fim de uma hora,

esta necessita de 3,1 kW, sendo este consumo superior quando comparado com o consumo de uma vulgar máquina de lavar roupa (Novais, 1995).

Posto isto, e devido à sua importância, foi então avaliado o estado da rede de ar comprimido da fábrica. Para isso, realizou-se um simples teste, que consistiu basicamente em determinar o intervalo de tempo em que o compressor esteve em carga, durante um determinado período de análise, sem que houvesse consumo de ar.

Esta análise foi realizada diariamente, durante a hora do almoço (para garantir que não existiam consumos de ar pelos utilizadores). Se não existissem perdas, o que é impossível para um sistema deste tipo, o compressor durante a hora do almoço permanecia em vazio, pois a pressão da rede nunca baixaria, devido à ausência de consumo. Mas isto não se verifica.

Com o tempo de carga definido, e sabendo a capacidade do compressor, foi facilmente calculado, através da equação 3.1, o caudal de ar comprimido necessário para suprimir as fugas durante o período de teste.

$$\dot{v}_F = \dot{v}_{CC} \times \frac{t_{carga}}{t_{total}} \quad (3.1)$$

Onde \dot{v}_F ($\text{m}^3\text{min}^{-1}$) representa o caudal de fugas, \dot{v}_{CC} ($\text{m}^3\text{min}^{-1}$) a capacidade do compressor, t_{carga} e t_{total} (min) o tempo de carga e o tempo total, respetivamente.

Tendo o caudal de fugas, e sabendo que estas existem sempre enquanto o sistema está em sobressão, então considerou-se o tempo total das fugas igual ao tempo de funcionamento do compressor para o mês em questão. Partindo desta consideração, calculou-se, através da equação 3.2, o volume de ar comprimido produzido e desperdiçado nas fugas.

$$V_F = \dot{v}_F \times t_{total\ mensal} \quad (3.2)$$

Onde V_F (m^3) e $t_{total\ mensal}$ (min) correspondem respetivamente ao volume de ar comprimido gasto nas fugas e ao tempo total mensal.

Por fim, através da razão entre este consumo de ar devido às fugas e a quantidade total de ar comprimido, foi possível estimar o valor percentual das fugas através da equação 3.3.

$$\% \text{ Fugas} = \frac{V_F}{V_{produzido}} \quad (3.3)$$

Onde $V_{produzido}$ (m^3) é o volume total de ar comprimido produzido no mês correspondente.

Como já evidenciado, o ar comprimido produzido não é todo utilizado, pois existem sempre fugas. Deste modo, apenas uma parte do ar produzido será efetivamente consumido.

Na figura 3.5, são apresentadas as frações correspondentes ao consumo efetivo e ao consumo de ar devido às fugas. Esta determinação foi baseada nos resultados médios para os meses de maio e junho e encontra-se demonstrada no anexo A.2.1.

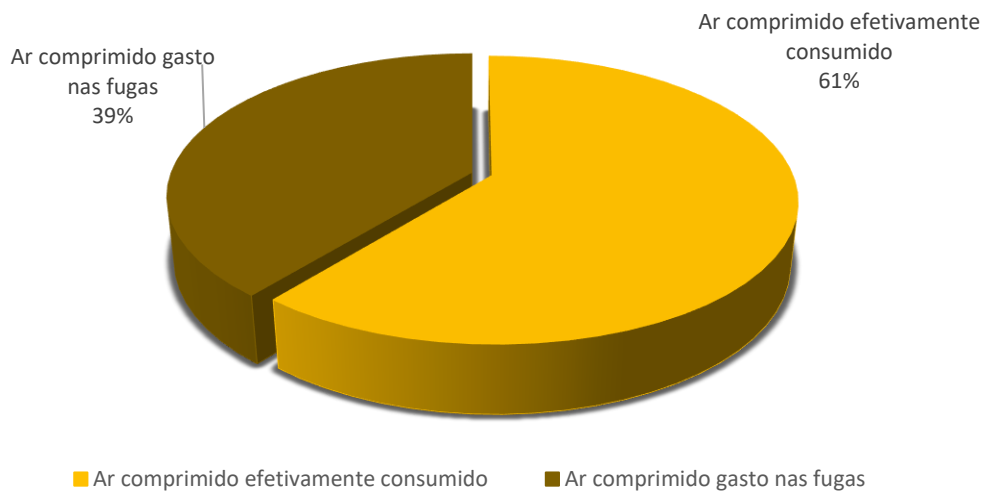


Figura 3.5- Percentagem de fugas de ar comprimido na instalação

Do total produzido, aproximadamente 40% do ar comprimido é usado para sustentar as fugas existentes na fábrica. Este valor representa uma grande fatia, relativamente ao total, sendo este bastante superior ao valor de referência enunciado por Magueijo *et al.* (2011). O custo médio mensal associado à produção do ar comprimido que é perdido nas fugas é de aproximadamente 750 €, sendo este valor bastante elevado. Como tal, e mesmo não estando objetivado neste trabalho, serão apresentadas algumas medidas, que poderão ser adotadas pela empresa, no sentido de minimizar este consumo.

Foram previstos os consumos desta utilidade para a secção da Olaria 1 e conjuntamente foram obtidos também os consumos para as restantes secções. Estes resultados apresentam-se na figura 3.6 e encontram-se demonstrados no anexo A.2.2. Importa

ainda salientar que esta desagregação teve como base os consumos referentes à parte da manhã e apenas durante o período de vazamento.

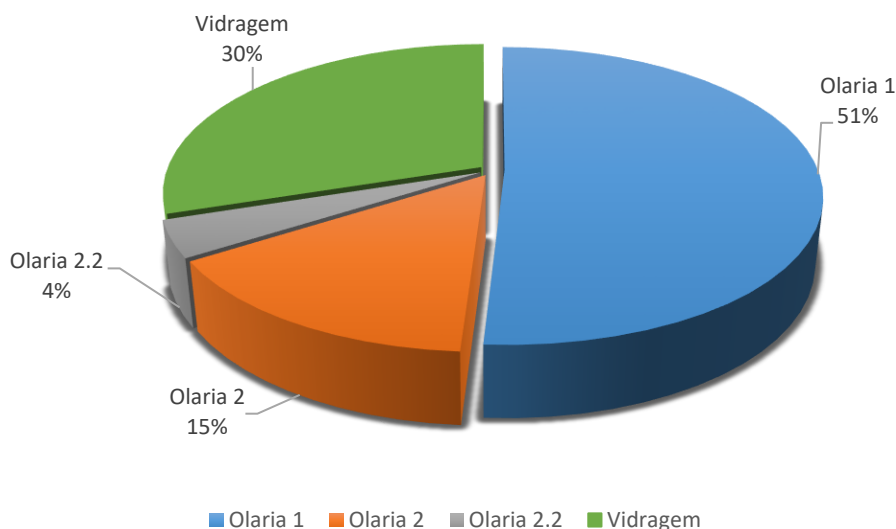


Figura 3.6- Repartição média do consumo mensal efetivo de ar comprimido pelas diversas secções

A olaria 1, de todas as secções, é aquela que mais consome ar comprimido. Em termos de volume de ar, a olaria gastou cerca de 1 510 m³ e 2 144 m³ respetivamente, para os meses de maio e junho.

3.1.3 Gás Natural

Esta utilidade, como se pode constatar na figura 3.7 (a laranja), é empregue na olaria, sobretudo pelos geradores de calor. Estes equipamentos, como já foi referido, têm a função de proporcionar determinadas condições à olaria, que permitam a secagem diurna das peças e a secagem noturna dos moldes.

De maneira a prever os consumos de gás natural na olaria 1, foram colocadas umas folhas de registo em cada um dos geradores, onde diariamente se registavam as contagens de cada contador do gás. Estes registos foram efetuados na parte da manhã e no final do dia, e no caso do gerador 2 e 3 foram ainda registados os consumos no momento de alteração do valor de *setpoint* do seu funcionamento.

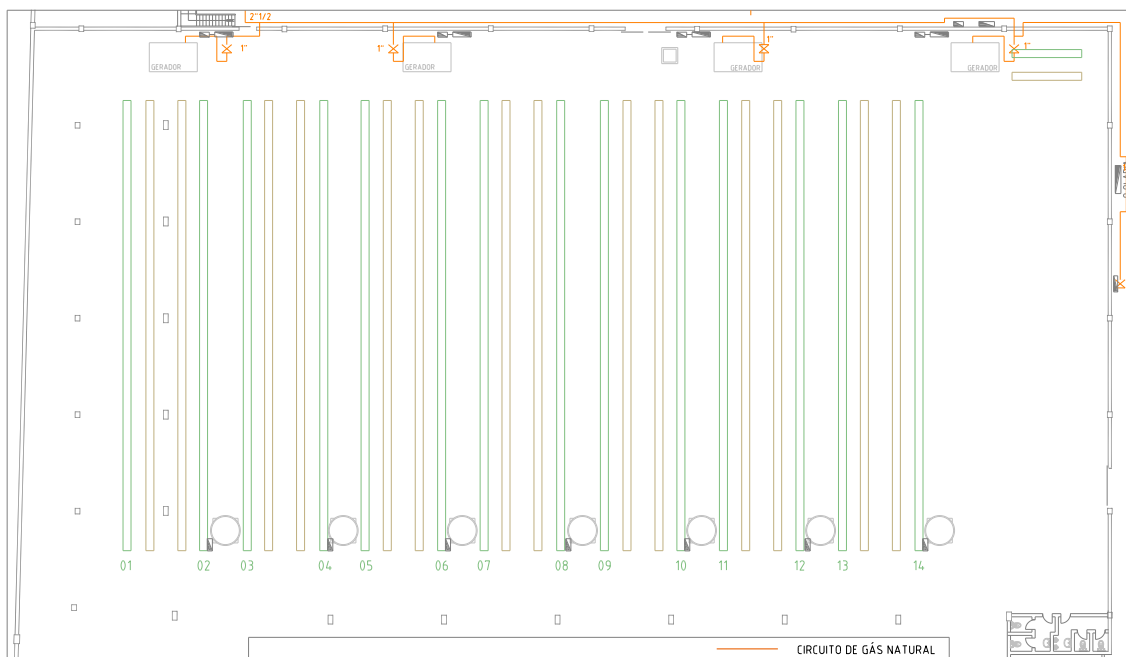


Figura 3.7- Layout da olaria 1 com respetivo circuito de Gás Natural

De maneira a poder comparar também o consumo desta utilidade com o consumo total na empresa, foram analisadas as faturas referentes a esta utilidade, para os meses em estudo. Na figura 3.8 encontra-se ilustrado o peso que o consumo de gás natural na olaria 1 apresenta, relativamente ao consumo desta utilidade total faturada. Os resultados que estão na base desta determinação apresentam-se no anexo A.3.

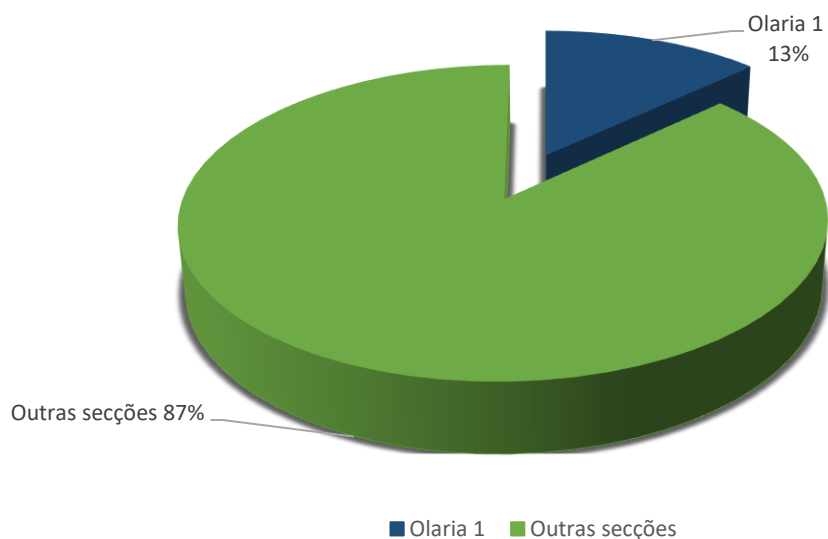


Figura 3.8- Consumo de gás natural na olaria 1 em relação ao consumo total

Apenas uma pequena parte do consumo médio global de gás natural deve-se ao funcionamento dos geradores instalados na olaria 1 (13%). O consumo médio mensal desta utilidade é igual a 3 165€.

3.2 Consumos e custos específicos

De forma a que se possam comparar os consumos das diferentes utilidades na Olaria 1, foram convertidos os respetivos consumos em tep's, recorrendo aos fatores de conversão que se encontram definidos no Despacho nº17 313/2008 com base nos dados constantes do anexo II da Diretiva 2006/3/CE. Na figura 3.9, apresenta-se um resumo geral dos consumos energéticos na olaria 1.

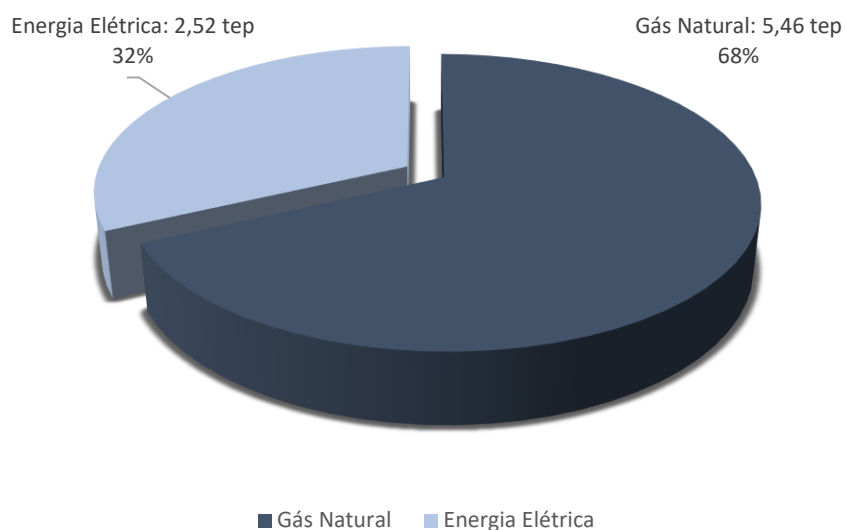


Figura 3.9- Consumo médio, em tep das diferentes utilidades na olaria1 para os dois meses de análise. A utilidade que mais se consome na olaria 1 é o gás natural. Em média, são consumidos mensalmente cerca de 6 032 m³ e 1 1722 Kwh de gás natural e energia elétrica respetivamente. A figura 3.10 apresenta a repartição da energia elétrica pelas diversas formas de energia (ar comprimido e a restante energia elétrica).

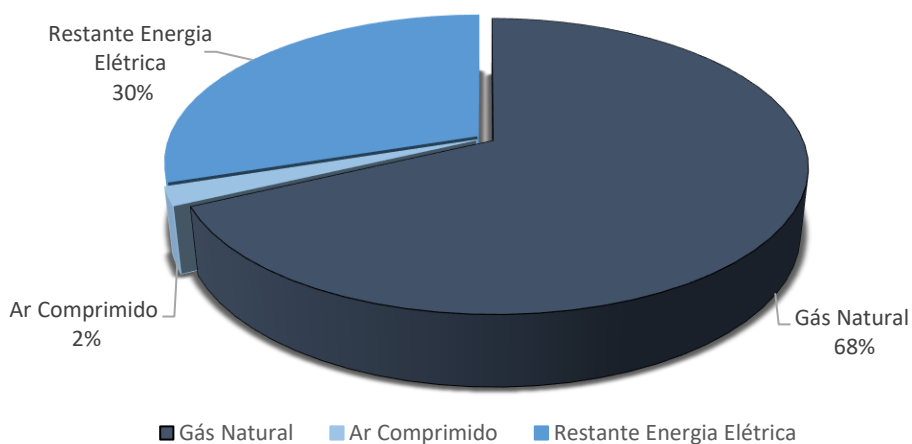


Figura 3.10- Consumo médio, em tep, das diferentes formas de energia na olaria1 para os dois meses de análise

Do total da energia elétrica consumida na olaria, a maior parte do consumo, 96%, deve-se à iluminação e à ventilação, e uma pequena parte, cerca de 4% ,diz respeito aos consumos de ar comprimido.

Os consumos e os custos específicos de energia são bons indicadores que ajudam a prever a quantidade de energia necessária para processar uma unidade de produto.

Neste caso concreto, estes indicadores refletirão apenas a energia envolvida numa parte do processo, ou seja, na olaria 1.

Para a sua determinação teve-se em conta que por mês, em média, se produzem cerca de 2 600 peças na olaria em estudo. Na tabela 3.1, serão apresentados estes resultados discriminados por tipo de energia.

Os resultados indicados na tabela, referentes ao consumo de ar comprimido e de gás natural, apresentam-se em condições de pressão e temperatura normal (PTN). Todos eles são resultados médios obtidos para os dois meses de estudo.

Tabela 3.1-Resultados obtidos para os consumos e custos específicos de cada utilidade envolvidos na Olaria 1

Utilidade Descrição	Energia Elétrica		Gás Natural
	Ar Comprimido total	Restante Energia Elétrica	
Consumo específico	0,70 m ³ /peça	4,31 kWh/peça	2,32 m ³ /peça
Custo específico (€/peça)	0,042	0,89	1,22
Custo da energia (€/mês)	108€	2 318€	3 165€

O custo energético associado à etapa de conformação, para a produção de uma unidade produto, corresponde a cerca de 2,15€. Este valor é acrescido em 0,30€ e passa a 2,45€, como resultado da adição do custo associado às fugas de ar comprimido na empresa.

Pelo facto de apresentarem uma contribuição bastante significativa nos custos energéticos, os utilizadores de gás natural (geradores de calor) terão neste trabalho um tratamento especial. Deste modo, irá ser aprofundado o respetivo funcionamento e serão efetuados os balanços energéticos a cada um dos geradores, com vista a encontrar medidas ou ações que possam ser adotadas de maneira a reduzir estes custos.

3.3 Geradores de calor

Neste ponto será feita uma descrição do funcionamento dos equipamentos responsáveis pelos consumos de gás natural, os geradores de calor. Tal como o nome indica, estes aparelhos têm como objetivo gerar ar quente que proporcionará determinadas condições à olaria. Na figura 3.11, encontra-se uma representação tipo de um gerador de calor, com respetivo circuito de ar de aquecimento, que ajudará a perceber melhor o funcionamento destes equipamentos.

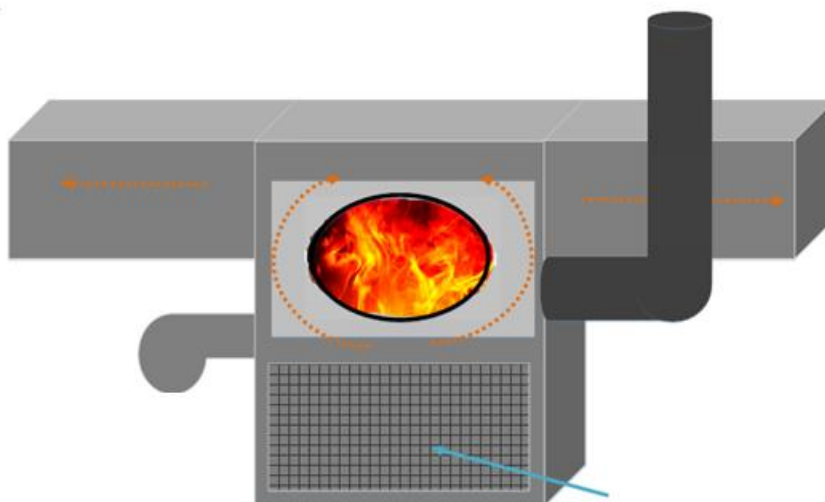


Figura 3.11- Ilustração de um gerador de calor com respetivo circuito de ar de aquecimento

O ar, representado com seta azul na figura 3.11, é captado da olaria através de ventiladores e passa através de uma rede. Este ar atravessa um permutador (zona a cinzento claro), onde recebe o calor proveniente da combustão do gás natural. O ar é aquecido e enviado para condutas (seta a cor laranja), onde será distribuído por todas as baterias dispostas ao longo de toda a olaria.

Relativamente à combustão, como já foi referido, esta tem lugar dentro de uma câmara, designada por câmara de combustão (delimitada pela linha a preto). A combustão inicia-se no queimador, dispositivo representado a cinzento no lado esquerdo da figura 3.11. No queimador introduz-se o comburente, ar, que é admitido também por um ventilador e introduz-se o combustível, o gás natural. Os gases de exaustão são encaminhados pela chaminé (representada a preto) e são expelidos para o exterior da olaria.

A olaria 1 é constituída por quatro equipamentos deste tipo, sendo que dois deles (1 e 4) apresentam o mesmo funcionamento quer durante o dia, quer durante a noite e os restantes (2 e 3) têm incorporados dois modos de operação. Durante a noite o respetivo valor de *setpoint* está definido para alcançar temperaturas mais elevadas (para secagem

dos moldes) e durante o dia este alcança temperaturas mais baixas. No período de estudo, os valores de *setpoint* de cada gerador rondavam os 55°C, 50°C, 40°C, 50°C, 40°C, e 45°C respetivamente para o gerador 1, 2 durante a noite, 2 durante o dia, 3 durante a noite, 3 durante o dia e 4.

Basicamente, o princípio de funcionamento destes equipamentos é baseado em ciclos de liga-desliga, comandados pelos valores de *setpoint* de temperatura, referidos anteriormente. Enquanto a temperatura do ar aquecido estiver abaixo do valor de referência, o gerador mantém-se ligado. Quando esse valor for atingido, ele desliga-se e permanecerá desse modo até que a temperatura do ar à saída atinja novamente esse valor. É importante referir que a sonda controladora da temperatura está colocada no próprio gerador, num ponto que fica imediatamente a seguir à saída do ar aquecido no permutador.

Todos os geradores são ligados diariamente pelas 24h e desligados, em geral, no final da laboração, perto das 16h. Ao fim de semana estes permanecem inativos, sendo apenas ligados, por volta das 20h de domingo.

No sentido de otimizar este tipo de equipamento, torna-se imprescindível avaliar energeticamente o modo como a energia do gás natural está a ser aproveitada para efetuar o aquecimento do ar.

3.3.1 Balanço de energia aos geradores de calor

Na realização do balanço energético, teve-se em consideração todas as correntes de entrada e saída, como esquematizado na figura 3.12.

O balanço de energia para um sistema aberto em estado estacionário onde não existe trabalho pode ser escrito através da equação 3.4.

$$q = \sum H_s - \sum H_e \quad (3.4)$$

Substituindo todos os termos de entrada e saída no sistema, o balanço fica:

$$q = H_{ArQ} + H_{GasesExhaust.} + \Delta H_0^{298} \text{ reação} - (H_{GN} + H_{ArF} + H_{Ar.Comb.}) \quad (3.5)$$

Esta expressão aplica o princípio da conservação de energia, estabelecido pela primeira lei da termodinâmica, que demonstra que a energia contida em cada corrente de entrada, juntamente com a energia libertada durante a reação de combustão, é utilizada no aquecimento da corrente de ar frio e dos gases de combustão, sendo ainda parte dessa energia dissipada (as perdas).

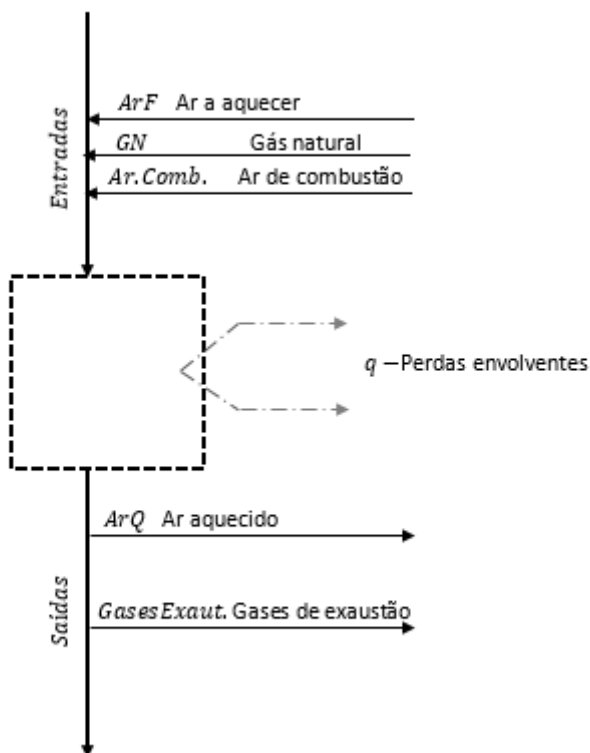


Figura 3.12- Identificação das correntes consideradas no balanço energético

Considerando ainda que $H_{Ar.Aquec.} = H_{ArQ} - H_{ArF}$, a equação 3.5 fica:

$$q = H_{Ar.Aquec.} + H_{GasesExaust.} + \Delta H_0^{298} \text{ reação} - (H_{GN} + H_{Ar.Comb.}) \quad (3.6)$$

Esta será a expressão empregue na determinação das perdas energéticas para cada gerador de calor.

Um parâmetro importante a definir num balanço de energia é a temperatura de referência, pois é em relação a ela que serão calculadas todas as parcelas de energia. Assim, foi assumida como temperatura de referência, a temperatura de 25°C.

A expressão geral para o cálculo da entalpia associada a uma corrente, onde apenas existe envolvido calor sensível, pode ser representada pela equação 3.7.

$$H_n = \dot{m}_n \times cp_n \times (T_n - T_{ref}) \quad (3.7)$$

Onde \dot{m}_n , cp_n e T_n correspondem respetivamente ao caudal mássico, calor específico e temperatura da corrente a determinar. Para a construção do balanço energético foi necessário determinar estes parâmetros, sendo estes resultados de diversas medições.

A entalpia da reação de combustão, corresponde à energia libertada durante a queima do gás natural, equação 3.8. Para a sua determinação, é necessário conhecer o caudal volumétrico do gás natural (v_{GN}), assim como o respetivo poder calorífico inferior (PCI).

$$\Delta H_0^{298} \text{ reação} = v_{GN} \times \text{PCI} \quad (3.8)$$

3.3.2 Perdas associadas aos geradores de calor

Neste ponto são demonstrados os resultados obtidos para as perdas em cada gerador de calor. Estas perdas correspondem à energia perdida sob a forma de calor e que não é aproveitada para aquecimento do ar. Os resultados obtidos para as perdas de cada gerador de calor estão apresentados na tabela 3.2. No anexo B está apresentado o exemplo de cálculo que levou à sua determinação.

Tabela 3.2- Perdas associadas a cada gerador de calor

Nº Gerador	Gerador 1	Gerador 2 Noite	Gerador 2 Dia	Gerador 3 Noite	Gerador 3 Dia	Gerador 4
Perdas q (kW)	141	274	316	144	213	144

Constata-se que o valor obtido para as perdas é muito semelhante em todos os geradores sendo que, o gerador número 2 é o que apresenta perdas relativamente superiores quando comparadas com as dos restantes.

Outra fase deste trabalho, consiste em avaliar o comportamento térmico da olaria 1

Para isso, foram determinadas, as perdas térmicas associadas à envolvente exterior $q_{ext.}$ (W). Estas foram estimadas apenas para a cobertura (o teto), uma vez que, devido ao estado de degradação, é neste onde se concentram as maiores perdas energéticas. Como tal, foram desprezadas as perdas ocorridas pelas aberturas das portas, pelas paredes, e as perdas ocorridas devido à renovação do ar.

Foram consideradas como perdas térmicas, as perdas por convecção e radiação a partir do teto para o exterior. Assim, as perdas térmicas, são expressas de acordo com a equação 3.9.

$$q_{ext.} = h_{ext.}(T_{sup.} - T_{ext.}) A + \varepsilon \sigma A(T_{sup.}^4 - T_{ext.}^4) \quad (3.9)$$

Onde ε representa a emissividade que é característica do material de que são constituídas as telhas, $T_{sup.}$ e $T_{ext.}$ (K) dizem respeito às temperaturas da superfície superior e do exterior respetivamente, A (m²) refere-se à área de cobertura da olaria 1, σ corresponde à constante de *Stefan Boltzmann* ($\sigma=5,67 \times 10^{-8}$ m².K⁻⁴) e $h_{ext.}$ (W.m⁻².K

1) representa o coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção. Este último, foi estimado a partir do número de *Nusselt* (Nu) para o caso de convecção natural em placas horizontais através da equação 3.10.

$$Nu = \frac{hL}{k} = a \left[\left(\frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \right) \frac{c_p \mu}{k} \right]^b = a(GrPr)^b \quad (3.10)$$

Em que $L(m)$ representa a dimensão característica do teto da olaria 1, $\beta (K^{-1})$ é o coeficiente de expansão volumétrica do ar, $\Delta T (K)$ é a diferença positiva de temperaturas entre o ar exterior e o teto, Gr e Pr correspondem respetivamente ao número de *Grashof* e *Prandtl*, $k(W.m^{-1}.K^{-1})$, $\rho(kg.m^{-3})$, $\mu(Pa.s)$ e $c_p(kJ.kg^{-1}.K^{-1})$ correspondem respetivamente à condutividade térmica, densidade, viscosidade e capacidade calorífica do ar, avaliadas à temperatura média. Os valores referentes a a e b , são valores constantes que dependem do valor obtido para $GrPr$.

Capítulo 4

A secagem de peças sanitárias

A secagem cerâmica revela ser muito mais complicada do que a secagem de muitos outros objetos, dado que as peças cerâmicas exibem encolhimento durante esta operação.

Este encolhimento, por sua vez, pode levar à criação de rachas ou outros defeitos, que conduzem à perda da qualidade dos respectivos produtos, e conseqüentemente à difícil aceitabilidade dos mesmos no mercado. Esta situação é bastante prejudicial para as empresas do ramo da cerâmica, uma vez que acarreta elevados custos com os produtos defeituosos, limitando assim a sua competitividade.

Torna-se por estas razões, objeto de estudo, a definição das condições ótimas de secagem a implementar na olaria, em termos de humidade e tempo de permanência das peças, para que se possam obter louças cerâmicas com excelente qualidade, a uma velocidade requerida pelo processo produtivo global e com custos aceitáveis para o produtor.

De entre as operações unitárias empregues na indústria cerâmica, o processo de secagem é o que mais se utiliza, sendo este o mais problemático e também o mais intensivo, no que diz respeito aos consumos energéticos.

A secagem das peças cerâmicas tem como objetivo a eliminação de água¹, que foi previamente necessária na obtenção de uma pasta plástica, durante a etapa de conformação. De uma maneira geral, o seu princípio baseia-se na utilização de uma fonte energética térmica que promove a evaporação da água contida nas peças cerâmicas. A energia térmica necessária para promover esta mudança de estado da água, sem que haja alteração de temperatura, é designada por calor latente de vaporização. É importante referir que a temperatura não é a única força motriz que potencializa o processo de secagem. É evidente que para satisfazer as condições necessárias à evaporação deverá ser fornecida energia, mas as condições psicrométricas do ar, ou seja, a sua humidade relativa e a taxa de renovação, são também variáveis essenciais num processo de secagem. Enquanto a pressão de vapor sobre a superfície do sólido for superior à pressão parcial do vapor na atmosfera, haverá

¹ O termo "água" será usado como conveniência pois trata-se do líquido envolvido neste estudo. No entanto, esta discussão também é válida para outros líquidos.

tendência para a água se evaporar. Quando estes dois valores se igualam, é dito que a atmosfera envolvente e o sólido entraram em equilíbrio, e o processo de secagem cessa.

Devido aos custos excessivos que esta operação possui, sempre que possível, recorre-se inicialmente a métodos mecânicos para retirar a água superficial dos sólidos húmidos. Estes métodos têm como vantagem o facto de consumirem bastante menos energia do que por via térmica. Logo após os métodos mecânicos, o tratamento prossegue com a secagem térmica, que permite remover o restante líquido.

Os primeiros estudos efetuados para prever as modificações existentes nos materiais cerâmicos, quando submetidos ao processo de secagem, foram realizados por *Bourry* em 1897. O modelo que propôs considera que o processo de secagem pode ser dividido em duas etapas: secagem com taxa de evaporação constante e secagem a taxa decrescente, sendo que esta última, pode ainda ser dividida em dois períodos. Nos seus estudos verificou também que as variações de volume ocorridas não são uniformes e que são função de cada etapa. Quando a taxa de evaporação é constante, a redução de volume do sólido é proporcional à perda de massa de água. Já na segunda etapa, a redução de volume é feita de modo gradual e mais lentamente do que a primeira. Por último, a terceira etapa inicia-se quando a retração do corpo cessa, e termina aquando da secagem completa (Ferreira, 1992).

Os defeitos formados nas peças, em consequência do processo de secagem, podem ir desde a redução das propriedades físicas até à sua fissuração ou até mesmo, em caso mais catastrófico, ao colapso da peça produzida.

Segundo *Kowalski et al*, (2010), *Brosnan e Robinson* (2003) a principal razão para o aparecimento dos defeitos nos corpos cerâmicos está relacionada com a existência de tensões diferenciadas que surgem durante o encolhimento excessivo dos corpos a secar. Estas tensões são criadas porque não existe uniformidade de humidade e/ou da distribuição da temperatura no sólido. Quanto maior for o grau de não uniformidade, maior a suscetibilidade para a criação destas tensões, e maior é a probabilidade de formar defeitos nas peças produzidas. Segundo o mesmo autor, a não uniformidade, durante a secagem completa de um dado material, é mais prejudicial no período de secagem constante e início do primeiro período de taxa de secagem decrescente (pois é nestes períodos que as contrações são mais significativas)

O encolhimento dos corpos cerâmicos em verde geralmente varia entre 2-4% (encolhimento linear), tornando-se um requisito essencial para a secagem, a sua realização, por forma a minimizar o valor do encolhimento.

O grau de encolhimento, ou a formação das tensões nos corpos, dependem das propriedades do material (humidade inicial, percentagem de argila, e geometria do produto) e dos parâmetros do ar de secagem (temperatura, velocidade e humidade), tendo este trabalho apenas incidido no estudo da influência das condições do ar de secagem.

Assim sendo, impor taxas de secagem baixas (velocidade de secagem lenta), através de humidades altas e temperatura e velocidade do ar baixas, torna-se uma solução atrativa, pois permite um encolhimento baixo e uniforme por toda a peça, impedindo a formação de tensões. Uma consequência negativa que surge no facto de retardar a velocidade de secagem é no aumento do tempo de operação. Este aumento do tempo torna o processo de secagem economicamente pouco rentável, uma vez que leva a custos energéticos mais elevados e a baixa eficiência do processo global. Por outro lado, secagem em condições severas (humidades baixas e temperaturas e velocidades do ar altas) requer pouco tempo, mas origina gradientes acentuados de concentração de água entre o interior e o exterior das peças, originando grandes encolhimentos diferenciados ao longo da peça, o que as torna mais suscetíveis a defeitos (Kowalski *et al*, 2010 e Brosnan e Robinson, 2003).

É neste seguimento que os engenheiros, procuram solucionar este problema, estudando métodos de secagem eficazes, de maneira a que se consigam taxas de secagem altas, evitando a formação de tensões no interior dos produtos (e caso se formem, que sejam de baixa intensidade), de modo a que produzam produtos isentos de defeitos. Juntamente a estas duas questões, tem-se ainda procurado aliar ao processo de secagem o baixo consumo energético.

Assim, neste trabalho serão estudadas as condições atmosféricas (temperatura, humidade e velocidade do ar) a implementar na olaria 1, de maneira a que se concretize o processo de secagem, cumprindo todos os requisitos referidos.

4.1 Noções gerais sobre a secagem de sólidos

Para que se possa avaliar o processo de secagem é necessário fazer um estudo prévio deste processo, tendo em atenção aos vários fatores que o influenciam, desde as características dos sólidos até às propriedades do meio envolvente onde a secagem se processa.

4.1.1. Alguns conceitos importantes

Humidade de um sólido

A quantidade de água no interior de um sólido pode apresentar uma distribuição muito irregular, pelo que a sua concentração costuma ser medida pelo teor médio de humidade. A humidade média de um sólido (X) pode ser apresentada em duas formas distintas: base húmida, equação 4.1 ou base, seca, equação 4.2.

$$X_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_{se}} = \frac{m_{total} - m_{se}}{m_{total}} \quad (4.1)$$

$$X_{bse} = \frac{m_w}{m_{se}} = \frac{m_{total} - m_{se}}{m_{se}} \quad (4.2)$$

Em que m_{se} é a massa de sólido seco, m_w é a massa de água nele contida e m_t a massa total. Ao longo deste trabalho, a humidade apresenta-se sempre em base seca, salvo indicação em contrário.

Humidade de equilíbrio e humidade crítica

Quando um sólido húmido é colocado em contacto com ar a determinadas condições de temperatura, humidade e pressão, que permanecem constantes ao longo do ensaio, a água contida à sua superfície começa a evaporar. Com o prosseguir deste processo, a água proveniente do interior do sólido torna-se insuficiente para substituir a água, e a partir deste momento a superfície do sólido passa a apresentar zonas húmidas e secas. No ponto onde ocorre esta transição, atinge-se a humidade crítica X_C .

Ao fim de um período de tempo, com a continuação do processo, é atingido um equilíbrio entre o ar e o sólido e diz-se que foi atingida a humidade de equilíbrio (X_{eq}). Neste ponto a humidade no sólido mantém-se constante (a menos que se modifiquem as condições de operação) pois a pressão de vapor à superfície do sólido iguala à pressão de vapor da atmosfera envolvente e a secagem termina (Melo, 1979; Brosnan e Robinson, 2003).

4.1.2 Classificação dos materiais

Sob o ponto de vista da secagem, e tendo em conta a sua estrutura interna, os sólidos podem ser divididos em dois grandes grupos: materiais porosos e coloidais. Por sua vez, os materiais porosos, podem ser ainda subdivididos em não higroscópicos (ou porosos- capilares) e higroscópicos. Muitos sólidos podem estar inseridos no extremo destas classificações, mas geralmente considera-se apenas o grupo a que mais se assemelham (Melo, 1979; Perry e Green, 1998; Mujumdar, 1980).

Materiais Porosos

Na fase inicial do processo de secagem, a superfície dos materiais sólidos porosos mantém-se húmida durante um longo período de tempo, e como consequência o valor da humidade de equilíbrio e crítica destes materiais é baixa.

- **Não higroscópicos ou Capilares**

Estes materiais caracterizam-se por apresentar poros facilmente identificáveis, preenchidos com água (quando o corpo se apresenta num ambiente saturado) ou com ar (quando o corpo está contido num ambiente seco). Estes sólidos não apresentam contração simultânea com o processo de secagem. Inserem-se neste grupo de materiais sólidos os leitos de areia ou minerais moídos, cristais não higroscópicos, alguns polímeros e alguns materiais cerâmicos.

- **Higroscópicos**

Neste tipo de sólidos existem espaços porosos reconhecíveis, mas de pequenas dimensões. Estes sólidos apresentam contração simultaneamente ao processo de secagem, sendo que este fenómeno físico geralmente tem lugar durante as fases iniciais do processo. Os materiais pertencentes a esta categoria são: argila, madeiras, materiais têxteis, cortiça e entre outros.

Materiais Coloidais

Nestes materiais toda a água apresenta-se fisicamente ligada ao sólido. Isto fará com que o movimento da água para a superfície do material seja mais difícil. Este movimento é muito lento e ocorre através de um mecanismo de difusão, que se caracteriza pela migração da água de zonas mais húmidas para zonas menos húmidas. Devido à inexistência de poros, a evaporação só poderá ter lugar na superfície do sólido. Devido à dificuldade de a água atingir a superfície, esta não se mantém molhada por muito tempo, e como consequência disto, a humidade crítica destes sólidos terá um valor superior relativamente aos sólidos porosos. Outra característica destes sólidos é que quando submetidos a ambientes com elevado teor de humidade, o sólido pode deliquescer. São exemplos destes materiais o sabão, a cola, certos produtos alimentares e alguns polímeros (como o *nylon*).

A Cerâmica: um material poroso

A cerâmica, atendendo ao seu comportamento durante o processo de secagem, poderá ser classificada como um material poroso. A superfície das peças, quando submetidas ao processo de secagem durante um longo período de tempo, permanece saturada. No entanto, devido ao facto de elas apresentarem contração durante o

processo de secagem, e também porque estes sólidos acompanham sempre a humidade de equilíbrio do meio onde estão contidas, leva a aproximar mais o seu comportamento aos sólidos porosos higroscópicos.

4.1.3 Mecanismos de fixação da água em corpos cerâmicos

Segundo Brosnan e Robinson (2003), quando água é adicionada a uma mistura cerâmica seca, apenas uma parte cobrirá a superfície das partículas, formando-se finas camadas de água sobrepostas no material. A porção de água responsável por este fenómeno é designada por água de superfície, ou água higroscópica.

Após isto, a restante água desloca-se, de modo a ocupar os espaços vazios existentes entre as partículas, os capilares², tomando esta a designação de água capilar. Com o decorrer deste fenómeno são criados filmes de água contínuos em torno das partículas, que se vão sobrepondo.

Posteriormente, a água tende a ocupar os ou macroporos (poros maiores com diâmetro entre ~50-100 µm). O acréscimo de mais água (água de plasticidade ou água de formação) a partir deste ponto induz plasticidade à massa cerâmica, promovendo a separação das partículas. É necessário atingir este nível de plasticidade, pois só deste modo é que se consegue injetar no interior dos moldes o material cerâmico, e fazer com que este se disperse em todo o seu interior, de modo a que a peça fique moldada.

A remoção de água de um corpo cerâmico durante o processo de secagem dá-se numa sequência inversa ao mecanismo de adição, isto é, inicialmente, a primeira água a ser removida é a água de formação, de seguida é a água usada no enchimento dos macroporos, depois a água de capilaridade e só por fim é que é removida a água de superfície.

É evidente que a quantidade de água a adicionar a uma massa cerâmica deverá ser controlada e não deverá exceder a necessária para a formação de uma massa plástica. Caso isto não aconteça, poderá acarretar alguns inconvenientes, como por exemplo, o consumo energético desnecessário para remover o excesso de água na secagem.

² Os capilares são normalmente definidos como vazios ou poros, com diâmetro inferior a 1µm. Estão geralmente presentes nas misturas cerâmicas.

4.1.4 Curvas de secagem

A informação básica sobre a cinética de secagem de um sólido é obtida através da respetiva curva de secagem. O comportamento de um sólido durante o processo de secagem pode ser representado de duas formas:

- Teor de humidade média *versus* tempo de secagem, figura 4.1
- Taxa de evaporação ³*versus* teor de humidade média ⁴ figura 4.2

A taxa de evaporação exprime-se como sendo o simétrico da derivada do teor de humidade médio em ordem ao tempo, através da equação 4.3.

$$\text{Taxa de evaporação} = -\frac{dX}{dt} \quad (4.3)$$

As curvas representadas na figura 4.1 e figura 4.2, permitem detetar as três fases que constituem um processo de secagem: a fase de secagem a taxa constante, representada pelo percurso BC, a primeira fase de declínio, representada por CD, e a segunda fase de declínio, DE. Existe ainda outro período (AB) que nem sempre está presente nos processos de secagem. Esse ponto consiste num ajuste de temperatura e existe apenas quando a temperatura do sólido a secar e a temperatura do gás na interface (junto à superfície do sólido) são diferentes no início do processo de secagem. Em seguida serão analisadas e caracterizadas as três fases de secagem, evidenciando, para além disto, as principais características que constituem cada uma (Smith *et al*,1993; Perry e Green, 1998; Melo, 1979).

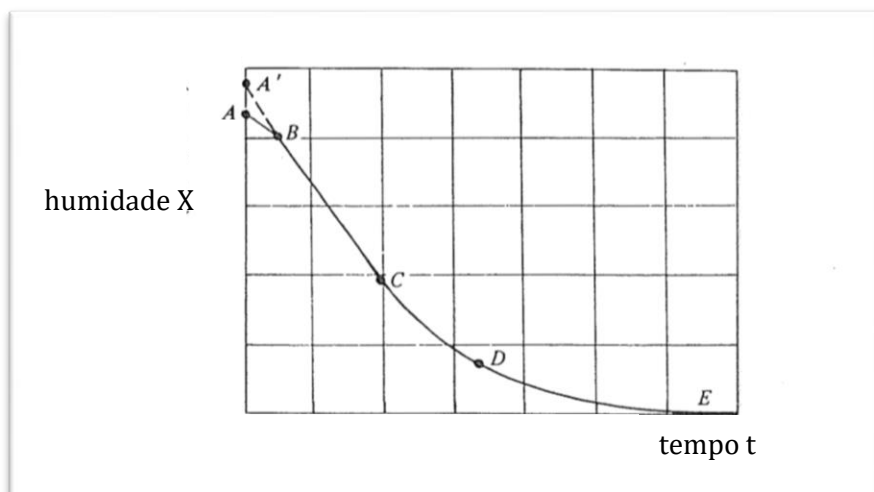


Figura 4.1-Humidade de um sólido em função do tempo de secagem Adaptado de Smith et al, (1993)

³ Muitas vezes representa-se, ao invés da taxa de evaporação, a velocidade de secagem

⁴ Este comportamento tem também a designação de curva de cinética de secagem

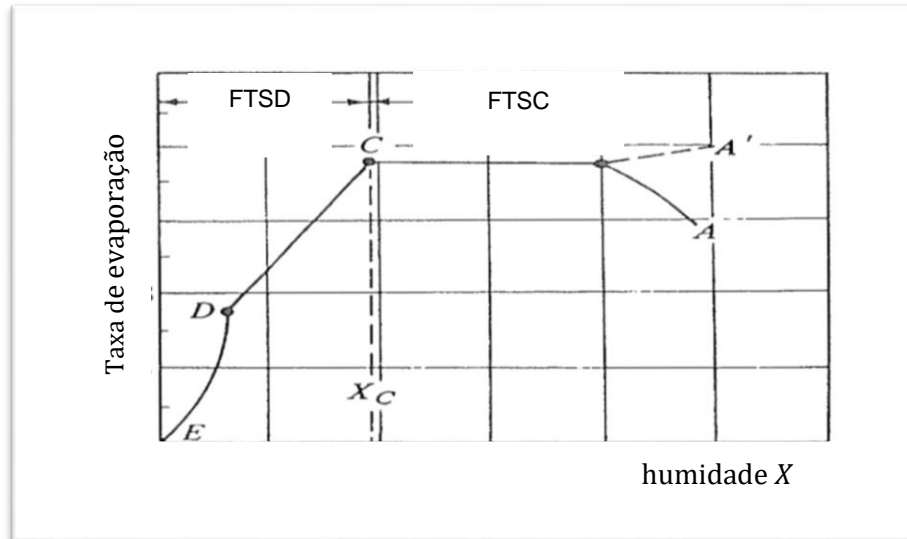


Figura 4.2 Taxa de evaporação em função da humidade do sólido Adaptado de Smith et al, (1993)

Fase de taxa de secagem constante (FTSC)

A fase constante é caracterizada, pela existência de movimento rápido da água através do sólido, movimento este, que é suficiente para manter a superfície do sólido molhada. O calor que é fornecido ao sólido corresponde apenas ao necessário para a evaporação da água à superfície. Como as temperaturas da superfície do sólido e da fonte de calor permanecem inalteradas, a quantidade de calor cedido será constante e como tal, a taxa de evaporação permanecerá também constante. Esta fase dá-se enquanto a água evaporada é continuamente substituída pela água proveniente do interior do sólido. A partir do momento em que a quantidade de água à superfície vai diminuindo, termina o período de taxa constante e atinge-se o valor de (X_C), ponto C, da figura 4.2

Fase de taxa de secagem decrescente (FTSD)

É a partir do ponto C que se inicia uma nova fase, fase de secagem decrescente, que é dividida em duas: primeira fase marcada pelo percurso CD e uma segunda fase, marcada por DE.

A fase CD é caracterizada pela existência de manchas, devido à presença de zonas secas a par de zonas húmidas à superfície do sólido que resultam do decaimento da taxa de evaporação. Devido a esta descontinuidade que existe ao longo do sólido, existirão zonas onde a temperatura permanece inalterada, nas zonas húmidas (uma vez que o fornecimento de calor continua a ser para a evaporação do líquido à superfície) e

haverão zonas, onde a temperatura irá aumentar (pois nestas o calor recebido já não será utilizado na evaporação do sólido, mas sim no seu aquecimento).

A segunda fase de secagem decrescente, representada pelos pontos D a E, inicia-se quando o filme de água à superfície desaparece e o calor é usado apenas no aquecimento do sólido, até que este atinja uma temperatura perto da temperatura seca do gás envolvente. No momento em que a pressão do vapor de água existente no sólido igualar à pressão parcial do vapor de água existente na atmosfera envolvente, atinge-se a humidade de equilíbrio, X_{eq} , e já não é possível evaporar mais líquido nas condições a que o sólido se encontra.

4.1.5 Curvas de Bigot

O efeito da contração/encolhimento nos corpos cerâmicos, resultante da perda de água, quando submetidos ao processo de secagem é uma informação que pode ser obtida através das curvas de *Bigot*. Uma curva típica de *Bigot*, está representada na figura 4.3, onde nesta se podem observar as diferentes fases ao longo do processo de secagem, com início no ponto A da figura. Verifica-se a perda de água inicial com grande contração durante o período de pré-aquecimento (quando presente) e durante o período de taxa de secagem constante, linha AB. Durante o primeiro período de taxa de secagem decrescente a perda de água é acompanhada por menor contração do sólido e na última fase do processo, a contração é inexistente.

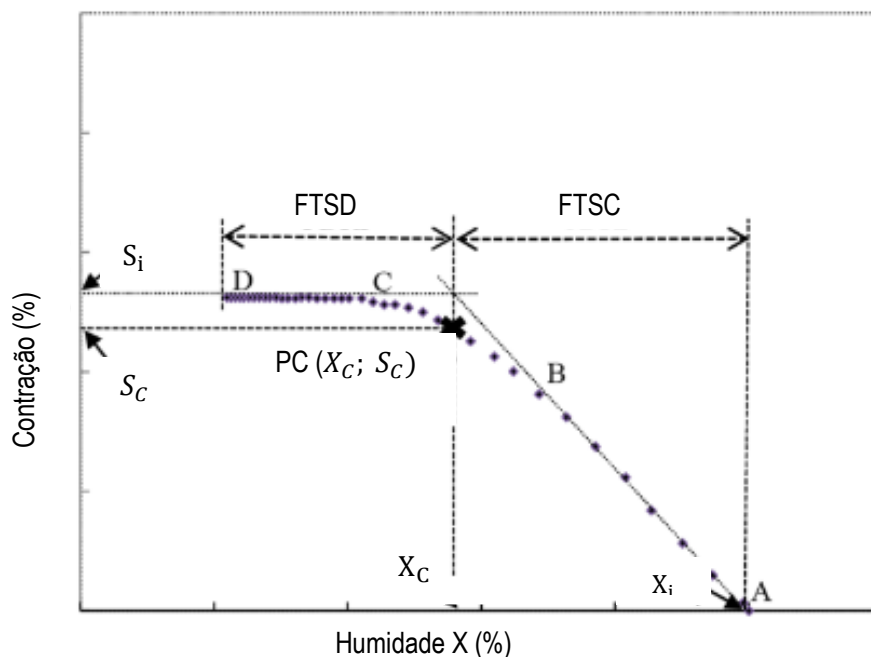


Figura 4.3-Curva típica de Bigot (Mancuhan *et al*,2016)

O conhecimento desta curva é bastante importante, pois permite detetar o ponto crítico, PC, ponto este que separa as fases FTSC e FTSD. Para além disto, o seu conhecimento ajuda a estabelecer o ciclo de secagem mais adequado para cada material. Isto permite de certa forma otimizar o respetivo tempo de secagem (por forma a que o tempo de permanência das peças neste processo não seja demasiadamente longo), evitar o aparecimento de defeitos, e também permite otimizar os consumos energéticos associados a este processo.

À medida que a água evapora, as partículas vão ficando cada vez mais próximas entre si, e o efeito disto reflete-se na redução das dimensões das peças a secar. O ponto A representa a peça no início do processo de secagem, que contém uma humidade inicial (X_i). A primeira fase de secagem (representada pelo percurso AB) caracteriza-se pela eliminação da água de plasticidade. Aqui, a variação do volume da amostra é proporcional à quantidade de água evaporada. Esta é a fase mais problemática de todo o processo de secagem, pois a sua eliminação é acompanhada por grande contração que aumenta o risco de aparecimento dos defeitos mencionados.

Por volta da humidade crítica X_c , entre B e C, algumas partículas de argila já estão em contacto umas com as outras, pelo que a contração da peça será menor do que na etapa anterior. Após o ponto crítico, entre C e D, o encolhimento dos corpos é quase nulo, pois quase todas as partículas do material estão já em contacto umas com as outras. Quando o valor do encolhimento da peça atinge o valor máximo (a partir do ponto crítico PC), o processo de secagem pode ser acelerado, pois o risco de aparecimento de defeitos é menor ou até mesmo inexistente (Mancuhan *et al.*, 2016; Brosnan e Robinson, 2003; Melo, 1979).

Torna-se assim parte deste estudo a previsão do valor do ponto crítico do material em estudo, o *Vitreous China*, de maneira a submeter as peças a condições controladas de maneira a evitar o aparecimento de defeitos. Só após atingido este valor é que se está em condições de enviar as peças para as estufas, para dar continuidade ao processo de secagem.

4.2 A psicrometria

A psicrometria estuda as propriedades termodinâmicas, como a temperatura e a humidade, do ar húmido. Esta é uma ferramenta necessária na caracterização das condições ambientais, onde se processam os fenómenos de secagem. As características psicrométricas do ar podem ser determinadas através do uso de equações ou, de uma maneira mais simplificada, através da consulta de cartas psicrométricas, como apresentado na figura 4.4.

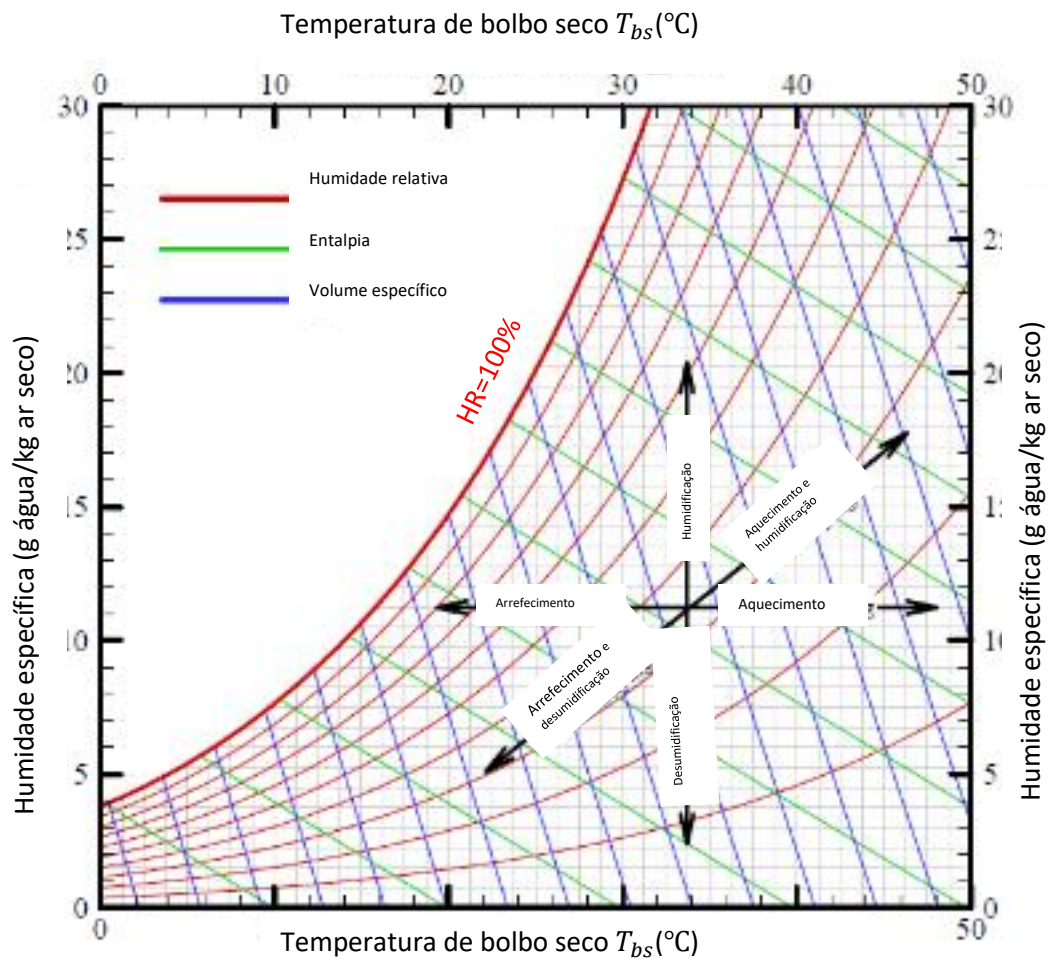


Figura 4.4- Carta psicrométrica baseada numa pressão total igual à atmosférica Adaptado de Althouse e Turnquist (1956)

São várias as propriedades psicrométricas que podem ser retiradas de uma carta psicrométrica, entre as quais se destacam:

X_{esp} Humidade específica- é apresentada no eixo das ordenadas, e corresponde à massa de água contida por kg de ar seco.

X_r Humidade relativa- é apresentada normalmente em percentagem, e representa a razão entre a quantidade (massa) de vapor de água contida no ar e a quantidade de vapor que o ar pode conter nas condições de saturação à mesma temperatura. As linhas de humidade relativa são apresentadas a vermelho.

T_{bs} Temperatura de bolbo seco- é apresentada no eixo das abcissas. Esta é a temperatura que se obtêm por leitura com um termómetro convencional.

T_h Temperatura de bolbo húmida- é obtida através da interseção da linha de saturação, com a linha que se obtêm do prolongamento desde a temperatura do bobo seco com um ângulo de 45° com a horizontal (paralelas isentálpicas).

H Entalpia da mistura de ar húmido- A entalpia apresenta-se representada na carta a cor verde.

V_{esp} Volume específico- É a propriedade que indica o volume por unidade de massa. Esta aparece representada na carta a cor azul.

A particularidade das cartas psicrométricas é que com apenas duas propriedades é possível definir um ponto na carta psicrométrica e determinar todas as restantes.

Para fins do processo de secagem, não é possível utilizar o ar com características acima da linha de saturação, pois o ar fica sobressaturado e para além de poder ocorrer condensação, este ar torna-se insuficiente para transportar mais água da superfície das peças para a atmosfera (Brosnan e Robinson, 2003; Perry e Green, 1998).

4.3 Análise dimensional

A resolução de problemas reais em engenharia envolve uma combinação de estudos e experiências que se tornam por vezes impraticáveis (economicamente) e/ou até mesmo impossíveis. Um método valioso que permite reduzir a complexidade na resolução de problemas reais, através da sua transformação em problemas mais simples, é a análise dimensional. Esta baseia-se sobretudo na definição de “semelhança”. Em termos físicos, a semelhança é referida a alguma equivalência existente entre duas coisas ou fenómenos, que são realmente diferentes.

A premissa da análise dimensional baseia-se na coerência dimensional de qualquer equação física ou relação entre as variáveis de um dado processo. Visto que as dimensões das grandezas físicas podem ser expressas de várias formas com base nas grandezas fundamentais – massa (M), comprimento (L), temperatura (θ) e tempo (T) - o requisito de coerência dimensional é satisfeito através da combinação dessas grandezas fundamentais.

O teorema de π -*Buckingham* é uma formulação da análise dimensional e descreve que: dado um processo físico que é afetado por n variáveis (ou quantidades dimensionais) onde, por sua vez, cada uma destas variáveis é expressa por j grandezas fundamentais, então estas variáveis podem ser agrupadas em k . ($k=n-j$) grupos adimensionais, definindo estes por sua vez os chamados π 's. O conhecimento destes grupos adimensionais é um instrumento extremamente útil, na medida em que, estes apresentam o mesmo valor quer para o modelo estudado (o provete), quer para o protótipo, o que constitui uma ferramenta importante no estabelecimento de resultados para problemas reais. Normalmente, para a sua concretização, o estudo é feito em

pequena escala, por exemplo em laboratório, e o seu resultado é extrapolado para a escala industrial.

No entanto, a análise dimensional pode constituir um instrumento perigoso quando, por exemplo, não se compreende a natureza física do processo, podendo mesmo levar a resultados incorretos e conduzir a conclusões falsas, se forem omitidas variáveis que são relevantes ao processo (Coulson e Richardson, 1974).

4.4 A secagem no interior da olaria 1

Atualmente, a operação de secagem das louças sanitárias é realizada em dois estágios. O primeiro estágio, designado por secagem verde, é efetuado no interior da olaria e é bastante importante pois é devido à sua existência que se evitam os problemas anteriormente descritos. As peças permanecem na olaria entre três a quatro dias, e após isto, são direcionadas para as estufas, onde se conclui com maior rapidez o processo de secagem.

Foram realizadas, tendo em conta as condições de operação atuais, sete experiências no mês de junho, onde se registaram os valores da humidade das peças no início e no final do dia. Este procedimento foi realizado durante vários dias e apenas para um tipo de louça, uma bacia do tipo opus. Os resultados desta análise encontram-se na tabela 4.1.

Os valores de humidade, principalmente para humidades baixas, apresentam várias oscilações, que resultam do facto da cerâmica ser um material poroso higroscópico. Isto, como já referido, leva a que estes sólidos acompanhem o valor de humidade de equilíbrio do meio onde estão inseridos.

Tabela 4.1-Resultados obtidos para a variação de humidade das peças na olaria 1 com o tempo, e após saída da estufa no mês de junho

Nº Amostra Dia	1	2	3	4	5	6	7
01/06/2016	23,30%	22,34%					
	21,42%	19,66%					
02/06/2016	16,97%	17,86%	21,09%	24,05%			
	15,24%	16,08%	18,33%	17,23%			
03/06/2016	14,90%	15,26%	12,46%	14,12%			
	12,75%	13,55%	8,23%	7,25%			
2 Dias de Fim de Semana							
06/06/2016	1,15%	1,36%	1,93%	1,48%	22,65%	22,25%	
	0,89%	1,05%	0,82%	1,07%	20,15%	21,95%	
07/06/2016	0,99%	0,91%	0,90%	1,66%	17,99%	18,68%	20,82%
	0,99%	0,86%	1,40%	1,26%	14,43%	14,77%	18,22%
08/06/2016	0,76%	0,85%	1,82%	1,30%	14,27%	13,64%	12,12%
	0,95%	0,90%	1,00%	1,35%	13,12%	12,21%	8,89%
09/06/2016	0,92%	0,87%	1,29%	1,57%	9,60%	10,10%	7,61%
	0,84%	0,72%	0,98%	0,95%	0,85%	5,03%	0,80%
3 Dias de Fim de semana							
13/06/2016	0,74%	0,87%	1,17%	0,88%	0,78%	0,80%	0,90%
	0,85%	0,83%	0,81%	1,32%	0,73%	1,04%	0,82%
14/06/2016	0,82%	0,80%	1,15%	0,82%	0,90%	0,89%	0,72%
	0,77%	0,82%	0,82%	0,86%	0,89%	0,88%	-
15/06/2016	0,87%	0,84%	1,24%	0,95%	0,95%	-	0,79%
	0,86%	0,83%	1,32%	1,48%	0,95%	0,45%	0,00%
16/06/2016	0,89%	-	1,82%	0,86%	0,80%	0,93%	0,85%
	-	-	0,77%	2,22%	0,82%	0,87%	0,83%
17/06/2016	0,88%	0,90%	1,66%	1,09%	0,97%	-	-
Após estufa	0,83%	0,86%	0,74%	0,90%	1,02%	-	-

Levantamento das condições ambientais da olaria 1

As condições psicrométricas do ar no interior da olaria variam de ponto para ponto (ao longo da sua área) e ainda variam ao longo do dia, havendo por isto desigualdade nas condições de secagem das peças.

No anexo C são apresentados os registos psicrométricos do ar da olaria, em vários pontos, para dois dias diferentes do mês de maio. Constata-se que neste período de medições, a temperatura variou entre os 21°C e os 31°C e a humidade relativa entre os 58% e os 85%. As temperaturas mais altas são atingidas sobretudo durante a tarde, e as mais baixas na parte da manhã e no final da tarde. No caso das humidades, estas apresentam também variações, sendo que existe um aumento dos respetivos valores

por volta do meio dia, que corresponde ao período de desmoldagem das peças ou início do período de secagem. Para além disto, verifica-se que no início da manhã os valores de humidade do ar são maiores, quando a humidade exterior é também superior. Comportamento idêntico verifica-se quando a humidade exterior é menor (a humidade no interior da olaria é também menor).

É importante destacar neste ponto uma questão essencial sobre o aquecimento do ar nos geradores de calor. Estes, para além de terem incorporado um sistema de controlo de temperatura (já referido no ponto 3.3), apresentam temperaturas de saída do ar bastante diferentes das referidas, ver tabela 4.2.

Tabela 4.2-Valores médios medidos para a temperatura do ar de aquecimento da olaria 1 à entrada e à saída do gerador de calor

Descrição \ Nº Gerador	Gerador	Gerador	Gerador	Gerador	Gerador	Gerador
	1	2 Noite	2 Dia	3 Noite	3 Dia	4
Temperatura de entrada do ar (°C)	33	30	30	29	30	31
Temperatura de saída do ar (°C)	71	62	53	62	59	58

Os valores apresentados na tabela 4.2 são valores médios da temperatura do ar à entrada e à saída em cada gerador de calor. O valor da temperatura de saída do ar quente apresenta um desvio médio em relação aos valores de referência (relembrando 55°C,50°C,40°C,50°C,40°C e 45°C), de cerca de 23%.

Tudo isto para realçar que atualmente o ar é aquecido a uma temperatura de cerca de 60°C, para manter as condições de temperatura da olaria a rondar os 25°C, sendo isto fruto da inexistência de isolamento no edifício e da suscetibilidade que existe face às condições exteriores, como consequência da existência de uma cobertura bastante danificada.

4.5 Estudo das condições ótimas de secagem na olaria

Neste estudo foi apenas determinada a temperatura ótima a implementar na olaria, para a realização da secagem das peças. Por questões práticas e por escassez de tempo, não foi possível proceder ao estudo dos valores ótimos de humidade e velocidade do ar a implementar. No entanto, estes foram estabelecidos, com base em estudos teóricos.

4.5.1 Ensaios experimentais: Determinação da humidade crítica

Como as louças sanitárias são de grandes dimensões, e como em qualquer estudo não se pode dar ao luxo de realizar ensaios à escala real, com grande probabilidade de perturbar o processo industrial, o que se fez foi realizar este estudo em escala laboratorial e extrapolar para a escala real.

Assim, foi utilizado como modelo um provete com dimensões tais que tornasse possível a realização do teste à escala laboratorial. O provete utilizado foi formulado a partir da mesma matéria que constitui as louças da olaria 1, o *Vitreous China*, e com um formato cilíndrico. Nas figuras 4.5 e 4.6 são apresentadas as fotografias do protótipo (uma bacia do tipo opus) e do modelo estudado (proвете).



Figura 4.5-Fotografia de uma bacia opus



Figura 4.6-Fotografia de um provete estudado em laboratório

Foram determinadas as áreas para o modelo e para o protótipo, tendo se obtido o valor de $0,0030\text{m}^2$ e $0,89\text{ m}^2$ respetivamente.

Foram também feitas simulações e avaliações práticas a temperatura constante numa estufa, registando-se, para tal, as condições psicrométricas do ar de secagem, assim como todas as variações de massa de água ocorridas no provete ao longo de todo o processo de secagem, até obter peso constante. No final foi determinado peso seco do provete, submetendo-o a temperaturas mais elevadas durante o tempo necessário para o secar completamente.

Por forma a construir a curva de *Bigot*, para o provete em análise, foi determinada a sua contração ao longo da secagem. Como a contração de um corpo se baseia na sua redução do volume, então foi determinado o valor do volume do provete ao longo do tempo de secagem. Para a sua concretização, mergulhou-se completamente o provete

num recipiente com uma determinada quantidade conhecida de mercúrio, de acordo com a figura 4.7.



Figura 4.7-Metodologia utilizada na concretização da curva de Bigot

O volume do provete, em cada medição, foi estimado de acordo com a equação 4.4.

$$V_{modelo} = \frac{(m_{Hg_i} - m_{Hg_f})}{\rho_{Hg}} \quad (4.4)$$

Onde V_{modelo} (m^3) corresponde ao volume do provete, calculado pelo quociente entre a massa de mercúrio deslocada devido à introdução do provete e a massa volúmica do mercúrio ρ_{Hg} ($kg.m^{-3}$). Esta análise realizada, foi progressivamente executada até se obter volume constante.

Todo este procedimento foi realizado para os valores de temperatura: 35°C, 40°C e 45°C. Estes valores de temperatura foram seleccionados de acordo com as condições possíveis de implementar na olaria. Não foram testadas temperaturas superiores a 45°C, uma vez que esta corresponde à temperatura máxima possível para os moldes. Valores de temperatura superiores a esta poderão levar à perda de desempenho do gesso, nomeadamente à respetiva desidratação (Silval, 2013).

Na figura 4.8 encontra-se representada a curva de *Bigot* obtida para as diferentes temperaturas estudadas, sendo que a contração apresentada diz respeito à contração volumétrica (% de redução do volume).

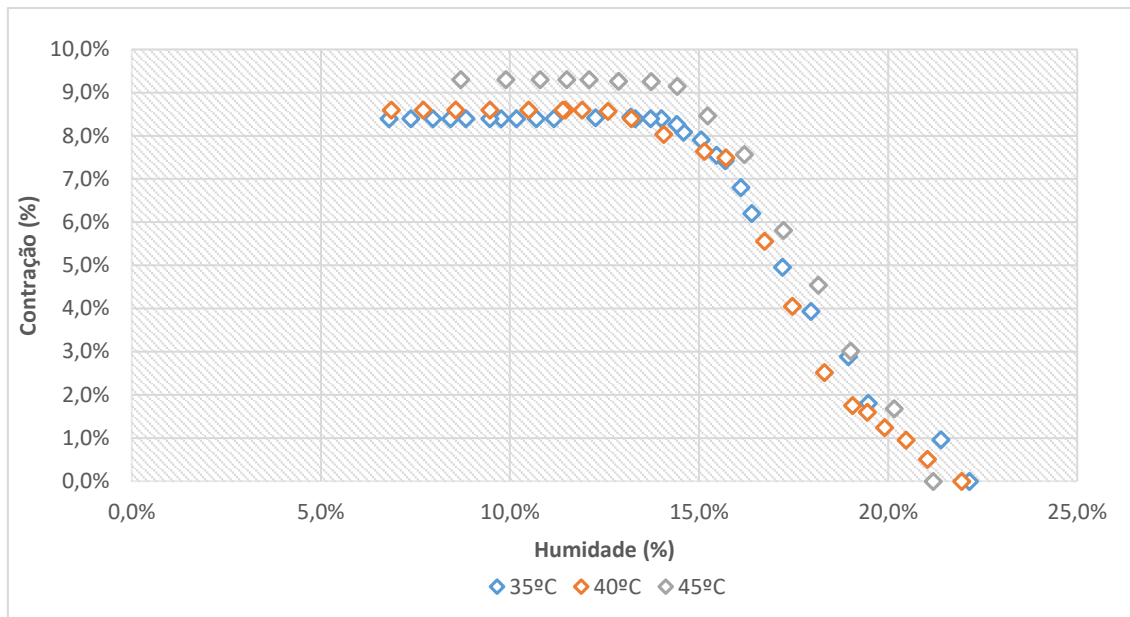


Figura 4.8-Curvas de Bigot obtidas experimentalmente para o modelo às temperaturas de 35, 40 e 45°C

Durante a secagem, dá-se inicialmente a saída da água de plasticidade, seguido da água dos poros e da água capilar, tendo como consequência a união das partículas da massa cerâmica. A consequência desta união tem como resultado o encolhimento das peças. Após colapso total entre as partículas, o encolhimento cessa e o volume do corpo permanece constante até ao final do processo de secagem. O encolhimento, tal como previsto, é efetuado em duas fases, sendo que na primeira (até ao ponto crítico) a contração dá-se de forma acentuada e, a partir deste ponto, a contração dá-se mais lentamente e em menor grau do que na fase anterior.

A determinação do ponto crítico, apresentada no anexo C, foi efetuada de acordo com o método proposto por Mancuhan *et al.* (2016). A humidade no ponto crítico é uma característica do material, e como tal não depende da forma e do tamanho da amostra, dependendo apenas de fatores como da natureza mineralógica e da granulometria dos componentes da massa cerâmica (Angenitskaya, 1974). No entanto, o valor da humidade neste ponto deve variar em função da duração do período de taxa de secagem constante. Quanto mais curto for este período, que dependerá da temperatura, humidade e velocidade do ar, maior será o valor da humidade no ponto crítico.

Apesar dos ensaios terem sido feitos para as temperaturas de 35°C, 40°C e 45°C, verifica-se que a X_c se situa num valor sempre perto de 15%. Este valor corresponde, então, ao valor de humidade no ponto crítico, que é característico das louças cerâmicas produzidas em *Vitreous China* (Angenitskaya, 1974; Melo, 1979).

Estão resumidos na tabela 4.3 os valores de encolhimento até ao ponto crítico e até ao final da secagem, para as diferentes temperaturas estudadas.

De maneira a poder comparar os resultados do encolhimento com os referidos teoricamente, os valores de contração volumétrica foram transformados em contração linear. Sabe-se que a contração linear pode ser obtida pela relação dada na equação 4.5.

$$S_{linear} = \sqrt[3]{S_{volumétrica}} \quad (4.5)$$

Estes resultados são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3-Resumo dos valores de contração obtidos até ao PC ao final da secagem

Temperatura	T=35°C	T=40°C	T=45°C
Descrição*			
Contração volumétrica total	8,42	8,60	9,26
Contração linear total	2,03	2,05	2,10
Contração volumétrica até X_c	7,91	7,60	8,80
Contração linear até X_c	1,99	1,97	2,06

*Todos os valores indicados nesta tabela estão em percentagem (%)

Verifica-se, através dos resultados experimentais, que com o aumento da temperatura, a contração, quer total, quer até ao PC, aumenta. Isto acontece porque temperaturas elevadas induzem taxas de secagem mais altas.

O problema é que, como existe um grande diferencial entre as condições no interior e na superfície, este encolhimento não é homogéneo ao longo da peça, e como tal a parte externa retrai antes da parte interna, e de maneira mais rápida. Devido a esta diferença entre o interior e a superfície, surgem nas peças tensões que levam ao aparecimento dos defeitos mencionados. A contração dos corpos deve, por tudo o que se falou, ser a mínima possível, para evitar o aparecimento dos defeitos. Deste ponto de vista, a temperatura pré-selecionada seria T=35°C, mas existem outros fatores que são determinantes no processo, tais como o tempo e os consumos energéticos, e que serão estudados posteriormente.

4.5.2 Curva de secagem para modelo e protótipo

Foram determinadas experimentalmente as curvas de secagem para o modelo e para o protótipo. Inicialmente determinou-se as curvas de secagem para o modelo a várias temperaturas. Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.9.

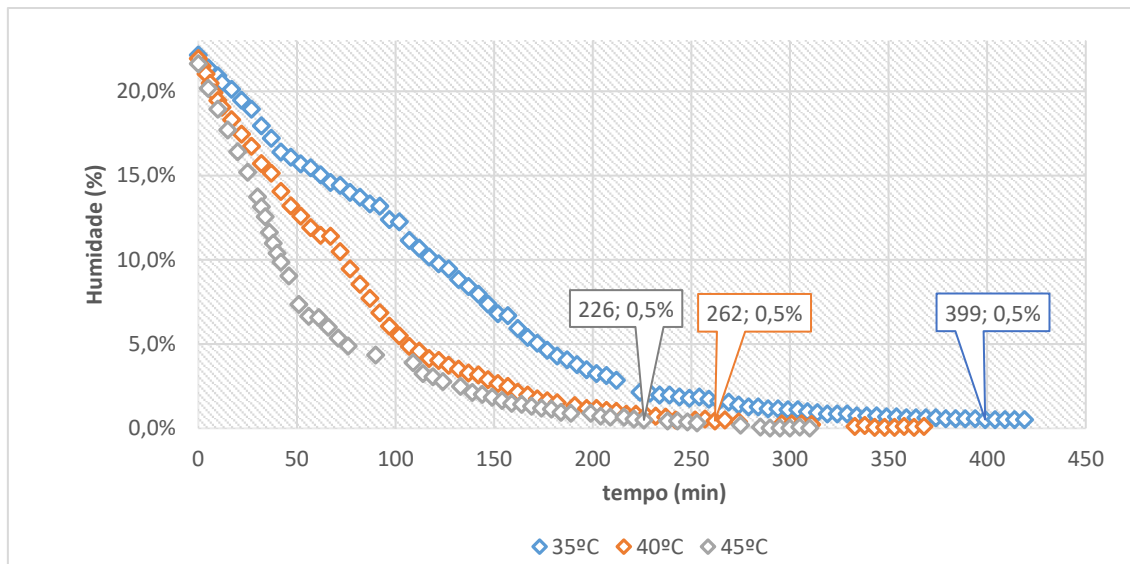


Figura 4.9-Curvas de secagem obtidas experimentalmente para o modelo às temperaturas de 35, 40 e 45°C

O aumento da taxa de secagem diminui o respectivo tempo de operação. A análise da figura 4.8, demonstra que, para que o corpo atinja, por exemplo, o valor de umidade igual a 0,5%, demora 399, 262 e 226 minutos, quando submetido às temperaturas de 35, 40 e 45°C, respetivamente.

Os tempos referidos na figura 4.9, correspondem ao tempo de secagem do modelo estudado, sendo este bastante menor do que o requerido para a secagem de objetos com maiores dimensões, já que o tamanho é um dos fatores que influencia o processo de secagem.

4.5.3 Determinação do tempo ótimo de secagem

Com o objetivo de prever qual o tempo de secagem requerido para a secagem de uma peça opus, quando submetida a diferentes temperaturas, foi aplicado o teorema da igualdade dos grupos adimensionais entre o provete estudado em laboratório e a peça em estudo.

Determinação dos π 's-Buckingham

Verifica-se, como resultado da experimentação, que o teor de umidade numa peça cerâmica ao longo do processo de secagem, em condições de convecção natural e a temperatura constante, é função das seguintes propriedades:

Propriedades do ar que o envolve:	densidade do ar	ρ_{ar}
	viscosidade do ar	μ_{ar}
	temperatura	T
	humidade específica do ar	X_{ar}
Propriedades do próprio sólido:	densidade do material	$\rho_{sólido}$
	área exposta à secagem	$A_{sólido}$
	Calor específico do sólido	$cp_{sólido}$
	Tempo de secagem	t

Ou seja, a relação funcional entre a humidade do sólido pode ser escrita em função das suas variáveis de acordo com a equação 4.6.

$$X = f(\rho_{ar}, \mu_{ar}, T, \rho_{sólido}, A_{sólido}, cp_{sólido}, t) \quad (4.6)$$

$n=7$ variáveis dimensionais

A humidade do ar, X_{ar} , expressa em $kg\acute{a}gua.kgaseco^{-1}$, pelo facto de se encontrar já adimensional, não foi inserida na relação anteriormente descrita. Esta aparecerá somente aquando da formulação dos grupos adimensionais.

Pode exprimir-se cada variável da equação 4.6, em termos dimensionais, sendo L, M, T, θ as grandezas dimensionais primárias ($j=4$) que correspondem ao comprimento, massa, tempo e temperatura, respetivamente. Assim, com efeito dimensional, as variáveis da equação 4.6 podem ser expressas da seguinte forma:

$$\frac{M}{L^3}, \frac{M}{LT}, \theta, \frac{M}{L^3}, L^2, \frac{L^2}{\theta T^2}, T$$

Isto é:

$$ML^{-3}, ML^{-1}T^{-1}, \theta, ML^{-3}, L^2, L^2\theta^{-1}T^{-2}, T$$

Assim, segundo o teorema de π de *Buckingham*, existem três conjuntos de grupos adimensionais ou π 's ($k=7-4$) que definem a umidade das peças cerâmicas ao longo do processo de secagem. A relação funcional entre a umidade do sólido e os grupos dimensionais pode ser escrita de acordo com a equação 4.7.

$$X = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) \quad (4.7)$$

Foram escolhidos para conjunto de recurso as variáveis: $A_{sólido}, T, t, \mu_{ar}$.

Os grupos adimensionais são obtidos considerando o conjunto de recurso, e tendo também em conta cada uma das restantes variáveis, ou seja:

$$\pi_1 = A_{sólido}^a T^b t^c \mu_{ar}^d \rho_{ar}$$

$$\pi_2 = A_{sólido}^e T^f t^g \mu_{ar}^h \rho_{sólido}$$

$$\pi_3 = A_{sólido}^e T^f t^g \mu_{ar}^h c_{p_{sólido}}$$

Substituindo as variáveis pelas respectivas dimensões fica:

$$\pi_1 = (L^2)^a \theta^b T^c (ML^{-1}T^{-1})^d ML^{-3}$$

$$\pi_2 = (L^2)^a \theta^b T^c (ML^{-1}T^{-1})^d ML^{-3}$$

$$\pi_3 = (L^2)^a \theta^b T^c (ML^{-1}T^{-1})^d L^2 \theta^{-1} T^{-2}$$

O requisito de coerência dimensional é o de que o termo de segundo membro da equação 4.7, terá que ter as mesmas dimensões que o primeiro membro, ou seja, adimensional. Então, para que a condição de coerência possa ser satisfeita, podem-se igualar os expoentes de cada variável do seguinte modo:

$$\pi_1 = (L^2)^a \theta^b T^c (ML^{-1}T^{-1})^d ML^{-3} = L^0 M^0 T^0 \theta^0$$

$$\pi_2 = (L^2)^a \theta^b T^c (ML^{-1}T^{-1})^d ML^{-3} = L^0 M^0 T^0 \theta^0$$

$$\pi_3 = (L^2)^a \theta^b T^c (ML^{-1}T^{-1})^d L^2 \theta^{-1} T^{-2} = L^0 M^0 T^0 \theta^0$$

Resolvendo a equação para o caso do primeiro grupo dimensional fica:

$$L: 2a - d - 3 = 0 \quad a = 1$$

$$M: d + 1 = 0 \quad d = -1$$

$$T: c - d = 0 \quad c = -1$$

$$\theta: b = 0 \quad b = 0$$

Por analogia calculam-se os expoentes dos restantes grupos adimensionais. Após formulação de cada grupo resulta:

$$\pi_1 = \frac{A_{sólido} \cdot \rho_{sólido}}{t \cdot \mu_{ar}}$$

$$\pi_2 = \frac{A_{sólido} \cdot \rho_{ar}}{t \cdot \mu_{ar}}$$

$$\pi_3 = \frac{t^2 \cdot T \cdot cp_{sólido}}{A_{sólido}}$$

Uma vez determinados os grupos adimensionais, pode-se a partir destes prever o tempo de secagem do protótipo (bacia opus), a partir dos resultados obtidos para o modelo estudado. Isto apenas é possível, pois existe semelhança nas condições a que ambos são submetidos durante o processo de secagem e, ainda porque o material de que são constituídos é o mesmo. De uma maneira geral tem-se que:

$$(\pi_{n_{modelo}} = \pi_{n_{protótipo}})$$

Ou seja:

$$\pi_1: \frac{A_{sólidoM} \cdot \rho_{sólidoM}}{t_M \cdot \mu_{arM}} = \frac{A_{sólidoP} \cdot \rho_{sólidoP}}{t_P \cdot \mu_{arP}} \quad \pi_2: \frac{A_{sólidoM} \cdot \rho_{arM}}{t_M \cdot \mu_{arM}} = \frac{A_{sólidoP} \cdot \rho_{arP}}{t_P \cdot \mu_{arP}}$$

$$\pi_3: \frac{t_M^2 \cdot T_M \cdot cp_{sólidoM}}{A_{sólidoM}} = \frac{t_P^2 \cdot T_P \cdot cp_{sólidoP}}{A_{sólidoP}}$$

Como as condições de secagem (T e v), quer do modelo, quer do protótipo, são iguais, então o tempo de secagem pode ser calculado através de:

$$\pi_1: t_{protótipo} = t_{modelo} \frac{A_{sólidoP} \cdot \rho_{sólidoP}}{A_{sólidoM} \cdot \rho_{sólidoM}} \quad \pi_2: t_P = t_{modelo} \frac{A_{sólidoP} \cdot \rho_{arP}}{A_{sólidoM} \cdot \rho_{arM}}$$

$$\pi_3: t_{protótipo} = t_{modelo} \sqrt{\frac{A_{sólidoP}}{A_{sólidoM}}} \quad (4.8)$$

Outro dos grandes problemas da análise dimensional é o de saber se existem grupos adimensionais, que ao serem igualados no modelo e no protótipo, conduzem a resultados errados.

Tendo em conta os valores experimentais obtidos para o tempo de secagem do protótipo, a equação que melhor se ajusta é obtida a partir da igualdade π_3 . Isto será demonstrado de seguida.

Verificação da expressão 4.7:

Por forma a determinar qual a expressão que melhor descreve o tempo de secagem para sólidos de diferentes dimensões, foi feito um ensaio com uma peça real para a temperatura de 35°C e para o caso de convecção normal.

Estas condições de temperatura apenas foram alcançadas porque a peça foi colocada próxima de um gerador de calor (relembrando que as temperaturas próximo destes equipamentos é relativamente superior do que em outros pontos da olaria)⁵. Na figura 4.10 são apresentadas as curvas de secagem obtidas aquando da secagem do provete e da bacia.

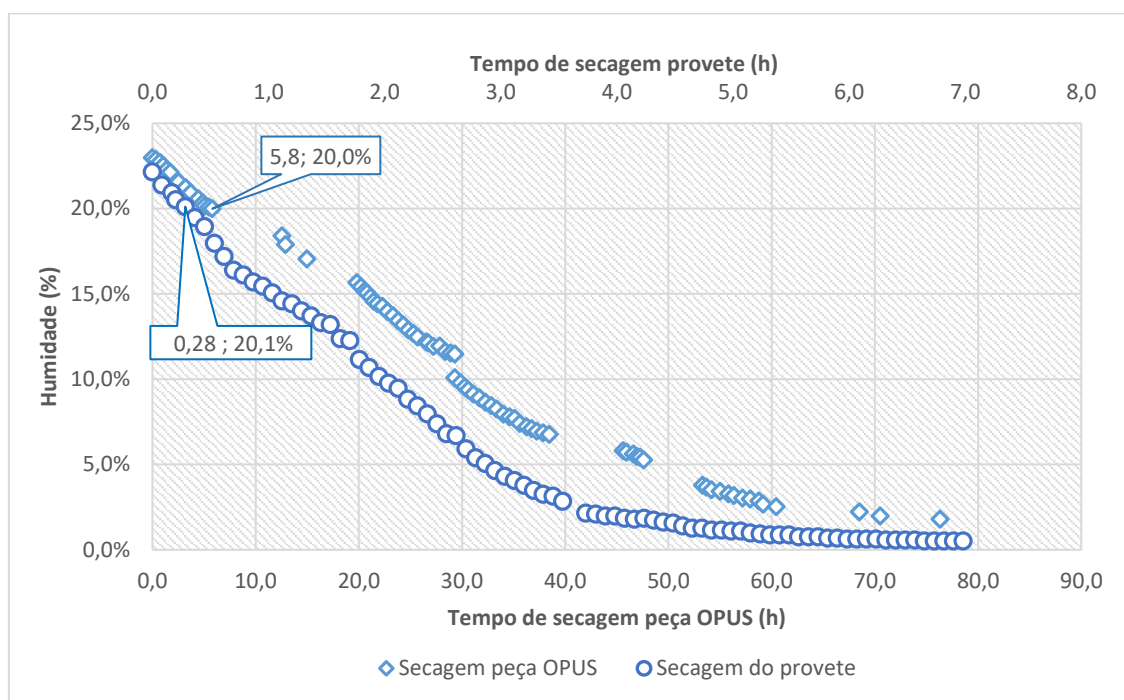


Figura 4.10-Apresentação dos resultados obtidos para a secagem a 35°C do modelo (provete) e do protótipo (bacia opus)

É importante referir que a curva de secagem da peça real apresenta algumas discontinuidades, que são resultado da impossibilidade de aquisição de dados durante todo o período de secagem (período pós-laboral). No entanto, e de forma a minimizar a carência dos dados durante esses períodos, uma câmara foi instalada na olaria para registar as variações de peso ocorridas durante o respetivo tempo de funcionamento.

Para a verificação da expressão encontrada para o tempo de secagem, foram usados os valores correspondentes à humidade de 20,0%, pelo facto de ser até este valor que as condições de secagem são iguais nos dois casos.

⁵ Para além disto, importa realçar que as condições psicrométricas foram modificadas no mês de setembro, pelo que estas são diferentes das apresentadas no anexo C.

Até atingir o valor de humidade de cerca de 20,0%, o provete necessita de cerca de 0,28h (≈ 17 min) e a peça real de 5,80 horas. Substituindo estes valores experimentais na equação 4.7 vem:

$$t_{protótipo} = 0,28 \sqrt{\frac{0,89}{0,0030}} = 4,82h$$

O valor encontrado é 17% inferior ao valor real. Existem sempre erros experimentais associados, mas uma possível razão para esta diferença surge no facto da secagem do provete ser iniciada com uma humidade de 22,2% e a peça real ter iniciado com uma humidade superior, 23,0%, sendo o valor de humidade inicial determinante num processo de secagem. Por outras palavras, com esta correlação está-se a prever o tempo de secagem da peça real, de maneira a que esta atinja o valor de 20,0% de humidade, partindo do valor 22,2%, sendo este menor do que se iniciasse com uma humidade de 23,0%. Encontra-se aqui uma limitação desta correlação, o facto de só se poderem comparar peças submetidas ao processo de secagem partindo do mesmo valor de humidade.

No entanto, a utilização desta correlação para prever os tempos de secagem da peça opus a várias temperaturas parece ser exequível e, embora careça de mais evidência experimental, será utilizada na determinação dos respetivos tempos de secagem a várias temperaturas.

Será estimado o tempo de secagem até ao valor de humidade de cerca de 15% (calculado no ponto 4.5.1), valor este correspondente ao valor de humidade no ponto crítico (humidade com que as peças podem abandonar a olaria sem riscos de defeitos). Na determinação do tempo de secagem para o protótipo, considera-se que a secagem se dá continuamente a 35°C (ou seja, não tem em conta que existem paragens noturnas). Os tempos resultantes estão apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4-Valor estimados para os tempos de secagem no protótipo para as temperaturas de 35°C, 45°C e 45°C

Temperatura de operação	Tempo de secagem estimado
35°C	17h45min
40°C	10h41min
45°C	7h15min

É evidente que, como estes valores advêm de resultados teóricos, deverá ser acrescida uma margem de segurança de pelo menos 17%, de modo a garantir que o valor de

humidade no ponto crítico seja efetivamente atingida, e que as peças estejam realmente em condições de serem enviadas para a estufa. Contudo, para efeitos de escolha da melhor temperatura de operação, serão usados estes valores.

4.5.4 Escolha das condições operatórias para o processo de secagem na olaria 1

Na tabela 4.5 está representado um resumo de todas as propriedades, tempo, consumo e contração, para a secagem de uma bacia tipo opus, a diferentes temperaturas. No anexo C, é apresentado o modo como se determinou o valor do consumo de gás natural.

Tabela 4.5-Resumo das propriedades de secagem (tempo, contração e consumo) de uma bacia, a diferentes temperaturas

Temperatura Descrição	T=35°C	T=40°C	T=45°C
Tempo de secagem	17h45min	10h41min	7h15min
Contração linear até a PC	1,99%	1,97%	2,06%
Consumos de gás natural (m ³⁶)	319,50	238,45	180,09

A temperatura que melhor se adequa para cumprir todos os requisitos necessários, à obtenção de uma secagem eficiente é a T=40°C. Para além do tempo e do consumo de gás necessário para a secagem das peças se situar numa posição intermédia em relação aos resultados obtidos para as restantes temperaturas, o comportamento de contração verificado até ao ponto crítico é o que apresenta um valor menor, pelo que as torna, por este motivo, menos suscetível ao aparecimento de defeitos.

Segundo Brosnan e Robinson (2003), Sokolov e Gak (1959), as propriedades empregues para a realização da secagem verde, para minimizar a ocorrência de defeitos, são normalmente temperaturas até 40°C e humidades superiores a 80% (relembrando que para o caso da olaria, a humidade não é controlada e apresenta oscilações entre 58% a 85%).

Irá ser, a partir do valor de humidade sugerido pelos autores anteriormente descritos, estudado o melhor valor de humidade a implementar na olaria 1. Para isso, traçou-se inicialmente, na carta psicrométrica representada na figura 4.11, o percurso da secagem atual, referente a um dia do mês de outubro.

O ponto 1 (24,5°C ; 65%), representa as condições do ar na olaria no momento em que são ligados os geradores de calor, pelas 24h. O ponto 2 (32,7°C ; 49%) representa as

⁶ Nas condições PTN

condições no instante em que as peças são desmoldadas, e por fim, o ponto 3 (33 °C ; 55%) apresenta as condições do ar no final do dia (até serem desligados os geradores de calor). Um novo ciclo é iniciado novamente no dia seguinte partindo do ponto 1, sendo este conseguido, partindo de 3, e procedendo à renovação e arrefecimento do ar durante o período em que os geradores permanecem desligados.

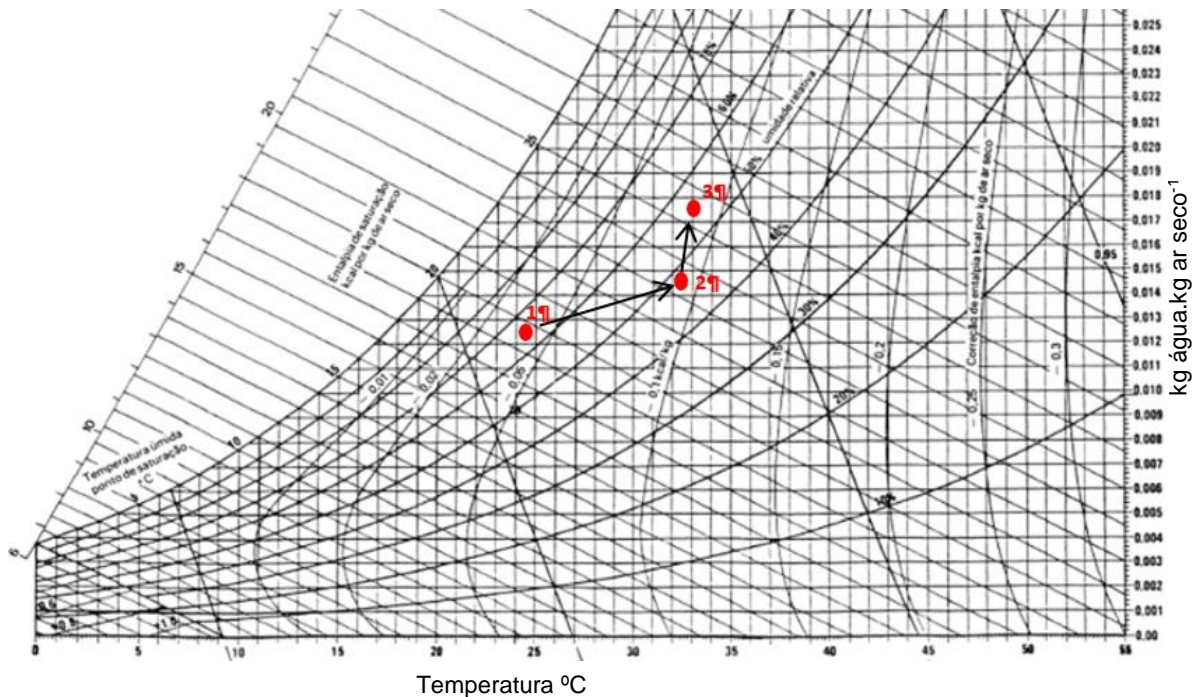


Figura 4.11-Propriedades psicrométricas do ar da olaria 1 durante a secagem realizada no dia sete de outubro

Durante um ciclo diário de secagem completo, o ar recebe cerca de 0,0054 kgágua.kgarseco⁻¹ ($X_3-X_1=0,0179-0,0125$). Este ganho é apenas resultante da saída de água das peças e moldes durante o respetivo processo de secagem. Assim, se a produção não apresentar grandes oscilações ao longo dos dias, pode-se afirmar que a quantidade de água recebida pelo ar é sempre a mesma. Partindo então deste valor, pode-se averiguar se este valor de humidade (80%) é adequado para implementar na olaria. Deste modo, partindo do valor de $X_r=80\%$, e da temperatura já determinada $T=40^\circ\text{C}$, foram, em primeiro lugar, determinadas as propriedades do ar (representado no ponto 4 da figura 4.12).

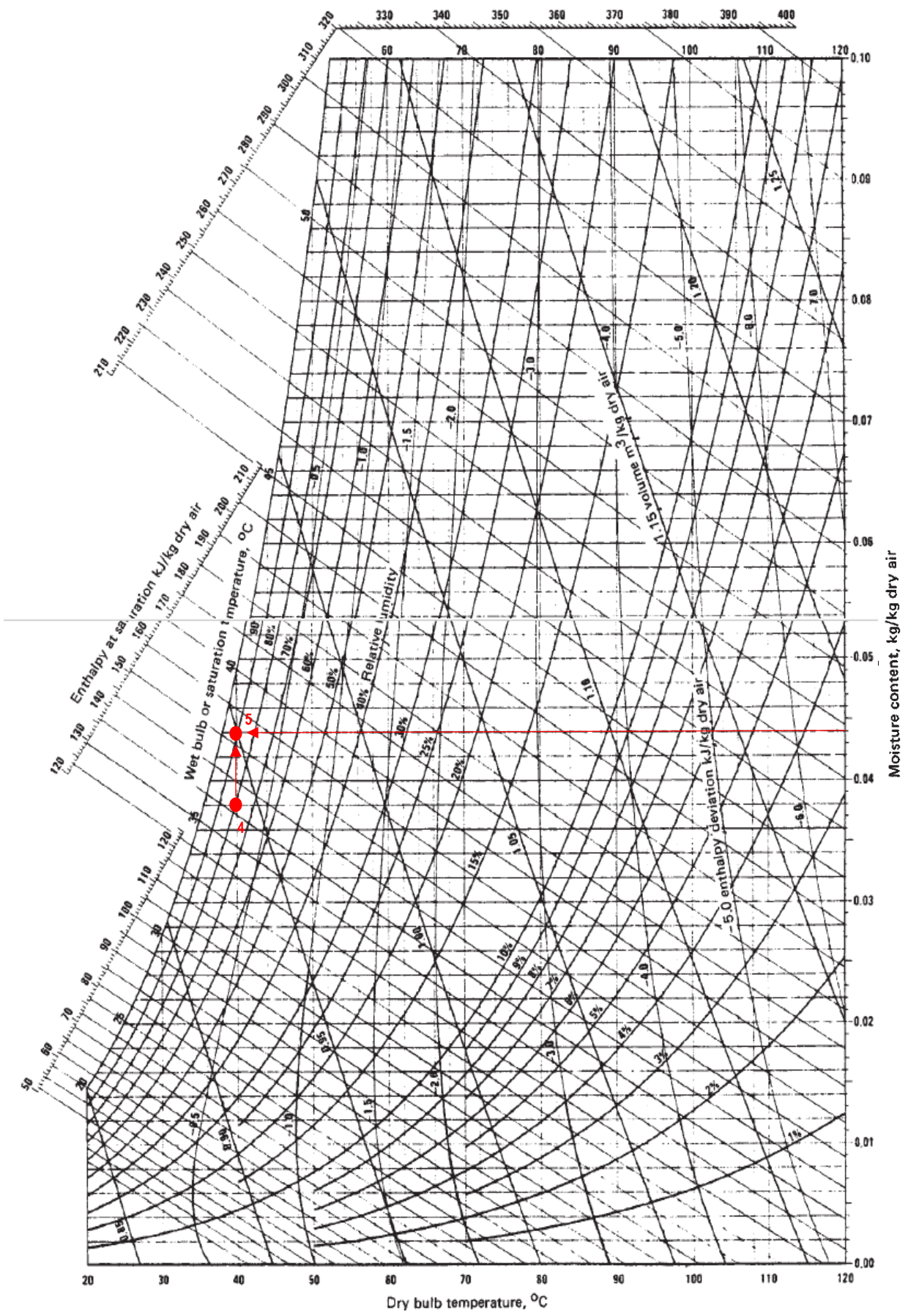


Figura 4.12-Propriedades psicrométricas do ar com o valor de humidade relativa sugerido

Após isto, verificou-se se, com o ciclo anteriormente descrito, haverá risco de condensação. Para isso, foi deslocado o ponto 4 na vertical (humidificação a temperatura constante), acrescentando-lhe os $0,0054 \text{ kg\textsubscript{água.kg\textsubscript{arseco}^{-1}}$. Este ponto encontra-se representado na figura 4.12, número 5. A humidade relativa final, no final do processo de secagem é de aproximadamente 90%, partindo de uma humidade relativa inicial igual a 80%. Neste caso não haverá riscos de condensação, mas sugere-se que se utilizem controladores de humidade, para salvaguardar este risco.

Com os valores de temperatura e humidade relativa definidos, resta apenas saber qual o melhor valor para a velocidade do ar. A existência de movimento do ar no interior da olaria é bastante importante, pois a sua constante renovação evita que se acumulem filmes de ar húmido à superfície das peças. Este filme terá uma concentração de água mais elevada, e pode mesmo ficar saturado, atingindo-se um equilíbrio, que impede o prosseguimento do processo de secagem. No entanto, velocidades do ar elevadas trazem também inconvenientes, uma vez que, uma renovação constante e rápida faz com que a taxa de secagem das peças seja elevada, conduzindo à formação de defeitos nas peças.

A velocidade do ar de secagem sugerida por Sokolov e Gak (1959), deve ser igual a $1,3 \text{ ms}^{-1}$ para implementar na fase inicial do processo de secagem.

Portanto, as condições sugeridas a implementar na olaria para a realização da secagem verde são: $T=40^{\circ}\text{C}$, $X_r = 80\%$ e $v=1,3 \text{ ms}^{-1}$. Estas condições deverão ser mantidas constantes e homogêneas até ao ponto crítico (15%), para evitar risco de formação de tensões que levam ao aparecimento dos defeitos mencionados. A partir deste valor as peças podem ser enviadas para as estufas, para que o processo de secagem seja acelerado e finalizado.

4.6 Formulação empírica de um modelo de secagem

Ainda através da análise dimensional, foi formulado um modelo empírico, expresso em termos de parâmetros adimensionais, capaz de prever a humidade de um sólido durante o processo de secagem.

Para a sua concretização, e partindo da equação 4.5, usaram-se os grupos adimensionais π_2 e π_3 , mas substituiu-se π_1 por um novo grupo, que corresponde à relação entre os valores de densidade do ar e do sólido.

$$X = a X_{ar}^b \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{sólido}} \right)^c \left(\frac{A_{sólido} \rho_{ar}}{t \mu_{ar}} \right)^d \left(\frac{T t^2 c p_{sólido}}{A_{sólido}} \right)^e \quad (4.8)$$

Relembra-se que, X_{ar} (humidade do ar) aparece agora na formulação, pois esta constitui já um grupo adimensional.

Os expoentes da equação foram calculados através do suplemento “solver” do Excel. Estes são resultado do ajuste que permite minimizar o desvio existente entre os vários valores de humidade, experimental e os previstos pela equação. As equações 4.9 a 4.11 são as expressões empíricas que permitem determinar a humidade de uma peça de *Vitreous china* para um dado tempo a partir das suas características e das propriedades do ar. Cada uma das equações referidas diz respeito a uma fase do processo de secagem.

Fase de secagem constante

$$X = 5,35 X_{ar}^{0,38} \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{sólido}} \right)^{0,0022} \left(\frac{A_{sólido} \rho_{ar}}{t \mu_{ar}} \right)^{0,025} \left(\frac{T t^2 c p_{sólido}}{A_{sólido}} \right)^{0,051} \quad (4.9)$$

$$X_i \leq X \leq 15\%$$

Primeira fase decrescente

$$X = 3,32 X_{ar}^{9,97 \times 10^{-5}} \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{sólido}} \right)^{4,10 \times 10^{-4}} \left(\frac{A_{sólido} \rho_{ar}}{t \mu_{ar}} \right)^{0,97} \left(\frac{T t^2 c p_{sólido}}{A_{sólido}} \right)^{0,0065} \quad (4.10)$$

$$15 \leq X \leq 8\%$$

Segunda fase decrescente

$$X = 11,17 X_{ar}^{0,001} \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{sólido}} \right)^{0,070} \left(\frac{A_{sólido} \rho_{ar}}{t \mu_{ar}} \right)^{1,86} \left(\frac{T t^2 c p_{sólido}}{A_{sólido}} \right)^{0,085} \quad (4.11)$$

$$15 \leq X \leq X_f$$

Onde:

$$\rho_{sólido} = 1817 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$A_{sólido} = 0,0030 \text{ m}^2$$

$$c p_{sólido} = 879 \text{ J.kg}^{-1} \text{K}^{-1} \text{ (Industry, 2016)}$$

$$\rho_{ar} = \text{Entre } 1,11 \text{ e } 1,13 \text{ kg.m}^{-3} \text{ (dependendo da temperatura do ar)}$$

$$\mu_{ar} = \text{Entre } 1,89 \text{E}^{-5} \text{ e } 1,93 \text{E}^{-5} \text{ Pa.s (dependendo da temperatura do ar)}$$

O ajuste entre os resultados experimentais pode ser observado nas figura 4.13 a 4.15, para as temperaturas 35°C, 40°C e 45°C respetivamente.

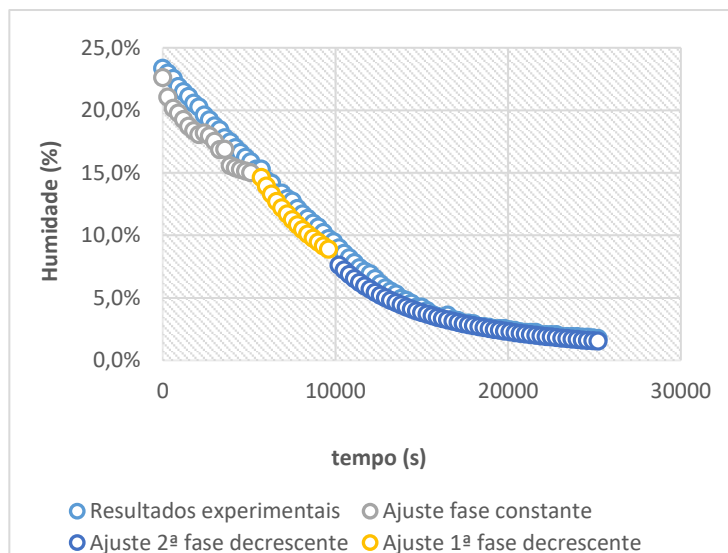


Figura 4.13-Ajuste do modelo aos resultados experimentais para T=35°C

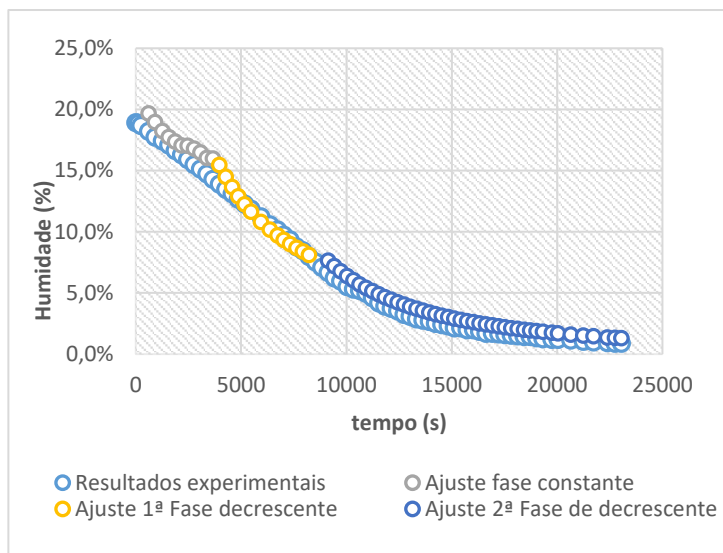


Figura 4.14- Ajuste do modelo aos resultados experimentais para T=40°C

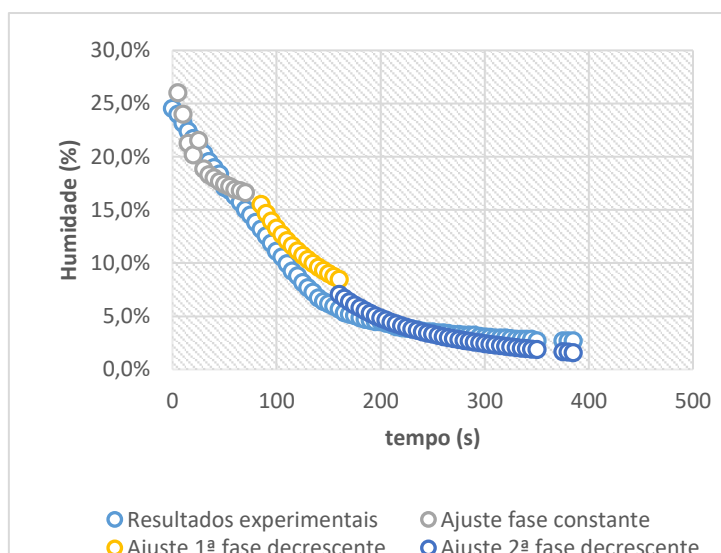


Figura 4.15- Ajuste do modelo aos resultados experimentais para T=45°C

A equação que descreve o início do processo de secagem é a referente à fase de secagem constante. Esta é aplicada até ao valor de humidade no ponto crítico ($\approx 15\%$). A partir deste valor utiliza-se a equação correspondente à primeira fase decrescente, para prever a humidade do sólido ao longo do processo de secagem. Esta expressão é empregue desde o valor de humidade crítica até aproximadamente o valor de humidade igual a 8%. A partir deste ponto, e até ao final do processo de secagem, é empregue a última expressão (segunda fase decrescente).

O cuidado na recolha dos resultados experimentais, nomeadamente dos valores da humidade do ar, são de extrema importância. Na realização deste trabalho, sentiu-se alguma dificuldade nas medições deste parâmetro, devido à sensibilidade dos equipamentos, o que poderá condicionar o ajuste obtido.

Este modelo foi apenas determinado para os ensaios experimentais realizados para o provete. Não foi possível verificar a sua aplicabilidade para a secagem das peças maiores, uma vez que as condições de secagem a que estas são submetidas (nomeadamente a temperatura) variam ao longo do processo de secagem. Para prever a humidade de um sólido ao longo do tempo, em estado não estacionário (condições reais de secagem), o modelo empírico terá que ser reformulado, fazendo variar também as condições de temperatura.

Para além de apresentar um ajuste razoável, a utilização deste modelo requer que previamente seja feito um estudo mais aprofundado e cuidado.

Capítulo 5

Otimização energética

A otimização energética consiste no aumento da eficiência, quer de processos, quer de equipamentos ou de ações. Dado estes estarem intimamente ligados com a má utilização de energia, o objetivo da otimização é reduzir os respetivos consumos, e consequentemente os custos a eles associados. Isto implica que sejam implementadas estratégias e medidas para combater os desperdícios de energia, que vão desde a sua transformação até à sua utilização.

Assim neste capítulo são apresentadas algumas medidas a aplicar, quer nos geradores quer na olaria, que são resultado do estudo efetuado e que levam à otimização energética e em simultâneo ao aumento da eficiência no processo de secagem.

5.1 Medidas de otimização a implementar nos geradores de calor

São aqui referidas algumas medidas que, a serem seguidas, podem conduzir à poupança de gás natural nos geradores. Estas são:

- Limpeza das superfícies de transferência de calor no interior dos geradores de calor;
- Limpeza das superfícies de transferência de calor dos geradores de calor;
- Manutenção do interior dos geradores de calor.

5.1.1 Limpeza das superfícies de transferência de calor no interior dos geradores de calor

Facilmente se observa que durante a ventilação (para o interior do gerador) do ar necessário, quer para a combustão, quer para aquecimento da olaria, entram partículas que são resultado da barbotina no estado seco (ver figura 5.1 e figura 5.2). A deposição destas partículas, quer no interior da camera de combustão, quer no interior do permutador de calor, faz com que se criem barreiras à passagem do calor. A existência destas resistências, que dificultam a transferência de calor, faz com que a quantidade de energia necessária para aquecer uma determinada quantidade de ar aumente.



Figura 5.1-Sujamento presente na entrada de ar para aquecimento da olaria



Figura 5.2-Sujamento presente na entrada de ar para a combustão

A presença de resistências de sujamento prejudica a transferência de calor, fazendo com que o calor transferido seja diminuído. Esta diminuição, de acordo com dados teóricos e calculados conforme o anexo D, pode variar entre 1% a 3%. Estes valores foram calculados considerando os valores de resistências típicos de sujamento sugeridos por Sinnott, (2009). Estes valores referenciados devem considerar apenas o que é mais frequente, que é, por exemplo, a formação de fuligem (para o caso da câmara de combustão). Mas, na realidade, os valores para as resistências poderão ser superiores aos valores referidos, uma vez que as partículas estão constantemente a ser introduzidas nos geradores e em quantidades consideráveis. Isto implica então, que a diminuição do calor transferido poderá ser maior que os 3%.

5.1.2 Limpeza das superfícies de transferência de calor dos geradores de calor

Outro problema que reside na olaria, que é de fácil resolução, e cuja implementação traz consequências positivas, tem a ver com a limpeza das condutas de distribuição do ar quente por toda a olaria (ver figura 5.3). Nestes casos, sugerem-se que sejam feitas limpezas, por exemplo anuais, nas condutas aéreas (através da aspiração ou sucção das partículas depositadas). No caso das condutas terrestres, sugere-se que sejam realizadas limpezas periódicas, uma vez que estas são de simples acesso comparadas com as descritas anteriormente.



Figura 5.3-Sujamento presente nas condutas terrestres de distribuição de ar pela olaria

5.1.3 Manutenção do interior dos geradores de calor

Facilmente se deteta, junto destes equipamentos (quando em funcionamento), que a sua superfície externa está a temperaturas bastante elevadas. Isto resulta da existência de correntes de ar quente que fluem do seu interior, e que tornam o espaço envolvente mais quente do que os restantes pontos ao longo da olaria. De modo a reduzir estas correntes, aconselha-se a que o interior destes equipamentos seja examinado, por forma a verificar a razão destas fugas. Qualquer dano, como furos ou rachas, que estes possam apresentar, poderão estar na base da existência destas correntes de ar que levam a um maior consumo de gás natural.

Se for possível, através da implementação destas medidas, alcançar uma redução nas perdas de, por exemplo 5%, 10% ou 15%, então anualmente conseguem-se poupanças de 960€, 1 848€ e 2 772€ respetivamente (ver anexo D).

A existência destas fugas de ar quente que provêm do interior dos geradores, apesar de poder ser um fator que leva a um maior consumo de gás natural, também contribui de algum modo para o aquecimento da própria olaria. No entanto, este aquecimento é muito localizado nos moldes e nas peças (os que estão mais perto desta zona dos geradores), podendo estas ser prejudicadas. Por outro lado, como o ar que está a ser ventilado para o interior dos geradores está mais quente, o seu aquecimento até ao

valor de setpoint requerido será feito de modo mais rápido do que se o mesmo entrasse a temperaturas mais baixas.

O inconveniente disto é que, como o valor do setpoint está a ser controlado pela temperatura do ar que envolve o gerador (ar mais quente), existirão gradientes de temperatura desde estes equipamentos até ao extremo oposto da olaria, provocando grandes gradientes térmicos numa zona que deveria ter uma temperatura também uniforme.

Este problema pode ser solucionado alternando as posições dos geradores, como representado na figura 5.4.

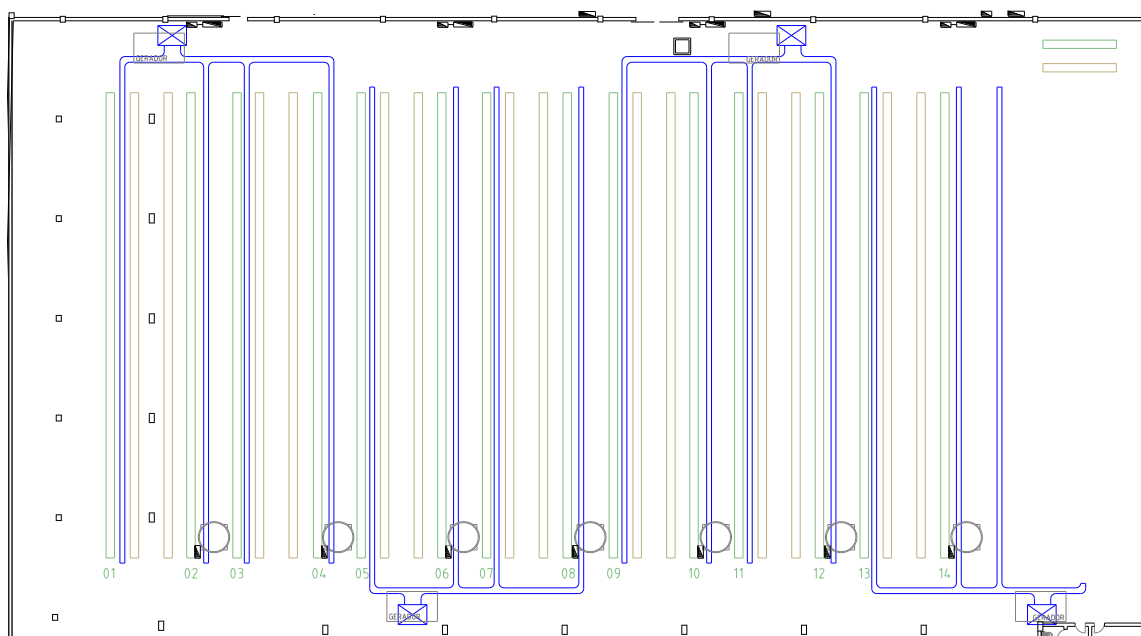


Figura 5.4-Reposicionamento dos geradores de calor na olaria

Esta medida contribui para que as temperaturas ao longo deste espaço sejam mais uniformizadas e que, por esta razão, sejam reduzidos os respetivos gradientes.

5.2 Medidas de otimização a implementar na olaria

Quanto mais energia se perde na olaria mais energia terá de ser nela introduzida, através de um maior aquecimento do ar, e por isso maior é o consumo de gás natural. Torna-se assim importante indicar medidas que possam tornar a olaria, e consequentemente o processo de secagem, mais eficientes.

As medidas sugeridas são:

- Isolamento da cobertura da olaria
- Alteração das condições operatórias de secagem

5.2.1 Isolamento da cobertura da olaria

Devido ao estado em que se apresenta a cobertura da olaria, sugere-se que esta seja substituída ou ainda isolada, para que se reduzam as perdas energéticas, e consequentemente o consumo de gás natural.

Neste ponto foi apenas estudada a hipótese do isolamento da olaria, escolhendo para tal o uso de painéis semi-rígidos de lã de vidro.

É importante referir que a escolha deste material poderá ser alterada, mas para efeitos de previsão de poupanças de gás natural, será estudada a viabilidade desta medida com o tipo escolhido.

As características do isolamento selecionado são: espessura 7,5 cm, condutividade térmica $0,0036 \text{ W.m}^{-1}\text{C}^{-1}$ e custo $5,99 \text{ €}.\text{m}^2$.

Foram avaliadas as perdas energéticas, quer no verão, quer no inverno, considerando as temperaturas mais adversas que ocorrem para estas épocas do ano, na região de Valadares. Todos os cálculos efetuados, que estão na base desta medida estão apresentados no anexo D.

Com a implementação desta medida, prevê-se uma poupança anual em gás natural de aproximadamente 22 324€, sendo este valor cerca de 64% inferior aos gastos em gás natural verificados sem isolamento. Foi calculado ainda o tempo ao fim do qual o investimento realizado é recuperado, ou seja, o *payback* do investimento. Para este tipo de isolamento, o valor obtido foi de cerca de 8 meses, um valor bastante reduzido para a recuperação do investimento.

5.2.2 Alteração das condições operatórias de secagem

Após a determinação do valor de humidade no ponto crítico foi feita uma reavaliação das condições de secagem atuais das peças opus no interior da olaria. Pode-se afirmar que o tempo de permanência das bacias no interior da olaria é relativamente superior ao necessário. Isto porque na realidade não é necessário um abaixamento da humidade até ao valor de 13%, mas sim até 15% (valor determinado para o ponto crítico). Em média, as peças atingem este valor de humidade no final do segundo dia / início do

terceiro, podendo estas peças ser retiradas deste ambiente no final do terceiro dia já com uma margem de segurança.

Repara-se também, através da observação da tabela 4.1, que a humidade de equilíbrio para as condições implementadas na olaria ronda os 0,7%-0,8%, sendo este valor de humidade, atingido na peça em questão, em média, após quatro a cinco dias, ou seja, no tempo de permanência atual. Este valor de humidade é praticamente igual ao obtido no final da secagem branca. Assim sendo, tendo as peças um tempo de permanência na olaria de cerca de quatro dias, no modo de operação atual, estas adquirem uma humidade perto da humidade requerida para a peça no final do processo total de secagem.

Há aqui uma situação que deve ser tomada em atenção, pois haverá uma oportunidade de redução de custos, por exemplo de gás natural, nas estufas que realizam a secagem branca.

Para obter elevada eficiência no processo de secagem (qualidade do produto, tempo de processamento e consumos) sugere-se que sejam implementadas na olaria 1 as condições de operação: $T=40^{\circ}\text{C}$, $Hr=80\%$ e $v=1,3 \text{ m.s}^{-1}$. Mesmo parecendo uma combinação de parâmetros teoricamente favorável, isto não implica que não sejam realizados testes ou ensaios laboratoriais que levem à sua verificação.

Existem duas grandes questões que surgem ao implementar estas novas condições na olaria. A primeira é que estas condições são bastante adversas, o que torna impossível a laboração num ambiente deste tipo, devido ao desconforto que se faz sentir (segundo o Artigo 11 do DL 243/86 de 20 de agosto, as boas condições de trabalho são atingidas para valores de temperatura compreendidos entre 18°C e 22°C , salvo em determinadas condições que poderá atingir os 25°C e para valores de humidade oscilantes entre 50% a 70%). Outro grande problema é que, na olaria em questão, manter quaisquer condições constantes ao longo do processo de secagem é impossível, devido à grande suscetibilidade que esta apresenta face às condições exteriores, como resultado do seu estado de degradação.

Deste modo, irá ser apresentada uma medida que possa, de algum modo, dar uma ideia para a construção da nova fábrica que a empresa está já a idealizar.

Assim sendo, o que se sugere é que a zona de secagem das peças seja limitada, por exemplo, através de um túnel de fole, como sugerido na figura 5.5.

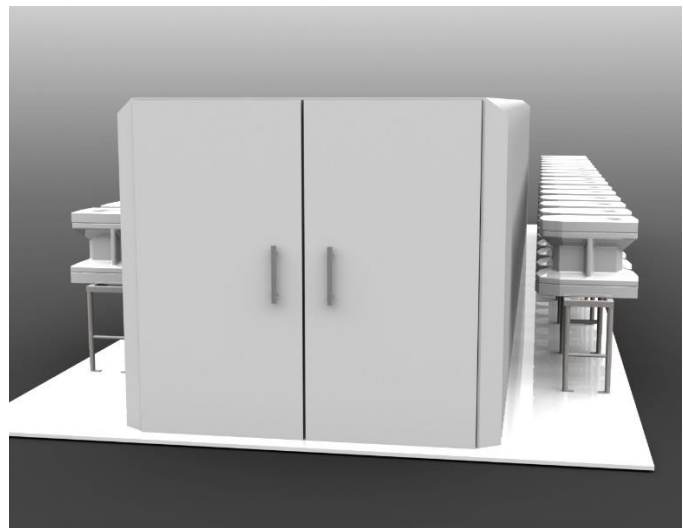
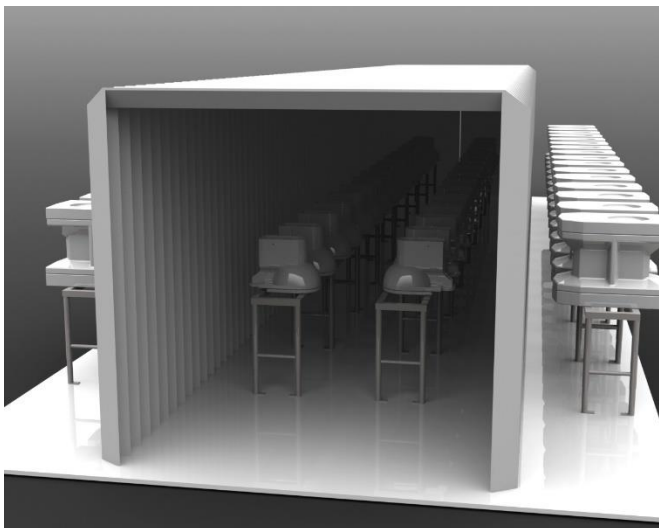
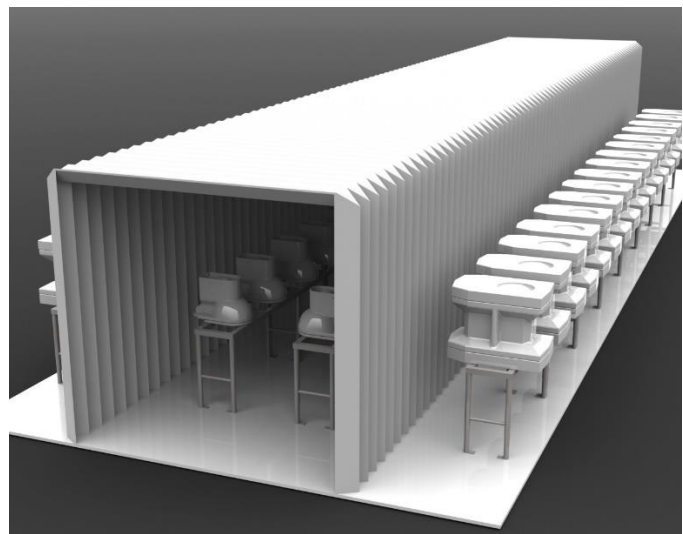
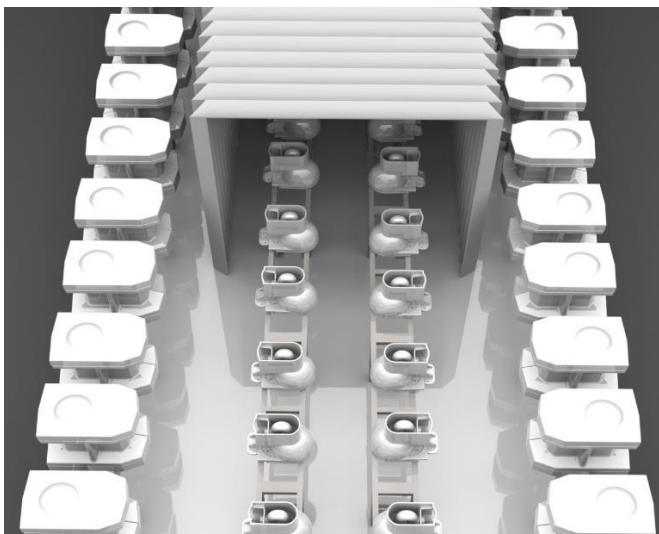
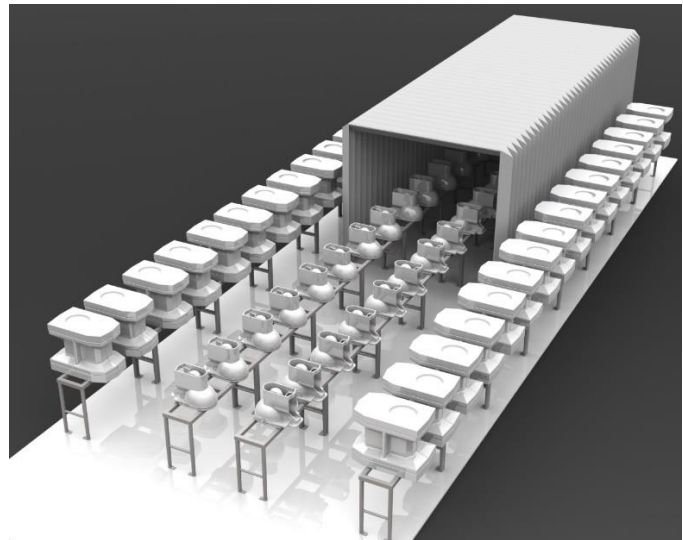
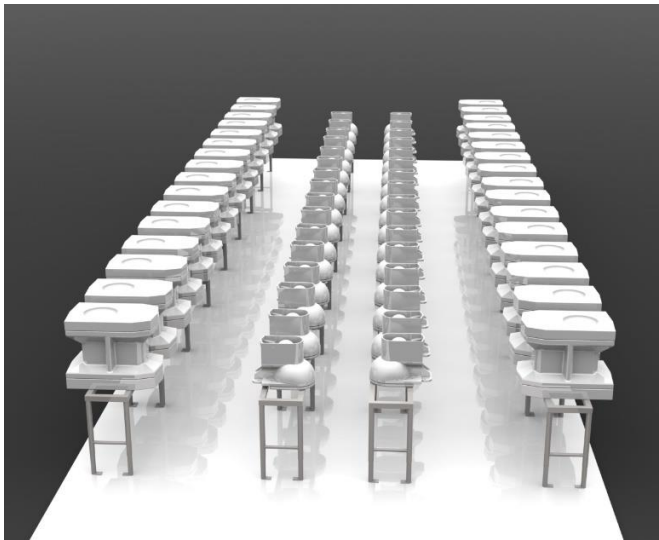


Figura 5.5-Sugestão a implementar na olaria, para efetuar a secagem das peças

Após desmoldagem das peças, as duas bancadas que se encontram paralelas seriam aproximadas uma da outra, para um espaço vazio que existe atualmente (o corredor) e posteriormente seriam cobertas com o fole. Em vários pontos no seu interior (por exemplo três, um em cada ponta e no meio), terá que existir controlo de temperatura, humidade e renovação do ar, de modo a tornar possível a homogeneização das condições em toda a área de secagem.

A restrição da zona de secagem traz inúmeras vantagens, que não estão por si só relacionadas com a criação de um ambiente favorável ao processo que nela decorre. A diminuição da área de secagem das peças permite também que a zona de aquecimento seja bastante menor, o que implica que os respetivos consumos de gás natural sejam menores do que aqueles que se têm observado. Para além da zona a aquecer ser menor, outra vantagem disto é que poderão ser implementadas diferentes condições de secagem, consoante a peça a secar. Teoricamente, na olaria, todas as peças são submetidas às mesmas condições. Mas a verdade é que o tempo de secagem e as condições podem variar de peça para peça.

É evidente que o aquecimento da olaria não pode ser esquecido, pois é importante proceder à secagem dos moldes para possibilitar a respetiva utilização.

Devido à constante necessidade de desumidificar o ar durante o inverno e de humidificar o ar no verão, torna-se importante incorporar nesta empresa um sistema de tratamento de ar adicional que permita alcançar tais condições. Para que isto seja possível, e devido à dificuldade que existe em ter o ar nas condições pretendidas para a operação de secagem, recomenda-se que seja estudada a hipótese da aquisição de uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA). Uma UTA é constituída por vários elementos, que em conjunto têm a função de tratar o ar consoante as necessidades requeridas. Devido à escassez de tempo na realização do presente trabalho não foi possível abordar mais este assunto, mas, no entanto, fica a ideia de que é possível impor e controlar as condições operatórias do processo de secagem, independentemente da estação do ano. Este sistema de condicionamento do ar torna possível alcançar as condições de operação para o processo de secagem.

5.3 Identificação medidas de redução das fugas de ar comprimido

Apesar de não estar definido nos objetivos deste trabalho, mas devido ao facto de as fugas de ar representarem uma parcela considerável no custo total de produção de ar

Uma vez que o compressor alimenta o armazém, este poderia também produzir o ar necessário para suprimir os consumos da carpintaria (circuito proposto representado a cor vermelho na figura 5.7). Já que o compressor possui capacidade para suprimir os consumos desta secção, esta seria uma medida bastante eficaz, uma vez que o circuito que o ar comprimido terá de percorrer para chegar aos utilizadores situados na carpintaria se torna bastante mais pequeno, e por isso menos suscetível a encaixes que poderão ter associados fugas.

Uma vez adotada esta medida, poder-se-á também proceder à desativação da linha que fornecia anteriormente o ar, através do fecho dos respetivos passadores (medida representada com traço de fecho vermelho). A desativação desta linha impedirá que esta seja colocada em sobressão, aquando da utilização do ar comprimido e reduzirá a probabilidade de fugas a ela associada.

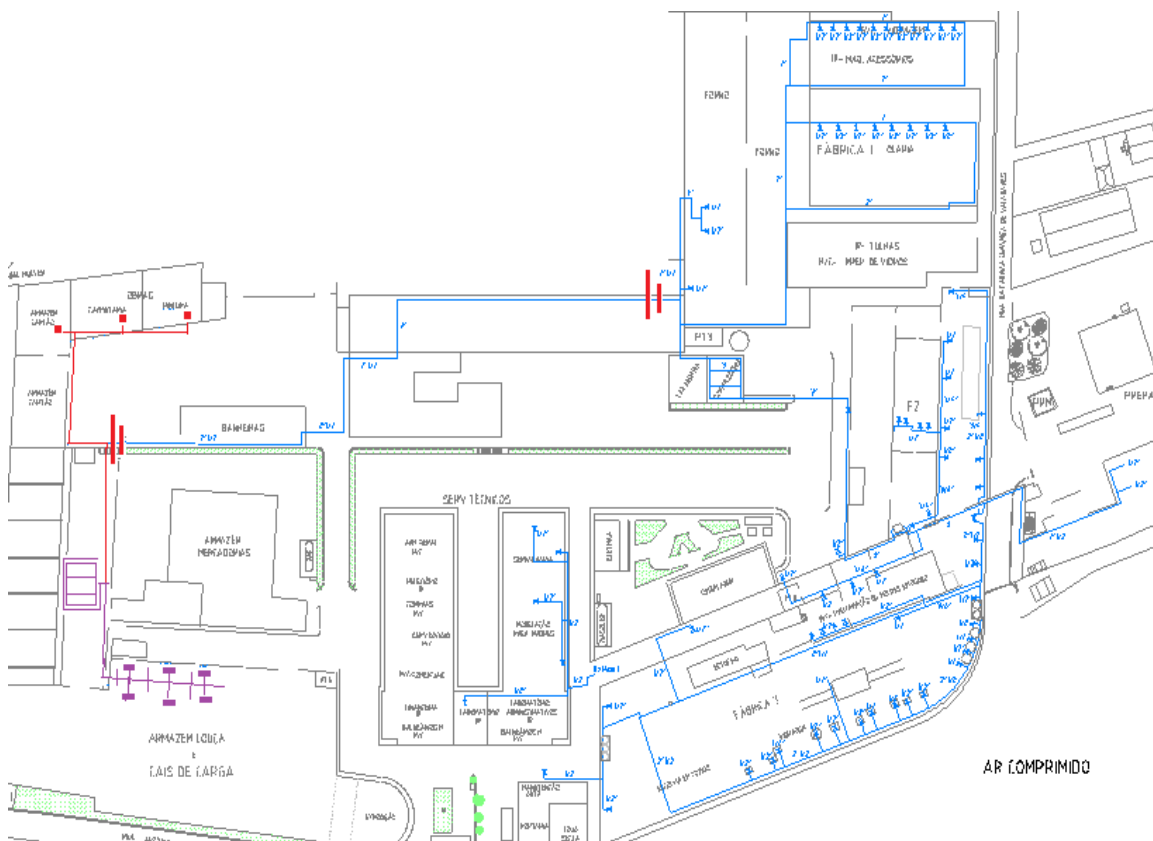


Figura 5.7 Layout geral da empresa com respetivo circuito de ar comprimido e medidas de eficiência a adotar na linha

Outra medida possível, no sentido de aumentar a eficiência na rede de distribuição geral para o ar comprimido, será o estudo de um novo posicionamento para o compressor (cor azul). Como resultado das progressivas modificações que têm existido na empresa, chegou-se a um ponto em que de momento a central de produção encontra-se descentralizada. Deslocar o compressor para perto da fábrica 2 ou adicionar outro compressor em funcionamento (uma vez que estes existem na empresa, mas estão

desativados), poderiam ser outras medidas no sentido do aumento da eficiência para este sistema.

Até aqui, foram propostas soluções de melhorias, para a instalação no seu todo, mas existem ainda inúmeras reparações a efetuar (nas diversas secções e nos respetivos utilizadores), bem como ações que podem ser tomadas para aumentar a eficiência na produção de ar comprimido.

Durante a realização deste trabalho foi detetada a existência de um grande conjunto de pontos de fugas (fugas estas apenas detetáveis ao ouvido humano). Estas fugas são essencialmente resultado de más ligações entre os acessórios (p.e os encaixes dos tubos com as pistolas) e da existência de tubos ou mangueiras partidos ou danificados. É então recomendado que sejam eliminadas ou reparadas estas anomalias, de maneira a que as fugas sejam reduzidas o máximo possível. Poderão ser também realizadas ações de sensibilização aos operadores. Esta prática terá como objetivo alertar todos os colaboradores da empresa acerca dos desperdícios resultantes das suas ações e incentivar a adoção de boas práticas, tais como: evitar a utilização desnecessária do ar comprimido, desativar as linhas que alimentam os utilizadores sempre que não se está a consumir esta utilidade, e comunicar de mediato após identificação, as fugas, de modo a que haja rápida intervenção.

Outra medida será a realização de inspeções em que se utilizem, sempre que possível, instrumentos sensíveis, como os detetores ultrassónicos. A deteção e manutenção dos locais de fugas terão que ser realizadas periodicamente, uma vez que vedações, tubagem e outros elementos que fazem parte do sistema de compressão, vão se deteriorando com o tempo e com o uso.

Foram ainda detetadas fugas em determinados pontos onde já não existe laboração, pelo que, para estes casos, se recomenda que sejam fechados todos os passadores (que fazem a ligação entre a linha principal e as linhas secundárias), de maneira a que os utilizadores de ar que estejam inativos não sejam postos em sobrepressão desnecessariamente.

Todas estas medidas são de fácil implementação pois não requerem qualquer custo de investimento inicial, sendo que a sua prática pode ter repercussões bastante positivas nos custos energéticos da empresa. Por exemplo, se com a implementação destas medidas, nas piores das hipóteses, se conseguisse uma redução das fugas de 10%, pode-se obter uma poupança mensal de aproximadamente 75€. Já numa visão mais otimista, mas ainda nada exagerada, se fosse conseguida uma redução de 40%, a

poupança mensal seria de cerca de 299€. Anualmente ⁷ a empresa poderá poupar entre 825€ a 3 289€, respetivamente, com as reduções nas fugas referidas, ver anexo D.

⁷ Considerando 11 meses ao ano

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

No presente trabalho teve-se a oportunidade de contabilizar, caracterizar e avaliar as várias utilidades energéticas consumidas na olaria, da empresa *ARCH* Valadares. Nesta empresa, tal como noutras que constituem o setor cerâmico, o apoio ao desenvolvimento de produtos energeticamente mais eficientes é fundamental para a sua evolução, de modo a fazer face aos desafios atuais.

Neste seguimento, inicialmente foi feito um levantamento energético. Esta informação permitiu caracterizar o panorama geral da utilização de energia na secção de estudo, tendo-se verificado grandes consumos de energia, maioritariamente de energia térmica, 68%, resultantes da combustão do gás natural. A energia elétrica apresentou menores consumos, sendo que cerca de 4% desta energia é utilizada na forma de ar comprimido. Os dados obtidos constituíram uma valiosa ferramenta, tornando a otimização do gás natural o foco principal deste estudo.

Assim, posteriormente foram calculadas as perdas térmicas associadas aos equipamentos que consomem gás natural, os geradores de calor. Os valores obtidos para as perdas térmicas em cada um dos geradores situaram-se entre 141 kW e 316 kW. Numa tentativa de otimizar estes equipamentos, foi sugerida a respetiva limpeza e manutenção, quer interior quer exterior, que levará a uma diminuição da resistência total de transferência de calor, e por isso ao aumento da potência transferida. Nesse sentido, foram previstas as poupanças anuais que se poderiam obter com a implementação destas medidas, estando estas situadas entre os 960€ e os 2 772€, para uma diminuição de perdas térmicas entre os 5% e os 15% respetivamente.

Devido ao seu estado de degradação, foi ainda sugerida a substituição e/ou isolamento da cobertura da olaria. Atualmente, para proporcionar condições no interior da olaria de $T=25^{\circ}\text{C}$ é necessário aquecer o ar nos geradores até cerca de $T=60^{\circ}\text{C}$. Se a olaria for isolada com painéis semi-rígidos de lã de vidro, a temperatura que será necessário aquecer o ar passará para valores na ordem dos 35°C , e os respetivos consumos em gás natural serão naturalmente menores, cerca de 64%. Com isto prevê-se uma poupança anual de aproximadamente 22 324€ com um período de retorno do investimento de cerca de 8 meses.

Como a secagem é uma operação bastante delicada, e que determina a qualidade das louças sanitárias, foram reavaliadas as respetivas condições do ar na olaria 1, bem como a humidade crítica das peças *Vitreous China*. As condições que permitem obter

peças com boa qualidade, a uma velocidade requerida pelo processo global e com custos aceitáveis para o produtor são: $T=40^{\circ}\text{C}$, $Hr=80\%$ e $v=1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A humidade crítica determinada foi de 15%, valor que depois de atingido permite que as peças estejam em condições de serem enviadas para as estufas, de forma a acelerar o processo de secagem, sem riscos de aparecimento de defeitos nos respetivos produtos. Foi também formulado um modelo empírico, com o objetivo de prever a variação de humidade das peças ao longo de todo o processo de secagem, partindo de parâmetros adimensionais. Este modelo poderá revolucionar os métodos usados em cerâmica, podendo vir a tornar-se numa ferramenta bastante útil nesta área. No entanto, este carece de um estudo mais aprofundado para averiguar a sua aplicabilidade.

Como a empresa está a idealizar a construção de uma nova fábrica, foram indicadas algumas sugestões que poderão ser avaliadas e colocadas em hipótese no seu projeto. A primeira seria a limitação da zona de secagem, através de um túnel de fole. Esta solução apresenta várias vantagens, que vão desde poupanças obtidas em gás natural até à criação de um ambiente constante que torna favorável o processo de secagem. É sugerido também que sejam adquiridos sistemas de controlo, principalmente de humidade, pois este controlo não existe na fábrica atual. É ainda sugerido que seja estudada a hipótese da aquisição de uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA) que permita condicionar o ar de acordo com as condições pretendidas.

Por fim, e em resultado do levantamento energético efetuado, foram verificados grandes custos energéticos associados à existência de fugas de ar comprimido no sistema. Em detrimento disto, foram sugeridas várias medidas que abrangem não só alterações na rede de distribuição, como também reparações, que poderão ser feitas nos vários utilizadores dispostos por toda a empresa. Neste ponto, foram também previstas poupanças anuais de 825€ a 3 289€ se a percentagem de redução de fugas for de 10% a 40% respetivamente.

Para complemento deste trabalho sugere-se:

- Que sejam feitas caracterizações e avaliações ao modo como a energia é gerida nas outras secções, principalmente nas restantes olarias e nos fornos, de modo a tornar o consumo de gás natural mais eficiente;
- A realização de ensaios de secagem experimentais, semelhantes aos efetuados, mas numa instalação que permita o controlo e a variação das condições de humidade relativa e velocidade de circulação de ar, de maneira a que se possa avaliar a influência destes três parâmetros em conjunto;

- A realização de mais ensaios experimentais, com provetes de diferentes tamanhos e submetidos a diferentes condições de secagem, no sentido de verificar a aplicabilidade do modelo empírico formulado.

Bibliografia

Althouse, AD and CH Turnquist, 1956, " Modern refrigeration and air conditioning."

Angenitskaya R.B, 1974, "A Study of the kinetics mechanism of the drying process in ceramic materials" *Glass and Ceramics* 31(12) 864-866

APREN, 2016, "Roteiro das Energias Renováveis" Associação de Energias Renováveis, Retirado em 16/08/2016 a partir de <http://www.apren.pt/pt/dadostecnicos/index.php?id=166&cat=35>

ARCH, 2016, "Catálogo 2016 ARCH Valadares"-Advanced Research Ceramic Heritage

Ayache, J, et al., 2010, "Introduction to materials-Sample Preparation Handbook for Transmission Electron Microscopy: Methodology", New York, Springer:3-31

Brosnan, D.A and G.C. Robinson, 2003, " Introduction to Drying of Ceramics: With Laboratory Exercises, Wiley."

Carter,C.B and M.G Norton, 2013, "Ceramic Materials-Science and Engineering" Springer Verlag, New York: XXXIII, 766

Clima Data, "Dados climáticos para cidades mundiais",2016, Acedido em 30/10/2016 a partir de <http://pt.climate-data.org/location/1045188/>.

Coulson, J. and J. Richardson, 1974, "Tecnologia Química-Volume I: Fluxo de fluídos, transferência de calor e transferência de massa." Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

DGEG, 2016, "Energia/Ambiente/Desenvolvimento Sustentável" Direção Geral de Energia e Geologia, Retirado em 16/08/2016 a partir de <http://www.dgeg.pt/>

DGEG, 2016, "Energia em Portugal 2014" Direção Geral de Energia e Geologia

ERSE, 2008, "Guia de medição, leitura e disponibilização de dados do setor do gás natural"-Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Retirado em 3/06/2016 (versão PDF)

Europa 2020, 2014, "Ponto de situação das metas em Portugal" Estratégia Europa 2020, Retirado em 20/08/2016 (versão PDF)

Ferreira, J.M.D.F, 1992, "A interface carboneto de Silício-Solução aquosa e o enchimento por barbotina", Tese de Doutoramento em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade de Aveiro, 407pp

Fonseca, Pires, et al., 2015, "Plano Sectorial de Melhoria da Eficiência Energética em PME", EFINERG-Eficiência Energética na Indústria, Retirado em 20/08/2016 (versão PDF)

Hinrichs, R.A and M.Kleinbach, 2003, "Energia e meio ambiente", Cengage Learning Editores, 708 pp

Industry C, 2016, "Ceramic Materials Properties Charts", Acedido em 15/10/2016 a partir de

<http://www.ceramicindustry.com/ceramic-materials-properties-charts>

Kowalski S. and A. Pawlowski, 2010, "Drying of wet materials in intermittent conditions." *Drying Technology*, 28 (5): 636-643

Ebru Mancuhan, Selin Özen, Perviz Sayan, and Sibel Titiz Sargut, 2016, "Experimental investigation of green brick shrinkage behavior with Bigot's curves." *Drying Technology*, 34(13): 1535-1545.

Mangueijo, V., et al., 2011, "Medidas de Eficiência Energética aplicáveis à Indústria Portuguesa", EFINERG- Eficiência Energética na Indústria, Retirado em 20/08/2016 (versão PDF)

Melo L. D, 1979, "Secagem de Sólidos", Departamento de Engenharia Química.

Mujumdar A. S, 1980, "Advances in Drying". H. P. Corporation

Novais J. 1995 "Ar Comprimido Industrial: Produção, Tratamento e Distribuição. Lisboa, Fundação Caloust Gulbenkian, 704 pp.

Perry R. H. and D. W. Green, 1998, " Perry's Chemical Engineers' Handbook", McGraw-Hill, 2736 pp.

Portugal 2020, 2016, "Tema 1-Informações gerais sobre o Portugal 2020", retirado em 16/08/2016 a partir de: <https://www.portugal2020.pt>

Reh, H., 2007, "Current Classification of Ceramic Materials-Extrusion in Ceramics" F. Händle, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 35-57.

Schwarz Henrique, 2007, "Energia, Geopolítica e a Política da Biosfera" Nação e Defesa:7-29

Silval, 2013, "Gesso Cerâmico SILVAL.", Retirado em 19/10/2016 a partir de http://sival.pt/img/cms/pdfs/fichas_tecnicas_pt/cer%C3%A2mico_1.pdf

Smith W. L, McCabe. J. C. and P. Harriott, 1993, "Unit Operations of Chemical Engineering". M.H. International, 1554 pp

Smith, W. F., et al., 1998, "Tecnologia Química: Fluxo de fluidos, Transferência de Calor e Transferência de Massa" 3ª Edição, Lisboa, Editra McGraw-Hill de Portugal, 593 pp

Sinnott, R.K, 2009, Chemical Engineering Design: SI Edition, Vol 6 Elsevier, 1055 pp.

Sokolov P. and B. Gak, 1959, "Accelerating the drying of sanitary ware." Glass and Ceramics 16(10):561-565

Tom Landon, B.L and Ibis Lilley, 2010, "Fine Fireclay: Great Expectations", Acedido em 15/10/2016 a partir de <http://www.ceramicindustry.com/articles/91333-fine-fireclay-great-expectations>

Valadares, A., 2016, "História desde 1921", Retirado em 21/04/2016 a partir de <http://archvaladares.com/historia/>.

Rockwool, 2016, "Tabela de preços", Retirado em 06/11/2016 a partir de http://download.rockwool.es/media/444227/tarifa_ROCKWOOL_2016_pt.pdf

Anexos

Anexo A-Resultados obtidos no levantamento energético

A.1 Determinação do consumo de energia elétrica na olaria 1

O consumo elétrico na olaria 1 para os dois meses de análise foi praticamente o mesmo. O seu valor médio, foi de 11 200 kWh (para os dois meses). O custo médio de uma unidade de kilowatt foi retirado das respetivas faturas elétricas, assim como o custo médio mensal total desta utilidade, sendo estes igual a aproximadamente 0,207€.kWh⁻¹ e 13 961€ respetivamente. O custo médio mensal desta utilidade na olaria 1 foi igual a 2 318€, representando assim cerca de 17% do total.

A.2 Determinação do consumo de ar comprimido

A.2.1 Na empresa

Com o objetivo de prever os custos mensais associados à compressão do ar, foi necessário conhecer o respetivo tempo em carga e em vazio, assim como a potência do compressor exibida em cada um destes períodos. O tempo de carga e o tempo total foram lidos diretamente no compressor. O tempo em vazio é resultado da diferença entre estes dois últimos valores. Os valores da potência do compressor em carga e vazio (66 kW e 48kW respetivamente) foram calculados com base nos valores medidos da diferença de potencial e intensidade de corrente. As medições foram feitas diretamente no compressor, com o auxílio de um multímetro. Assim, partindo destes valores e tendo o custo unitário da energia elétrica (anteriormente referido), foi possível quantificar monetariamente os consumos de ar comprimido na empresa. Todos estes resultados estão apresentados na tabela A.1.

Onde a percentagem de energia elétrica correspondente à produção de ar comprimido é calculada através:

$$\frac{1\ 928}{13\ 961} = 14\%$$

Tabela A.1- Resultados obtidos e calculados usados na determinação da parcela de ar comprimido consumido, em relação ao consumo elétrico total

Descrição	Mês		
	maio	junho	média
Tempo em que o compressor esteve em carga (min)	3 664	4 498	4 081
Tempo em que o compressor esteve em vazio (min)	5 017	7 026	6 021
Custo energético associado à compressão (€)	1 667	2 190	1 928
Parte da energia elétrica utilizada na produção de ar comprimido (%)	12	16	14

Deteção das fugas de ar comprimido

A deteção das fugas de ar foi realizada exclusivamente durante o período de almoço, período este que vai desde as 12h30 min até às 13h30 min e que corresponde ao período onde garantidamente não existe consumos de ar pelos utilizadores. De maneira a garantir uma margem de segurança, o procedimento foi efetuado num período mais curto, ou seja, um pouco mais tarde da hora de saída e um pouco mais cedo da hora de entrada. A partir de todos os dados recolhidos para os dois meses foi calculado o caudal médio de fugas recorrendo à equação 3.1. O valor obtido foi de $1,25\text{m}^3.\text{min}^{-1}$.

Foi calculado posteriormente o volume mensal de ar comprimido desperdiçado nas fugas. Este foi calculado recorrendo à equação 3.2. De seguida foi estimada a percentagem mensal de fugas, através da equação 3.3. Por fim, foram também calculados os custos associados a estas fugas. Todos estes resultados são apresentados na tabela A.2.

Onde a percentagem de fugas pode ser obtida através do cálculo:

$$\frac{12\ 627}{32\ 645} = 39\%$$

Tabela A.2-Resultados obtidos e calculados, usados na quantificação da percentagem e dos custos associados às fugas de ar comprimido

Descrição	Mês		
	maio	junho	Média
Tempo total de funcionamento do compressor (min)	8 680	11 524	10 102
Quantidade de ar comprimido perdido nas fugas (m3)	10 850	14 404	12 627
Quantidade total de ar comprimido produzido (m3)	29 309	35 981	32 645
Parcela correspondente às fugas relativamente ao ar comprimido total produzido (%)	37	40	39
Custo do ar comprimido perdido nas fugas (€)	617	876	746

A.2.2 Na Olaria 1

Para a determinação do consumo mensal de ar comprimido pela olaria 1, foram seguidos alguns passos, apresentados de seguida:

1. Verificar o período de vazamento

O período de vazamento foi estimado através da visualização, em cada painel eletrónico (que estão inseridos em cada bateria) o respetivo tempo de início e fim. Simultaneamente, foi também registado o número de peças vazadas em cada bateria. Posteriormente a isto, definiu-se o período de vazamento, como sendo o tempo total que abrange todos os vazamentos, ou seja, o tempo desde o início do primeiro vazamento até ao tempo do último vazamento.

2. Registos no compressor no início do período de análise

Após ter conhecido o início do vazamento, o passo seguinte consistiu em visualizar e registar o tempo de carga e funcionamento do compressor que marcavam o início deste período. Posteriormente a isto, o procedimento teve seguimento na secção de vidragem.

3. Determinação do consumo de ar comprimido na secção de vidragem

A etapa seguinte consistiu em cronometrar o tempo de vidragem das peças. Foi apenas cronometrado o tempo de vidragem de uma peça de cada tipo. Esta análise foi realizada em todas as cabines de vidragem em funcionamento.

O tempo total de vidragem define o tempo total de utilização de ar por esta secção. Assim, através da multiplicação deste valor pelo valor médio de consumo de ar

comprimido pelas pistolas ($30,50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), facilmente se obteve o consumo desta utilidade nesta secção para o intervalo de tempo referido.

O passo seguinte foi realizado nas restantes olarias (2 e 2.2).

4. Registos efetuados nas olarias 2 e 2.2

Neste ponto foram registados o número de peças vazadas nestas duas olarias durante o período mencionado.

5. Registos no compressor no final do período de análise

O último passo deste procedimento consistiu em verificar novamente, junto do compressor, o respetivo tempo de carga e de funcionamento que marcavam o final do período do vazamento.

É importante realçar que o consumo de ar que é apresentado diz apenas respeito ao período de vazamento, pois este representa a grande fatia dos consumos de ar comprimidos na olaria. Existem consumos de ar nos restantes períodos do dia, mas estes são muito inferiores quando comparados com os consumos verificados durante os vazamentos das peças. Na tabela A.3 são apresentados os resultados obtidos para o consumo mensal desta utilidade, em cada uma das secções.

Tabela A.3-Resultados obtidos referentes aos consumos de ar comprimido por cada secção no período de vazamento

Descrição	Mês		
	maio	junho	média
Consumos totais de A.C registados na hora dos vazamentos (m^3)	4 430	7 197	5 814
Consumos totais de A.C pelas fugas (m^3)	1 640	2 850	2 245
Ar comprimido efetivamente consumido (m^3)	2 790	4 347	3 568
Ar comprimido consumido pela secção da vidragem (m^3)	753	1 392	1 073
Ar comprimido consumido pela Olaria 1 (m^3)	1 510	2 144	1 826
Ar comprimido consumido pela Olaria 2 (m^3)	445	595	520
Ar comprimido consumido pela Olaria 2.2 (m^3)	85	215	150
Parcela correspondente ao consumo de ar comprimido da olaria 1 relativamente ao consumo total durante o período de vazamento (%)	54%	49%	51%
Custo associado à produção de ar comprimido e gasto apenas na Olaria 1 (€)	86	131	108

Os cálculos foram feitos para todas as secções, no entanto, só são aqui apresentados os resultados do consumo (em %) e do custo desta utilidade, apenas para a olaria 1. Onde a percentagem de ar comprimido consumido na olaria 1, em relação ao consumo total, pode ser calculada através de:

$$\frac{1\ 826}{3\ 568} = 51\%$$

A.3 Determinação do consumo de gás natural na olaria 1

Os consumos de gás em cada gerador foram obtidos através dos registos efetuados diariamente ao longo dos meses de maio e junho. Pelo facto destes registos se encontrarem nas condições de escoamento (condições a que o gás natural se encontra no momento da medição), tiveram que ser previamente convertidos, todos estes volumes, nas condições de referência, de acordo com a equação A.1. As condições de referência são o valor de temperatura igual a 0°C e de pressão igual a 1atm (ERSE, 2008).

$$V_{GN} [m^3(ref)] = V_{GN} [m^3(esc)] \times F_{c.T} \times F_{c.P} \quad (A\ 1)$$

Onde:

$$F_{c.T} = \frac{273,15}{273,15 + T_{GN}}$$

$$F_{c.P} = \frac{1,01325 + P_{GN}}{1,01325}$$

A fim de converter o volume de gás natural em energia (kWh), foi tido em conta o valor energético do gás natural, o Poder Calorífico Superior (PCS). Foi utilizado o valor médio do PCS lido nas respetivas faturas energéticas, sendo esse valor aproximadamente igual a PCS=11,66 kWh.m⁻³.

É importante lembrar que, pelo facto de apresentarem modos de funcionamento diferentes da noite para o dia, os resultados apresentados para os geradores 2 e 3 serão também repartidos nestes dois modos.

Na tabela A.4, são apresentados todos os resultados obtidos. Nesta, todos os volumes de gás natural apresentados, estão referidos às condições de referência.

Tabela A.4-Consumos de gás natural por gerador para os meses de maio e junho

Descrição	Mês		
	maio	junho	média
Consumos de G.N para o gerador 1 (m ³)	297	1 956	1 126
Consumos de G.N para o gerador 1 (kWh)	3 463	22 806	13 129
Consumos de G.N para o gerador 2 (noite) (m ³)	994	1 108	1 051
Consumos de G.N para o gerador 2 (dia) (m ³)	150	435	292
Consumos de G.N para o gerador 2 (kWh)	13 339	17 991	15 659
Consumos de G.N para o gerador 3 (noite) (m ³)	994	1 108	1 051
Consumos de G.N para o gerador 3 (dia) (m ³)	150	435	292
Consumos de G.N para o gerador 3 (kWh)	13 339	17 991	15 659
Consumos de G.N para o gerador 4 (m ³)	2 157	2 282	2 219
Consumos de G.N para o gerador 4 (kWh)	25 151	26 608	25 774
Consumo total de Gás Natural (m ³)	4 741	7 323	6 032
Consumo total de Gás Natural (kWh)	55 280	85 386	70 333

Devido a uma avaria mecânica existente no contador de gás do gerador número 3, não foi possível quantificar o respetivo consumo. Mas, como o modo e o tempo de funcionamento deste gerador é igual ao do gerador número 2, foram considerados os consumos iguais para os dois meses de análise.

O custo energético de gás natural médio para os dois meses de estudo, é de aproximadamente 24 136€ (0,045€/kWh⁻¹). O custo mensal associado ao consumo desta utilidade na olaria 1 é aproximadamente igual a 3 165€.

Anexo B-Balço energético aos geradores de calor

Para o cálculo do balanço energético foi considerado como estado de referência ($H_{ref} = 0$) para $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$

O exemplo de cálculo que será apresentado é apenas referente ao gerador de calor numero quatro. O cálculo das perdas nos restantes equipamentos é feito de modo análogo.

Cálculo da Entalpia do gás natural (H_{GN}):

$$H_{GN} = \dot{m}_{GN} \times cp_{GN} \times (T_{GN} - T_{ref}) \quad (kW) \quad (B1)$$

Como $T_{GN} = T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$ o valor da entalpia para o Gás Natural é: $H_{GN} = 0$

Cálculo da entalpia do ar usado para a combustão ($H_{Ar.Comb.}$):

$$H_{Ar.Comb.} = \dot{m}_{Ar.Comb.} \times cp_{Ar.Comb.} \times (T_{Ar.Comb.} - T_{ref}) \quad (kW) \quad (B2)$$

Foi necessário determinar o caudal mássico do ar usado na combustão ($\dot{m}_{Ar.Comb.}$). Para isso, foram feitas medições de velocidade do ar ($v_{Ar.Comb.}$), em duas zonas na secção de entrada M_1 e M_2 , ver figura B.1. A velocidade foi medida com um anemómetro e foram feitas sete medições, com cinco réplicas em cada uma das zonas. Foram também registados, nos respetivos dias de medições, o valor da temperatura do ar de entrada, com o auxílio de um termopar. Todos estes registos encontram-se evidenciados na tabela B.1.

A velocidade média do ar que entra para a combustão é igual a $\overline{v_{Ar.Comb.S_1}} = 5,87 \text{ m.s}^{-1}$ e $\overline{v_{Ar.Comb.S_2}} = 5,46 \text{ m.s}^{-1}$ para a zona M_1 e M_2 respetivamente.

Encontra-se esquematizado na figura B.1, a secção por onde entra o ar, com as respetivas zonas M_1 e M_2 onde foram efetuadas as medições. Como se contata, esta secção contem uma espécie de grelha, sendo que esta não foi considerada no cálculo da respetiva área.

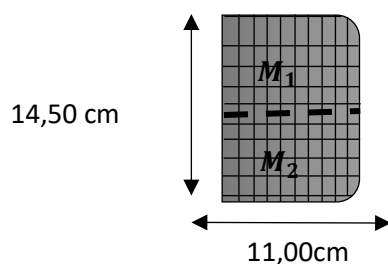


Figura B.1-Representação da secção do ventilador, por entra o ar que será usado como comburente na combustão

Tabela B.1-Valores medidos de temperatura e velocidade à entrada do ar utilizado na combustão

Nº Medições		1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (°C)		32	33	33	32	33	33	32
Zona de medição	Réplicas	Velocidade do ar de combustão à entrada, em diversos pontos (m.s ⁻¹)						
M ₁	1	5,28	6,42	6,24	5,79	5,73	5,53	6,01
	1	5,97	6,02	5,90	5,85	6,32	5,57	6,03
	3	6,25	5,93	5,98	5,81	5,80	5,22	5,94
	4	6,16	5,80	5,57	5,79	6,21	-	-
	5	6,01	6,21	6,02	5,44	5,90	-	-
Média		5,93	6,08	5,94	5,74	5,99	5,44	5,99
M ₂	1	5,04	5,46	5,02	5,97	5,76	5,32	5,91
	2	5,68	5,35	5,82	5,42	5,45	5,44	6,03
	3	5,54	5,53	5,47	5,31	4,9	5,53	5,05
	4	5,49	5,34	5,5	5,21	5,72	-	-
	5	5,41	5,38	5,89	4,98	5,09	-	-
Média		5,43	5,41	5,54	5,38	5,38	5,43	5,66

As áreas das duas secções são iguais e o seu respetivo valor é $M_1 = M_2 = 0,0075 \text{ m}^2$

Posto isto, foi posteriormente calculado o respetivo caudal volumétrico ($\dot{v}_{Ar.Comb.}$):

$$\dot{v}_{Ar.Comb.} = 5,87 \times 0,0075 + 5,46 \times 0,0075 = 0,084 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Para a obtenção do caudal mássico, seria necessário conhecer o valor da densidade do ar ($\rho_{Ar.Comb.}$). Esta foi calculado tendo em conta a temperatura média medida desta corrente de entrada ($T_{Ar.comb.}$).

Para $T_{Ar.comb.} = 305,75 K$, $\rho_{Ar.Comb.} = 1\ 154\ g.m^{-3}$

$$\dot{m}_{Ar.Comb.} = 0,084 \times 1\ 154 = 97\ g.s^{-1}$$

Foi ainda necessário determinar a entalpia específica do ar de combustão. através da equação B.3.

$$\int_{T_{ref}}^{T_{Ar.comb.}} 6,713 + 0,04697 \times 10^{-2} T + 0,1147 \times 10^{-5} T^2 dT \quad (B3)$$

$$= 7,78\ J.g^{-1}$$

A entalpia associada ao ar de combustão é então:

$$H_{Ar.Comb.} = 97 \times 7,78 = 755\ J.g^{-1} \approx 0,8\ kW$$

Cálculo da entalpia do ar que irá ser aquecido no gerador para aquecer a olaria 1 ($H_{Ar.Aquec.}$):

A entalpia do ar que serve como fonte de calor à olaria 1 foi calculada acoplado a diferença entre a entalpia do ar frio à entrada e a entalpia do ar quente à saída equação B.4.

$$H_{ArQ} - H_{ArF} = H_{Ar.Aquec.} = \dot{m}_{Ar.Aquec.} \times cp_{Ar.Aquec.} \times (T_{ArQ} - T_{ArF}) \quad (kW) \quad (B4)$$

Tal como para o ar que entra na combustão, para a determinação do caudal mássico do ar que irá aquecer a olaria, $\dot{m}_{Ar.Aquec.}$, foram feitas medições de velocidade em oito zonas distintas, de Z1 a Z8, ver figura B.2. A secção de entrada do ar é também constituída por uma espécie de grelha, sendo que esta foi também desprezada no cálculo da área de cada secção. O caudal de ar quente à saída do gerador não foi possível ser determinado, devido à turbulência que se faz sentir a jusante do mesmo. Todos os resultados obtidos nas medições estão presentes na tabela B.2.

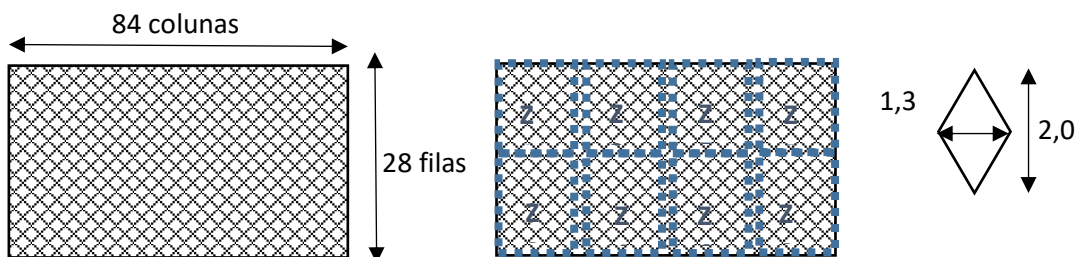


Figura B.2- Representação da secção, por entra o ar que será usado no aquecimento da olaria

Tabela B.2-Valores medidos de temperatura e velocidade para o ar que entre no gerador

Nº Medições	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Temperatura	29	29	30	34	30	32	32	33	-	32	
Zona de medição	Valores medidos em diversos pontos, da velocidade do ar a aquecer nos geradores (m/s)										
Z1	1,83	1,54	2,84	4,16	4,83	3,89	2,23	1,44	1,73	1,99	2,65
Z2	2,49	1,56	3,78	2,34	1,76	2,24	1,68	0,95	1,73	1,41	1,99
Z3	0,58	2,04	4,96	4,76	5,43	5,05	3,54	3,73	2,65	2,50	3,52
Z4	1,23	2,09	4,45	3,46	3,71	3,19	5,00	3,68	3,25	2,74	3,28
Z5	1,20	3,99	4,73	4,48	5,45	7,00	6,73	6,64	4,43	4,58	4,92
Z6	0,50	2,99	2,75	3,60	5,46	3,36	6,00	4,56	2,43	2,09	3,37
Z7	4,03	4,93	6,88	2,89	5,94	5,56	6,53	6,04	5,64	5,48	5,39
Z8	7,10	2,56	4,25	2,45	2,48	3,30	4,28	2,68	1,59	1,91	3,26

No cálculo da área da secção por onde entra o ar frio, teve-se em conta as dimensões de cada losango, bem como o número de losangos em cada uma das zonas. Todas as zonas apresentam igual área. Na determinação da área de uma zona teve-se em conta:

<u>Área de cada losango:</u>	<u>Número de losangos em</u>	<u>Área total de cada zona</u>
$A_{los.} = \frac{D \times d_i}{2}$	<u>cada zona:</u>	<u>por onde entra o ar:</u>
$= 0,00013m^2$	$N^{\circ} = 21 \text{ colunas} \times 14 \text{ fila}$	$Z_n = 294 \times 0,0001$
	$= 294$	$= 0,038m^2$

O caudal volumétrico ($\dot{v}_{Ar.Aquec}$) foi facilmente calculado da seguinte forma:

$$\dot{v}_{Ar.Aquec} = (2,65 + 1,99 + 3,52 + 3,28 + 4,92 + 3,37 + 5,39 + 3,26) \times 0,038 = 1,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Da mesma forma, para a obtenção do caudal mássico, seria necessário conhecer o valor da densidade do ar. Esta foi calculada da mesma maneira que anteriormente, tendo em conta a temperatura média entre a entrada e a saída do ar no gerador.

$$\text{Para } T_{Ar.Aquec.} = 318 \text{ K}, \rho_{Ar.Aquec.} = 1 \text{ 109 g} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\dot{m}_{Ar.Aquec.} = 1,13 \times 1109 = 1 \text{ 252 g} \cdot \text{s}^{-1}$$

A entalpia específica do ar foi calculada do mesmo modo, como indicado anteriormente:

$$\int_{T_{ArF}=304,37}^{T_{ArQ}=331,55} 6,713 + 0,04697 \times 10^{-2} \cdot T + 0,1147 \times 10^{-5} \cdot T^2 dT$$

$$= 28,21 J. g^{-1}$$

$$H_{Ar.Aquec.} = 1\,252 \times 28,21 = 35,329 J. s^{-1} \approx 35 kW$$

Cálculo da entalpia dos gases de combustão ($H_{GasesExhaust.}$):

$$H_{GasesExhaust.} = \dot{m}_{GasesExhaust.} \times cp_{GasesExhaust.} \times (T_{GasesExhaust.} - T_{ref}) \quad (B5)$$

Tal como nos restantes cálculos, a entalpia dos gases de exaustão parte dos valores da velocidade média de saída dos gases de exaustão ($\bar{v}_{ArExhaust.}$), da área da secção por onde ele escoa ($A_{conduta}$) e tendo também em conta a respetiva densidade ($\rho_{ArExhaust.}$). As medições da velocidade dos gases, foram feitas de modo análogo e em dois pontos distintos, no centro e nas pontas. Simultaneamente, foram também lidos os valores de temperatura desta corrente. Os resultados encontram-se apresentados na tabela B.3.

Tabela B.3- Valores medidos de temperatura e velocidade dos gases de combustão

Temperatura máxima (°C)	142	136	145	163	154	163	150	165	162	156
Velocidade Ponta (m/s)	0,30	0,20	-	-	0,60	0,50	-	0,35	0,30	0,30
Velocidade Centro (m/s)	11,60	7,50	13,70	13,40	14,50	7,80	-	9,40	13,80	11,80

Uma vez que as zonas onde se conseguiu medir a velocidade correspondem a zonas onde a velocidade é muito diferente, pensou-se em considerar que a velocidade medida no centro (que corresponde sempre à velocidade máxima), podia ser aproximada à velocidade média se o regime fosse turbulento.

Foi então determinado o número de *Reynolds* para os gases de exaustão, de maneira a avaliar o seu regime de escoamento.

$$Re = \frac{\rho_{GasesExhaust.} \times \bar{v}_{GasesExhaust.} \times d}{\mu_{GasesExhaust.}} = \frac{28,98 \times 11,50 \times 0,30}{2,43E^{-5}} = 4,10 E^6$$

Como o valor do *Reynolds* indica regime muito turbulento foi então, utilizado no cálculo do caudal dos gases de exaustão, o valor de velocidade correspondente ao valor de velocidade máxima.

$$\bar{v}_{GasesExhaust.} = 11,50 m. s^{-1}$$

Para a determinação da área por onde escoam os gases de exaustão, da chaminé, teve-se em conta as dimensões que estão apresentadas na figura B.3.



Figura B.3-Representação da secção por onde são expelidos os gases de exaustão, com as respetivas dimensões

A área da secção é então dada por: $A_{conduta} = \frac{\pi \times r^2}{2} = 0,068 \text{ m}^2$

Tendo definido a velocidade dos gases e a área por onde eles escoam, calculou-se o caudal volumétrico desta corrente:

$$\dot{v}_{GasesExhaust.} = 11,50 \times 0,068 = 0,79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Para a determinação das propriedades dos gases de exaustão e devido à ausência de instrumentos capazes de analisar os seus constituintes, o que se fez foi assumir que estes se poderiam aproximar em termos das suas propriedades ao ar. Esta simplificação não está de todo incorreta, uma vez que o azoto, sendo um gás inerte e que está presente em maior quantidade no ar, ele sairá todo nos gases de exaustão. As suas propriedades encontram-se calculadas de seguida:

$$\rho_{ar} = \frac{MM_{ar} \times P}{R \times T_{ar}} = \frac{28,95 \times 1}{82,057 \times 427} = 0,00083 \text{ g.cm}^{-3} = 827 \text{ g.m}^{-3}$$

$$\dot{m}_{GasesExhaust.} = 0,79 \times 827 = 653 \text{ g.s}^{-1}$$

$$\int_{298,15}^{GasesExhaust.=426,57} 6,713 + 0,04697 \times 10^{-2} \cdot T + 0,1147 \times 10^{-5} \cdot T^2 dT$$

$$\approx 131 \text{ J.g}^{-1}$$

$$H_{GasesExhaust.} = 653 \times 131 = 85,586 \text{ J.s}^{-1} \approx 86 \text{ W}$$

Cálculo da entalpia da reação de combustão ($\Delta H_{0 \text{ reação}}^{298}$):

A entalpia da reação de combustão foi determinada recorrendo à equação 3.8. Aqui foi considerado o PCI e não o valor do PCS, uma vez que se considera que a água, nos gases de exaustão, se encontra na forma de vapor. O valor do PCI foi consultado num documento onde constam as características do GN fornecido pela empresa.

O caudal volumétrico do gás natural foi calculado com base nas partidas que se efetuam nos geradores de calor. Na figura B.4, apresenta-se uma esquematização de uma partida efetuada no gerador número quatro.

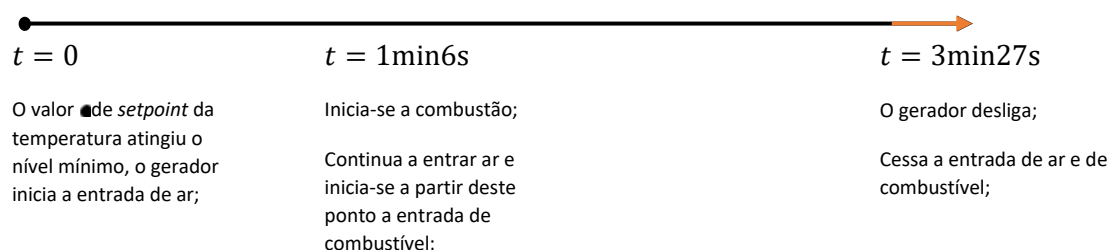


Figura B.4-Representação esquemática de uma partida de funcionamento para o gerador 4

Esta análise teve que ser feita obrigatoriamente pois, como já referido, os geradores trabalham segundo um ciclo de liga-desliga, e como tal estes equipamentos não consomem gás ininterruptamente.

Mesmo durante o funcionamento, como se pode constatar pela figura B.4, durante o primeiro minuto, existe um período onde não há entrada de GN, mas apenas de ar. Foram feitas várias análises por cada partida e o procedimento adotado é o seguinte:

- i. Determinação do volume de gás natural consumido por partida
Este volume foi lido diretamente no contador que se apresenta junto destes equipamentos. O volume médio normalizado obtido para a entrada de GN numa partida foi:
$$V_{GN} = 0,84 \text{ m}^3$$
- ii. Determinação do tempo de entrada de gás natural
O tempo de entrada de GN nos geradores de calor foi estimado, com o auxílio de um cronómetro. Para este gerador, o tempo médio de entrada de gás para a combustão por cada partida foi de $t = 120,85\text{s} \approx 0,034\text{h}$

$$\dot{v}_{GN} = \frac{0,84}{0,034} = 25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\Delta H_{0 \text{ reação}}^{298} = 25 \times 10,53 = 263 \text{ kW}$$

De acordo com a equação 3.6, foi calculado o balanço de energia:

$$H_{GN} = 0 \text{ kW}; H_{Ar.Comb.} = 0,8 \text{ kW}; H_{Ar.aquec.} = 35 \text{ kW}; H_{GasesExhaust.} = 86 \text{ kW}$$

$$\Delta H_0^{298} \text{ reação} = 263 \text{ kW}$$

$$q = 35 + 86 - 263 - 0,8 - 0 = -144 \text{ kW}$$

Anexo C-Resultados obtidos e calculados para a secagem das peças cerâmicas

C.1 Determinação do valor de humidade no ponto crítico

O traçar das curvas de *Bigot*, para a determinação do ponto crítico a cada temperatura, está representado nas figuras C.1 a C.3. Este foi executado de acordo com o referido por Mancuhan et al, 2016, ou seja, através da interceção das retas de ajuste quer para fase constantes, quer para a fase decrescente.

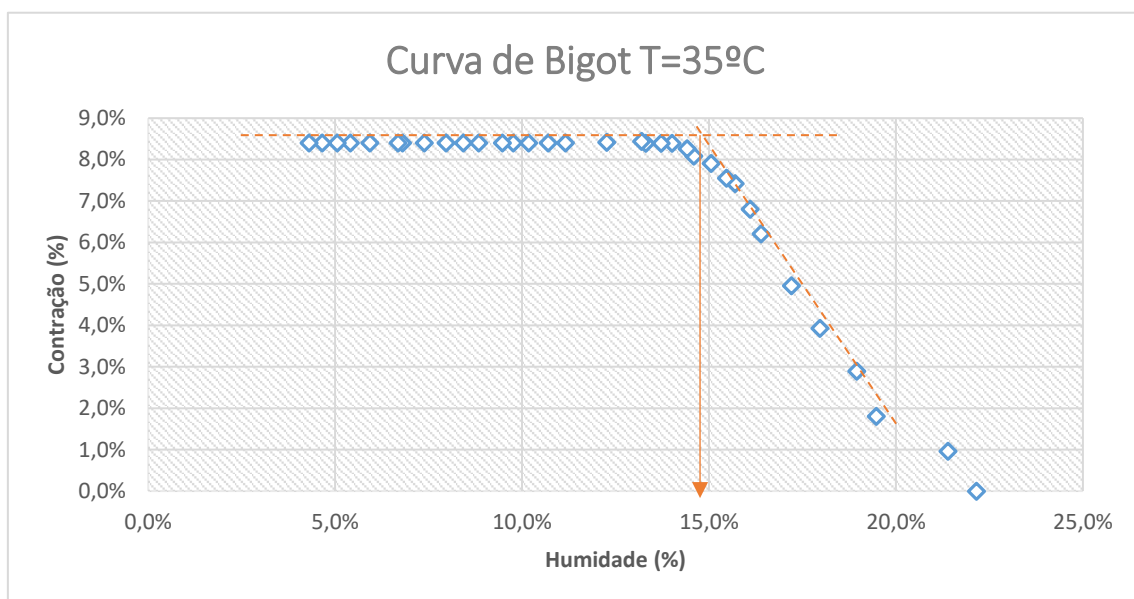


Figura C.1-Determinação do ponto crítico para a experiência realizada a 35°C

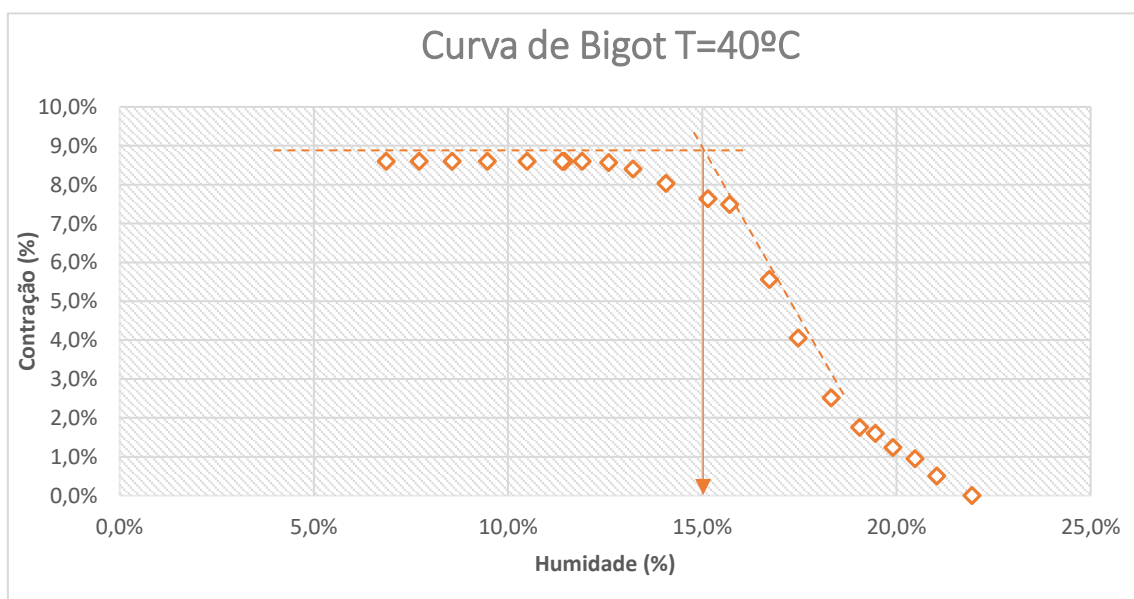


Figura C.2-Determinação do ponto crítico para a experiência realizada a 40°C

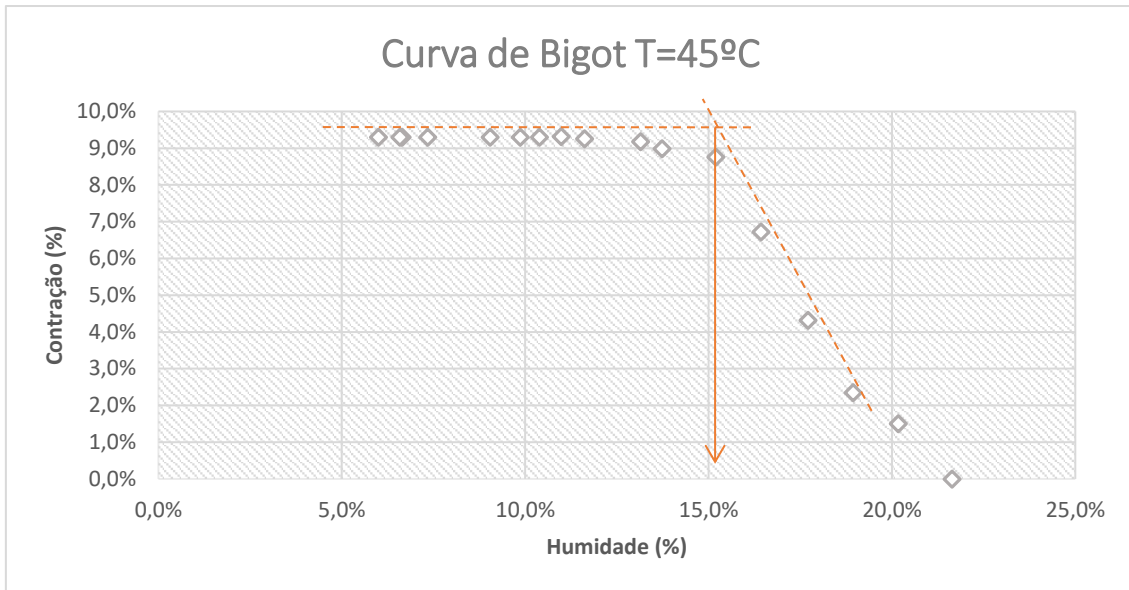


Figura C.3-Determinação do ponto crítico para a experiência realizada a 45°C

C.2 Levantamento das condições atmosféricas da olaria 1

Para a determinação das condições psicrométricas do ar na olaria, procedeu-se à divisão do espaço da olaria em vinte e sete pontos, de acordo com o apresentado na figura C.4. Foram feitas medições de temperatura e humidade do ar em cada um destes pontos, e ao longo do dia. Na tabela C.1 e na tabela C.2, são apresentados os registos efetuados em dois dias diferentes (19 e 23 de maio).

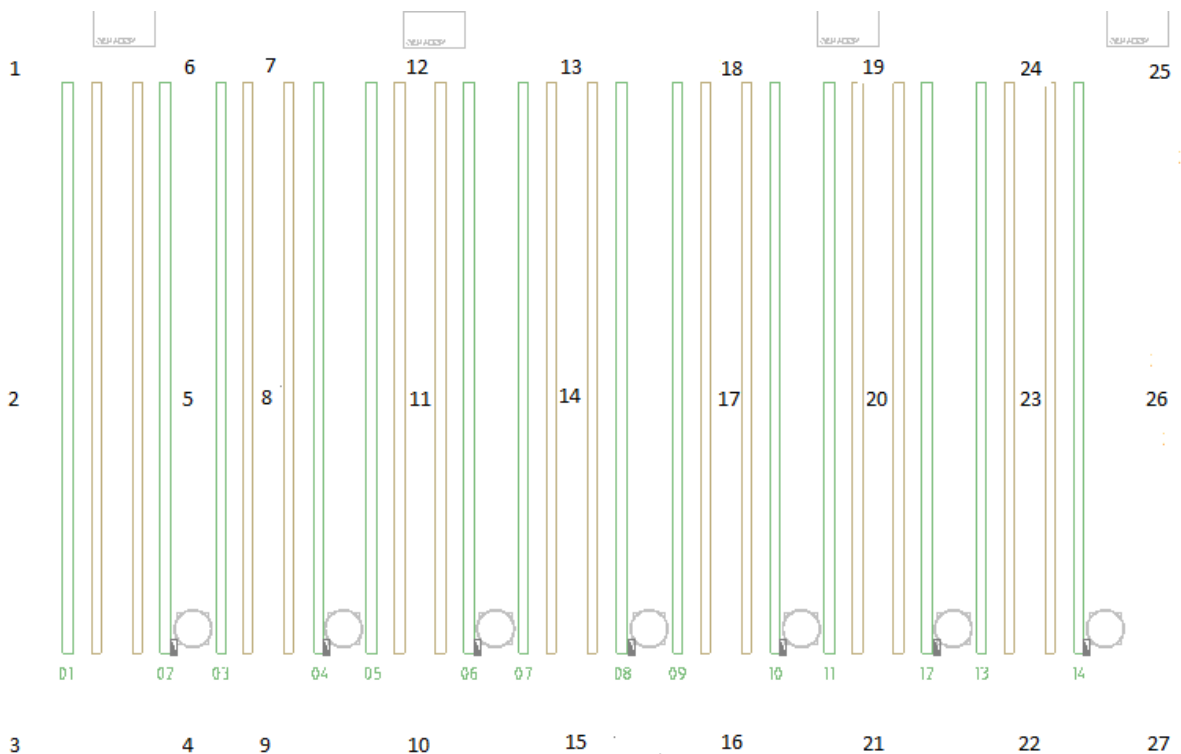


Figura C.4-Representação da divisão da olaria por pontos

Tabela C.1- Registos psicrométricos do ar na olaria ao longo do dia 19-05-2016

Hora do dia	Ponto da olaria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Condições psicrométricas do ar exterior
	Parâmetro																												
7h55	Temperatura (°C)	22	22	22	22	22	22	22	22	23	23	25	25	28	27	25	25	27	27	27	27	26	25	28	29	29	29	25	16
	Humidade relativa (%)	85	85	85	85	85	84	84	84	83	82	78	77	71	71	75	78	70	70	67	68	71	74	68	62	62	61	67	84
12h20	Temperatura (°C)	22	25	25	25	25	25	25	25	25	25	26	27	27	27	26	26	28	28	28	29	27	27	29	30	31	30	27	19
	Humidade relativa (%)	80	80	80	81	82	81	81	81	80	80	79	76	76	76	78	81	76	74	73	75	77	79	77	68	68	67	72	80
15h44	Temperatura (°C)	25	24	24	24	24	25	25	24	25	24	24	24	25	25	25	25	25	26	27	26	25	27	27	27	27	26	19	
	Humidade relativa (%)	84	84	85	85	84	79	79	83	84	85	85	79	80	83	83	85	81	79	79	89	81	83	78	73	73	75	79	80
17h10	Temperatura (°C)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	25	25	24	24	25	25	25	25	25	25	26	26	26	26	25	19
	Humidade relativa (%)	83	83	86	86	86	80	80	85	85	85	85	79	80	83	83	85	83	79	78	81	85	85	81	76	76	77	82	80
17h25	Temperatura (°C)	22	22	22	22	22	22	22	23	22	22	23	23	23	23	23	23	23	24	24	24	23	23	25	25	25	25	23	19
	Humidade relativa (%)	83	83	84	85	84	82	82	82	84	84	84	81	81	84	83	85	81	78	78	78	84	87	84	78	78	80	83	80

Tabela C.2-Registos psicrométricos do ar na olaria ao longo do dia 23-05-2016

Hora do dia	Ponto da olaria Parâmetro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Condições psicrométricas do ar exterior
		8h00	Temperatura (°C)	21	21	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22	24	26	25	24	25	25	26	26	26	25	27	27	27	
Humidade relativa (%)	72		72	73	73	74	74	74	73	73	73	71	69	66	63	67	68	65	64	61	63	64	69	61	59	59	61	63	64
10h35	Temperatura (°C)	23	23	23	23	23	23	23	23	24	24	25	25	26	27	26	26	27	27	28	29	26	26	29	30	30	31	28	18
	Humidade relativa (%)	69	70	69	72	71	71	72	72	72	72	68	69	67	70	68	69	58	67	64	64	64	67	66	61	60	57	63	63
12h45	Temperatura (°C)	24	24	25	25	25	24	24	25	25	27	27	27	28	28	27	27	27	28	28	30	28	28	30	31	31	31	27	22
	Humidade relativa (%)	77	78	78	77	79	79	79	78	78	78	73	73	73	73	75	74	70	69	65	67	69	71	71	65	66	64	68	48
15h40	Temperatura (°C)	25	24	25	25	25	25	25	25	25	26	25	25	26	26	26	26	26	27	27	27	27	26	28	28	28	28	27	23
	Humidade relativa (%)	77	76	77	79	73	73	73	77	78	76	75	71	72	76	80	83	75	72	70	70	81	81	76	70	72	72	75	47
17h15	Temperatura (°C)	25	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	25	25	24	25	25	25	25	25	25	25	26	26	26	26	25	18
	Humidade relativa (%)	77	80	77	82	75	75	75	79	80	80	82	73	76	79	81	84	79	76	74	75	81	82	78	71	71	74	77	50

Para a determinação do consumo de gás natural às diferentes temperaturas estudadas, foi construída a tabela C.3 que apresenta o caudal médio consumido de gás (em condições PTN), e o respetivo tempo de secagem para cada uma dessas temperaturas. O consumo de gás natural foi medido num gerador, fazendo a respetiva alteração do valor de *setpoint*.

Tabela C.3-Determinação do consumo de gás natural requerido na secagem das peças opus

Temperatura	T=35°C	T=40°C	T=45°C
Descrição			
Caudal médio de gás natural (m ³ /s)	0,0050	0,0062	0,0069
Tempo (s)	63900	38460	26100
Consumos de gás natural (m ³)	319,50	238,45	180,09

Anexo D- Medidas de otimização energética

Medidas de otimização a implementar nos geradores de calor

Limpeza das superfícies de transferência de calor no interior dos geradores de calor

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor para uma situação ideal, U_1 , (ausência de sujamento):

$$\frac{1}{U_1} = \sum R_{T1} = R_1 + R_2 + R_3$$

No caso em que apenas existe troca de calor entre o ar e os gases de exaustão, e não existem resistências de sujamento, então o coeficiente típico global de transferência de calor (U_1), considerando uma permuta entre dois gases quentes, varia entre a 10 a 50 $W.m.^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Cálculo do coeficiente global de transferência de calor para uma situação real, U_2 , (presença de sujamento):

No caso real, com a presença de sujamento, existem para além das resistências anteriormente referidas, duas resistências adicionais:

$$\frac{1}{U_2} = \sum R_{T2} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

Os valores típicos para os fatores de sujamento associado aos gases de escape, e ao ar e gases industriais são:

Gases de escape= 0,0005 – 0,0002 $m.^2 \text{ } ^\circ\text{C}. W^{-1}$

Ar e gases industriais= 0,0002 – 0,0001 $m.^2 \text{ } ^\circ\text{C}. W^{-1}$

De entre os fatores de sujamento referidos, foram selecionados os maiores valores, uma vez que as partículas que entram nos geradores são de dimensões consideráveis e para além disso estão constantemente a entrar.

$$\sum R_{T2} = 0,0207 m.^2 \text{ } ^\circ\text{C}. W^{-1} \text{ a } 0,1007 m.^2 \text{ } ^\circ\text{C}. W^{-1}$$

$$U_2 = 48 \text{ Wm}^{-2}\text{°C}^{-1} \text{ a } 9,93 \text{ W. m.}^{-2} \text{ °C}^{-1}$$

O calor transferido nos dois casos, pode ser relacionado da seguinte forma:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{U_2}{U_1} = 0,96 \text{ a } 0,99$$

$$Q_2 = 0,97 Q_1 \text{ ou } Q_2 = 0,99 Q_1$$

Manutenção do interior dos geradores de calor

Na tabela D.1, estão apresentados os valores (em euros), da poupança obtida caso sejam conseguidas com a implementação desta medida reduções nas perdas de 5%, 10% ou 15%.

Tabela D.1-Previsão da poupança obtida com a implementação da medida referente à manutenção do interior dos geradores de calor

Nº Gerador Redução perdas	Gerador 1	Gerador 2 Noite	Gerador 2 Dia	Gerador 3 Noite	Gerador 3 Dia	Gerador 4	Total Mensal (€)
5%	17€	17 €	5€	14€	5€	29€	87€
10%	30€	35€	10€	28€	9€	57€	168€
15%	45€	52€	15€	41€	14€	86€	252€

Isolamento da cobertura da olaria

De maneira a prever o valor da poupança obtida com o isolamento da cobertura da olaria, foi realizado o procedimento que se indica de seguida.

Inicialmente foram seleccionados os valores de temperatura para a região de Valadares tendo em conta as condições mais adversas. Ou seja, foram seleccionados os valores mínimos de temperatura quer durante o dia, quer durante a noite, para o inverno e para o verão. Os meses desde janeiro a abril incluído outubro novembro e dezembro foram considerados meses de inverno. Os restantes meses excluindo o mês de agosto foram considerados meses de verão. Os valores de temperatura seleccionados estão apresentados na tabela D.2.

Tabela D.2-Valores de temperatura selecionados para a região de Valadares (Clima Data, 2016)

Estação do ano Altura do dia	Temperaturas de inverno (°C)	Temperaturas de verão (°C)
Dia	13,3	22,3
Noite	5,3	13,9

Foi efetuado o balanço de energia de acordo com a equação D.1, entre o interior e o exterior da olaria, para o caso da inexistência de isolamento.

$$\frac{T_{int.} - T_{sup.}}{\frac{1}{h_{int.}} + \frac{\Delta x_{telhas}}{k_{telhas}}} = \varepsilon\sigma(T_{sup.}^4 - T_{ext.}^4) + h_{ext.}(T_{sup.} - T_{ext.}) \quad (D.1)$$

Onde se considerou:

$h_{int.}$ e $h_{ext.}$ calculados de acordo com a expressão (3.10);

Δx_{telhas} e k_{telhas} igual a 0,006m e 0,744Wm⁻¹°C⁻¹ respetivamente.

Sugere-se a utilização de painéis semi-rígidos de lã de rocha, com espessura igual a 7,5cm condutividade térmica igual a 0,0036Wm⁻¹°C⁻¹ e custo igual a 5,99€.m⁻² Rockwool, 2016. Neste caso, o balanço de energia foi calculado como mostra a equação D.2.

$$\frac{T_{int.} - T_{sup.}}{\frac{1}{h_{int.}} + \frac{\Delta x_{telhas}}{k_{telhas}} + \frac{\Delta x_{isolamento}}{k_{isolamento}}} = \varepsilon\sigma(T_{sup.}^4 - T_{ext.}^4) + h_{ext.}(T_{sup.} - T_{ext.}) \quad (D.2)$$

A partir das equações D.1 e D.2 determinou-se a temperatura no interior da olaria para as duas situações. Após determinado o valor de temperatura, foi possível determinar a potência perdida no caso atual Q_1 , e também no caso de aplicação de isolamento Q_2 . Para que a temperatura dentro da olaria se mantenha constante com o tempo, é necessário que os ganhos térmicos da olaria correspondam às perdas térmicas. Assim sendo, foi possível calcular a temperatura a que os geradores devem aquecer o ar, no caso da olaria estar isolada.

Esta temperatura foi determinada, através da equação D.3.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(60 - 25)}{(T_{ArQ} - 25)} \quad (D.3)$$

Onde se considera que a variação da energia interna na olaria, é igual às perdas de energia nela ocorridas.

Todos os resultados obtidos referentes às perdas energéticas, bem como os novos valores de temperatura calculados, estão apresentados na tabela D.3.

Tabela D.3-Resultados obtidos das perdas energéticas na olaria, com e sem isolamento, e respetiva temperatura de aquecimento do ar para manter a temperatura ambiente a 25°C.

Característica Fluxo de calor Temperatura °C	s/isolamento		c/isolamento	
	Q(W/m ²)	T. ar quente (°C)	Q(W/m ²)	T. ar quente (°C)
T=5,3	35,80	60	7,47	32
T=13,3	21,17	60	4,44	32
T=13,9	20,44	60	4,28	32
T=22,3	4,81	60	0,11	32

Após isto, foi recalculado o consumo de gás natural, através do balanço de energia ao gerador de calor. Para isso, e tendo em conta que a temperatura determinada para o ar quente que sai dos geradores, é um valor que está sujeito a erros, considerou-se para efeitos de cálculo, uma temperatura de 35°C. Com isolamento, o consumo médio mensal de gás natural é de cerca de 2 363 m³, e o seu custo de 1 119€. Anualmente, prevê-se gastar em gás natural cerca de 12 313€, obtendo uma poupança de 22 324€ anual.

$$\text{Poupança (\%)} = \frac{34\,815\text{ €} - 12\,313\text{ €}}{34\,815\text{ €}} \times 100 = 64\%$$

Para estimar o tempo ao fim do qual o investimento é recuperado, foi determinado o *payback* através da equação D.4.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento}}{\text{Poupança}} \quad (\text{D.4})$$

Sendo o valor do capital investido igual a 14 975€ (5,99€.m⁻² × 2 500m²).

O valor do *payback* é igual a 0,7, o que significa que o investimento é recuperado ao fim de cerca de 8 meses.

Identificação medidas de redução das fugas de ar comprimido

Na tabela D.4, estão apresentadas as poupanças obtidas, caso se consigam atingir reduções de 10% a 40% das perdas atuais, com a implementação das medidas indicadas para o ar comprimido.

Tabela D.4 – Previsão da poupança obtida com a implementação da medida referente às reduções das fugas de ar comprimido

Custo de ar comprimido perdido nas fugas (€)*	Redução perdas	Mensal	Anual**
746	10%	75€	825 €
	40%	299€	3 289€

*Retirado da tabela A.2

**Admitindo 11 meses por ano